



T.C. SANAYİ VE
TEKNOLOJİ BAKANLIĞI



GÜNEY MARMARA HİDROJEN YOL HARİTASI



Co-funded by
the European Union

GÜNEY MARMARA HİDROJEN YOL HARİTASI

Yayın Sahibi

Güney Marmara Kalkınma Ajansı

Hazırlayanlar

RS PLANLAMA PROJE İNŞAAT EĞİTİM DANIŞMANLIK SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ.
YILDIZ TEKNOLOJİ TRANSFER OFİSİ A.Ş.

Önsöz

Günümüzde iklim değışikliği ile mücadele, enerji güvenliği sağlama ve ekonomik kalkınmayı sürdürülebilir temeller üzerine inşa etme hedefleri, küresel gündemin öncelikli konuları arasında yer almaktadır. Bu dönüşüm sürecinde temiz enerji kaynaklarının stratejik rolü artarken, hidrojen teknolojileri hem enerji geçişı hem de sanayi dönüşümü açısından kritik bir bileşen olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda hazırlanan Güney Marmara Hidrojen Yol Haritası, Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan TR22 Bölgesi'nin yenilenebilir enerji potansiyelini, sanayi altyapısını ve stratejik konumunu temel alarak, bölgenin hidrojen ekonomisine geçiş sürecine katkı sağlayacak çok yönlü bir çerçeve sunmaktadır.

Rapor, kapsamlı literatür taramaları, ulusal ve uluslararası politika belgelerinin değerlendirilmesi, saha çalışmaları, odak grup toplantıları ve paydaş analizleri gibi bilimsel ve katılımcı yöntemlerle şekillendirilmiştir. Hidrojen değer zincirinin tüm aşamalarına yönelik mevcut durum analizi yapılmış; güçlü yönler, zayıf noktalar, fırsatlar ve tehditler GZFT yaklaşımıyla ortaya konmuş; kısa, orta ve uzun vadeli stratejik öneriler geliştirilmiştir.

Güney Marmara Kalkınma Ajansı olarak amacımız, bu çalışma ile bölgenin sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmasına katkı sağlamak, enerji dönüşümünde öncü bir rol üstlenmesini desteklemek ve Türkiye'nin hidrojen vizyonuna bölgesel düzeyde stratejik bir katkı sunmaktır.

Bu yol haritasının hazırlanmasında emeği geçen tüm kurum ve kuruluşlara, uzmanlara, akademisyenlere ve saha çalışmasına katkı sunan tüm paydaşlara teşekkür eder; çalışmanın kamu, özel sektör ve akademi başta olmak üzere tüm ilgililere yol gösterici bir kaynak olmasını temenni ederiz.

İÇİNDEKİLER

Önsöz	i
1. Yönetici Özeti	1
2. Giriş	2
2.1. Raporun Amacı ve Kapsamı.....	2
2.2. Metodoloji	2
2.3. Beklenen Çıktılar	3
3. Literatür Taraması.....	4
3.1. Dünya’da, Türkiye’de ve Güney Marmara Bölgesinde Hidrojen Ekosisteminin Mevcut Durumunun Değerlendirilmesi.....	4
3.2. Uluslararası Birliklerin Üst Politika Belgelerinin Analiz Edilmesi	11
3.3. Ulusal Hidrojen Yol Haritası, Eylem Planı ve İş Modeli Örneklerinin En Güncel Versiyonlarının İncelenmesi, İyi Uygulama Örneklerine Ait Modellerin Analiz Edilmesi	17
3.4. Temiz Hidrojen Alanında Geliştirilen/Uygulanan Mevzuat ve Standardizasyon Çerçevesinin Değerlendirilmesi.....	24
3.5. Yeşil Yakıtlarda Uluslararası Teşvik Uygulamalarının Analiz Edilmesi	27
3.6. Genel Sonuç ve Değerlendirme	33
4. Güney Marmara Bölgesi Hidrojen GZFT Analizi	34
4.1. Ajans Tarafından Hazırlanan Strateji Dokümanlarının İncelenmesi	35
4.2. GZFT Analizi	38
4.3. Çanakkale ve Balıkesir İçin Yeşil Hidrojen Odaklı Mekânsal Gelişim Stratejisi	81
4.4. Hidrojen Projeksiyonları.....	92
4.5. Doğalgaz Hatlarının Yeniden Amaçlandırılması	102
5. Güney Marmara Bölgesi Stratejik İş Modeli Raporu	109
5.1. Ekosistem Analizi.....	110
5.2. Pazar Analizi	115
5.3. TR22 Güney Marmara Bölgesi için Hidrojen Üretim ve Dağıtım Üssü İş Modeli	138
5.4. Sanayinin Temiz Dönüşümüne Yönelik Mevcut Uluslararası Teşvik Sistemleri ve Yeni Teşvik Mekanizmaları Önerileri.....	155
5.5. Mevzuatsal Gerekliklerin Belirlenmesi ve Yasal Çerçeveye Yönelik Öneriler	177
6. Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı.....	191
6.1. Stratejik Hedef 1: Hidrojen Üretimini Ölçeklendirmek	193
6.2. Stratejik Hedef 2: Bölgesel Hidrojen Omurgasını Kurmak ve Altyapı Dönüşümünü Gerçekleştirmek	196
6.3. Stratejik Hedef 3: Mevzuat, Sertifikasyon ve Alım Garantisi Mekanizmalarını Oluşturmak	198
6.4. Stratejik Hedef 4: Yerel Hidrojen Pazarının Gelişimini Kolaylaştırmak/Sanayi ve Ulaşımında Kullanımını Yaygınlaştırmak	199
6.5. Stratejik Hedef 5: İnsan Kaynağını Geliştirmek ve Bilgi Altyapısını Güçlendirmek	201
6.6. Stratejik Hedef 6: Güney Marmarayı Hidrojen İhracatında Stratejik Bir Geçit Haline Getirmek.....	202

6.7. Stratejik Hedef 7: Araştırma, Geliştirme ve İnovasyonu Teşvik Etmek	203
6.8. Stratejik Hedef 8: Hidrojenin Enerji Sistemleriyle Entegrasyonunu Sağlamak	205
Kaynakça.....	213

1. Yönetici Özeti

Bu rapor, Türkiye'nin temiz enerji dönüşüm hedefleri doğrultusunda stratejik öneme sahip olan temiz hidrojen teknolojilerinin Güney Marmara Bölgesi'nde yaygınlaştırılmasına yönelik çok yönlü bir değerlendirme sunmaktadır. Raporun temelini, analizler, ulusal ve uluslararası politika belgeleri incelemeleri, iyi uygulama örnekleri ve Balıkesir ile Çanakkale illerinde yürütülen saha çalışmaları kapsamındaki paydaş görüşmeleri oluşturmaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen odak grup toplantıları, çalıştaylar ve mülakatlar aracılığıyla hidrojen ekosistemine dair mevcut kapasite, ihtiyaçlar ve potansiyel tehditler çok paydaşlı ve disiplinler arası bir yaklaşımla analiz edilmiştir.

Saha verileri ve literatür bulguları doğrultusunda yapılan analizler, Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen teknolojileri açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. GZFT analizlerine dayanan bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- **Güçlü yönler** arasında bölgenin yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli (özellikle rüzgâr), Avrupa pazarına yakınlığı, lojistik avantajları ve organize sanayi bölgeleri ile güçlü sanayi altyapısı öne çıkmaktadır. Ayrıca üniversitelerin teknik kapasitesi ve girişimcilik ekosistemine yönelik destekleyici unsurlar da hidrojen değer zincirinin gelişimi açısından önemli dayanaklardır.
- **Zayıf yönler** olarak hidrojen teknolojilerinde yeterli teknolojik olgunluğa ulaşamamış olması, test ve sertifikasyon altyapısının eksikliği, finansmana erişimdeki güçlükler, hidrojen farkındalığının sınırlı olması ve nitelikli insan kaynağı eksikliği ön plana çıkmaktadır. Ar-Ge çıktılarının ticarileştirilmesinde yaşanan zorluklar da bu tabloyu pekiştirmektedir.
- **Fırsatlar**, Avrupa Yeşil Mutabakatı, sınırda karbon düzenlemesi ve Türkiye'nin yeşil kalkınma vizyonu gibi üst politika belgeleri çerçevesinde ortaya çıkmaktadır. Horizon Europe fonları kapsamında Clean Hydrogen Joint Undertaking gibi mekanizmalar aracılığıyla sunulan destekler; yerli komponent üretimi, hidrojen vadisi projeleri ve yeşil girişimcilik alanlarında bölgeye önemli fırsatlar sağlamaktadır.
- **Tehditler** arasında dışa bağımlı teknoloji yapısı, mevzuat ve teşvik sistemlerindeki belirsizlikler, arz güvenliği konusunda süregelen endişeler ve nitelikli iş gücü eksikliği sayılabilir. Bu tehditlerin aşılması yönünde gerekli stratejik adımların atılmaması durumunda, bölge yatırım çekme ve rekabet avantajı sağlama açısından geri kalabilir.

Raporun önerdiği politika araçları yalnızca yönetim yapılarını güçlendirmekle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda test ve sertifikasyon altyapısının kurulması, hidrojen alım garantisi mekanizmalarının değerlendirilmesi, hidrojen güvenliği standartlarının oluşturulması, boru hattı/dolum/depolama altyapısının geliştirilmesi ve finansal destek sistemlerinin çeşitlendirilmesi gibi alanlara da yöneliktir. Bu öneriler, gerek literatürde gerekse saha çalışmalarında ifade edilen ihtiyaçlara doğrudan yanıt vermektedir.

Sonuç olarak bu rapor, Balıkesir ve Çanakkale illerinin orta ve uzun vadeli stratejik planlamalarında hidrojen teknolojilerini kalkınmanın temel eksenlerinden biri olarak konumlandırmaları gerektiğini vurgulamaktadır. Temiz hidrojen yatırımları, enerji arz güvenliğini artırmanın yanı sıra sanayi dönüşümünü hızlandıracak, yeni iş alanları yaratacak ve ihracat potansiyelini güçlendirecektir. Bu yönleriyle çalışma, Türkiye'nin hidrojen vizyonuna bölgesel ölçekte katkı sunmayı amaçlayan, uygulanabilir ve yol gösterici bir referans belgesi niteliğindedir.

2. Giriş

2.1. Raporun Amacı ve Kapsamı

Bu raporun temel amacı, Güney Marmara Bölgesi'nin mevcut enerji altyapısı, yenilenebilir kaynak potansiyeli, endüstriyel yapısı ve lojistik kapasitesi temelinde, bölgenin hidrojen ekonomisine geçiş sürecine stratejik düzeyde katkı sağlayacak bütüncül bir yol haritası hazırlamaktır. Ulusal ve uluslararası politika belgeleri ile uyumlu bir yaklaşımla, bölgenin ulusal ve uluslararası hidrojen ekosistemine entegrasyonunu destekleyecek yönetsel, teknik ve sektörel analizlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

Rapor, hidrojen üretimi, taşınması, depolanması ve tüketimi süreçlerini kapsamakta; bu süreçlere ilişkin mevcut durumun analiz edilmesi, gelecek projeksiyonlarının oluşturulması, sektörel potansiyelin belirlenmesi ve uygulamaya yönelik politika ve yönetim önerilerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, hidrojenin doğalgaz altyapısıyla birlikte değerlendirilmesi ve bölgesel enerji geçiş sürecinde olası rolünün incelenmesi de rapor kapsamındadır.

Saha çalışmaları kapsamında gerçekleştirilen açılış çalışmaları, odak grup toplantıları ve derinlemesine mülakatlar aracılığıyla bölgedeki kamu kurumları, özel sektör temsilcileri, akademik çevreler ve uluslararası kümelenmeler gibi kilit paydaşların görüşleri alınmış; bu görüşler doğrultusunda bölgeye özgü ihtiyaçlar, fırsatlar ve riskler belirlenmiştir. Balıkesir ve Çanakkale illerinde düzenlenen yerel çalıştaylar aracılığıyla bölgesel gerçekliğe dayalı öneriler geliştirilmiş, bölgenin stratejik avantajları somutlaştırılmıştır.

Rapor kapsamında ayrıca, Güney Marmara Bölgesi için uygun olabilecek ulusal ve uluslararası teşvik sistemleri analiz edilmiş; hukuki ve kurumsal altyapısının mevcut durumu değerlendirilmiş ve bölgeye özgü mevzuat önerileri geliştirilmiştir. Çalışmada, 2025–2030, 2030–2035 ve 2035–2053 dönemlerini kapsayan kısa, orta ve uzun vadeli gelişim aşamaları tanımlanarak, bölgenin temiz hidrojen ekonomisine geçişine yönelik öneriler bütünsel bir perspektifle sunulmuştur.

Bu çerçevede, rapor çıktılarının, Güney Marmara Bölgesi'nin sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile uyumlu biçimde şekillenmesine ve Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecinde bölgesel bir merkez olarak konumlanmasına katkı sağlaması öngörülmektedir.

2.2. Metodoloji

Rapor çalışmaları, nicel ve nitel yöntemlerin bir arada kullanıldığı, çok katmanlı ve çok paydaşlı bir yaklaşım temelinde yürütülmüştür. Bu doğrultuda, hem masa başı analizler hem de saha temelli uygulamalar entegre biçimde değerlendirilmiş; mevcut durumun belirlenmesi, bölgesel fırsat ve tehditlerin tanımlanması, stratejik yönlendirmelerin yapılması ve öneri geliştirme süreçleri metodolojik bir bütünlük içerisinde ele alınmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında; ulusal ve uluslararası politika belgeleri, sektör raporları, akademik yayınlar ve iyi uygulama örnekleri incelenerek kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede, Avrupa Yeşil Mutabakatı (European Green Deal), REPowerEU, Hydrogen Roadmap Europe gibi temel dokümanlar analiz edilmiştir. Ayrıca, Almanya, Birleşik Krallık, Hollanda, Japonya, ABD ve Kanada gibi ülkelerin hidrojen yol haritaları ve destek mekanizmaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada, saha çalışmaları kapsamında farklı düzeylerde etkileşimler tasarlanmıştır. Açılış çalıştay ile bölgesel öncelikler ve stratejik yönelimler tartışmaya açılmış; üretici, taşıyıcı, kamu kurumu, tüketici, teknoloji geliştirici ve uluslararası kümelenmeleri içeren altı odak grup toplantısı aracılığıyla sektör paydaşlarının görüşleri alınmıştır. Ayrıca, Balıkesir ve Çanakkale illerinde düzenlenen yerel çalıştaylar ve gerçekleştirilen derinlemesine mülakatlar sayesinde bölgeye özgü dinamikler tespit edilmiştir.

Üçüncü aşamada ise, elde edilen bulgular GZFT analizi kapsamında sistematik biçimde değerlendirilmiştir. Bu süreçte, önce Ajans tarafından hazırlanan strateji dokümanları analiz edilmiş; ardından bölgenin güçlü ve zayıf yönleri ile fırsat ve tehditleri detaylı biçimde sınıflandırılmıştır. Belirsizlikleri azaltmak amacıyla bulanık mantık temelli ağırlıklandırma ve

normalizasyon teknikleri kullanılmış, farklı paydaş gruplarının katkılarıyla çok boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir.

Son aşamada, bölge için kısa, orta ve uzun vadeli mekânsal gelişim senaryoları tanımlanmış; hidrojenin üretimi, dağıtımı, depolanması ve tüketimi süreçlerine yönelik stratejik hedefler, yönetim önerileri, teşvik sistemleri ve hukuki düzenlemeler ortaya konmuştur. Ayrıca, Türkiye ve Avrupa pazar potansiyeli, teknolojik eğilimler ve sanayinin temiz dönüşüm ihtiyacı çerçevesinde stratejik iş modeli kurgulanmıştır.

2.3. Beklenen Çıktılar

Raporun çıktıları, hem Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen odaklı dönüşümünü yönlendirecek hem de Türkiye'nin genel enerji politikalarıyla uyumlu olacak şekilde çok boyutlu olarak tasarlanmıştır. Bu kapsamda, elde edilmesi hedeflenen temel çıktılar şu şekildedir:

- Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen ekosistemine ilişkin mevcut durumunun bütüncül analizi: Bölgedeki mevcut kapasite, kaynak çeşitliliği, teknik altyapı, lojistik olanaklar ve paydaş profili detaylı şekilde ortaya konacaktır.

- Uluslararası politika belgeleri, mevzuatlar ve teşvik mekanizmalarının karşılaştırmalı analizi: Avrupa Birliği, ABD ve diğer gelişmiş ülkelerin stratejik yaklaşımları incelenerek bölge için uygulanabilir yönetim ve destek mekanizmaları önerilecektir.

- Katılımcı temelli saha çalışmaları sonucunda ortaya çıkan ihtiyaç ve beklentilerin raporlanması: Gerçekleştirilen çalıştaylar, odak grup toplantıları ve mülakatlar sayesinde bölgeye özel stratejiler geliştirilecektir.

- GZFT analizine dayalı olarak kısa, orta ve uzun vadeli gelişim senaryolarının oluşturulması: Belirlenen güçlü yönler ve fırsatlar doğrultusunda stratejik hedef setleri tanımlanacaktır.

- Çanakkale ve Balıkesir illeri için yeşil hidrojen odaklı mekânsal gelişim stratejileri: Hidrojenin üretim, dağıtım, depolama ve tüketim aşamaları bölgesel ölçekte yapılandırılacaktır.

- Güney Marmara Bölgesi için stratejik iş modeli önerisi: Pazar analizi, yatırım planlaması ve uluslararası iş birlikleri çerçevesinde, bölgenin üretim ve dağıtım üssü haline getirilmesine yönelik yapılandırılmış bir öneri sunulacaktır.

- Hidrojen ekonomisinin gelişimine katkı sağlayacak mevzuat önerileri ve yönetim yapısı: Sertifikasyon, teknik standartlar, güvenlik düzenlemeleri ve kurumsal sorumluluk paylaşımı konularında öneriler geliştirilecektir.

Bu çıktılar, bölgenin 2030, 2035 ve 2053 hedeflerine ulaşmasında temel rehber belgeler olarak kullanılabilir; kamu kurumları, yatırımcılar, sanayi temsilcileri ve politika yapıcılar için karar destek aracı niteliği taşıyacaktır.

3. Literatür Taraması

Bu bölümde, temiz hidrojen ekosisteminin uluslararası, ulusal ve bölgesel düzeylerdeki mevcut durumu, politika belgeleri, stratejik yol haritaları, mevzuat çerçeveleri ve destek mekanizmalarına ilişkin kapsamlı bir literatür taraması sunulmaktadır. Çalışmanın temel amacı, hidrojen değer zincirinin gelişimini çok boyutlu bir perspektifle incelemek, farklı coğrafyalardaki uygulamaları mukayeseli olarak değerlendirmek ve Türkiye ile Güney Marmara Bölgesi için yol gösterici olabilecek politika ve uygulama örneklerini sistematik biçimde ortaya koymaktır.

Bölümün ilk alt başlığında (3.1), dünya genelinde, Türkiye’de ve Güney Marmara Bölgesi’nde hidrojen ekosisteminin mevcut durumu analiz edilmekte; sektörel kapasite, üretim ve tüketim eğilimleri, teknolojik gelişmeler ve bölgesel farklılıklar ayrıntılı olarak değerlendirilmektedir. Devam eden kısımda (3.2), başta European Green Deal, REPowerEU ve Hydrogen Roadmap Europe olmak üzere Avrupa Birliği’nin ve uluslararası kuruluşların üst politika belgeleri incelenerek bu belgelerin hidrojen sektörüne dair temel ilkeleri, stratejik öncelikleri, uygulama araçları ve Türkiye’ye yönelik yansımaları ele alınmaktadır.

Üçüncü alt başlık (3.3) kapsamında, Almanya, Birleşik Krallık, Hollanda, Japonya, ABD ve Kanada gibi öncü ülkelerin güncel hidrojen yol haritaları, eylem planları ve iş modelleri incelenmekte; bu modellerin hedefleri, kurguları ve uygulama pratikleri mukayeseli bir analiz çerçevesinde değerlendirilmektedir. Dördüncü bölüm (3.4) ise temiz hidrojen alanında geliştirilmiş ve yürürlükte bulunan mevzuat düzenlemeleri ile standardizasyon çerçevelerini ele almakta; Avrupa Birliği, ABD ve diğer bölgelerdeki uygulamaların sektörel etkileri karşılaştırmalı bir yaklaşımla ortaya konulmaktadır.

Son olarak (3.5), yeşil yakıtlar alanında uluslararası düzeyde uygulanan finansal teşvik mekanizmaları detaylı şekilde incelenmekte; Hydrogen Bank, Carbon Contracts for Difference, Inflation Reduction Act gibi başat programların işleyiş biçimleri, potansiyel etkileri ve Türkiye’nin hidrojen ekosistemine yansımaları değerlendirilmektedir. Ayrıca altyapı yatırımları, kamu-özel iş birlikleri ve ihracat destekleri gibi tamamlayıcı araçlara dair örnekler sunulmaktadır.

Bu literatür taraması, hidrojen sektörünün stratejik gelişim eksenlerini bütüncül bir yaklaşımla incelemeyi ve politika yapıcılara, yatırımcılara ve akademik paydaşlara referans niteliğinde bir bilgi zemini oluşturmayı hedeflemektedir.

3.1. Dünya’da, Türkiye’de ve Güney Marmara Bölgesinde Hidrojen

Ekosisteminin Mevcut Durumunun Değerlendirilmesi

Hidrojen, küresel ölçekte enerji sistemlerinin yeniden yapılandırılmasında ve karbon nötr hedeflerin gerçekleştirilmesinde kilit bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bu önem, hidrojenin farklı üretim yöntemleriyle elde edilebilmesi, çok çeşitli sektörlerde kullanılabilmesi ve karbon emisyonlarının azaltılmasında oynadığı kritik rolden kaynaklanmaktadır. Özellikle elektrifikasyonu zor olan ağır sanayi, uzun mesafe taşımacılık ve yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel süreçler için hidrojen, emisyonuz bir çözüm sunmaktadır.

Enerji sektöründe hidrojen, üretim yöntemine bağlı olarak farklı “renklerle” tanımlanmaktadır. Bu renkler, hidrojenin üretim sürecindeki karbon emisyonu yoğunluğunu ve çevresel sürdürülebilirliğini temsil etmektedir. Uluslararası alanda standartlaşmamış olsa da yaygın olarak kabul gören hidrojen renk sınıflandırmaları şu şekildedir:

- **Yeşil hidrojen:** Güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektroliz yöntemiyle suyun hidrojen ve oksijene ayrılmasıyla üretilir. Üretim sürecinde karbon emisyonu oluşmaz. Bu nedenle en çevreci ve sürdürülebilir hidrojen türüdür.
- **Mavi hidrojen:** Doğal gazdan buhar metan reformasyonu (Steam Methane Reforming - SMR) ile elde edilir. Ancak bu süreçte açığa çıkan CO₂, karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojileriyle tutulur. Bu nedenle düşük karbonlu hidrojen olarak kabul edilir.

- **Gri hidrojen:** En yaygın hidrojen üretim şeklidir. Doğal gazdan SMR yöntemiyle üretilir ancak karbon emisyonları atmosfere salınır. Mavi hidrojenin karbon yakalama uygulanmayan halidir.
- **Kahverengi / Siyah hidrojen:** Linyit (kahverengi kömür) veya taşkömürü gibi fosil yakıtların gazlaştırılmasıyla elde edilir. Üretim süreci oldukça yüksek karbon emisyonu içerir. En çevresel zararı yüksek hidrojen türlerindedir.
- **Pembe (veya mor/kırmızı) hidrojen:** Elektroliz süreci için gerekli enerji, nükleer kaynaklardan sağlanır. Nükleer reaktörlerin sağladığı yüksek sıcaklıklar, elektrolizin verimliliğini de artırabilir.
- **Turkuaz hidrojen:** Metan pirolizi yöntemiyle üretilir. Süreç sonucunda hidrojen ve katı karbon elde edilir. Eğer bu süreç yenilenebilir enerji ile desteklenirse ve katı karbon güvenli şekilde depolanırsa, düşük emisyonlu bir alternatif olabilir.
- **Sarı hidrojen:** Sadece güneş enerjisi ile çalışan elektrolizörler ile üretilen hidrojen türüdür. Kavram henüz yaygınlık kazanmamıştır.
- **Beyaz hidrojen:** Doğal yollarla yer kabuğunda bulunan ve henüz ticari olarak çıkarılması yaygınlaşmamış jeolojik hidrojen türüdür. Şu anda aktif üretim stratejisi bulunmamaktadır.

Bu renk spektrumu, hidrojenin üretim sürecinde hangi enerji kaynağının kullanıldığını ve çevresel etkilerini net biçimde ortaya koymak açısından önemlidir. **Temiz hidrojen** kavramı ise genellikle yeşil ve mavi hidrojen türlerini kapsar; yani düşük veya sıfır karbon emisyonu ile üretilmiş hidrojenleri ifade eder. Ancak iklim hedeflerine ulaşmak açısından **yeşil hidrojen**, uzun vadede öncelikli teknolojik seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bunun temel nedeni, tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarıyla ve sıfır karbon salımıyla üretilmesidir.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Avrupa Birliği, Japonya, Güney Kore ve Avustralya gibi ülkeler hidrojen ekonomisine geçişte yeşil hidrojenin payını artırmayı hedeflemekte; bu doğrultuda finansal teşvik mekanizmaları, Ar-Ge programları ve hidrojen vadisi gibi entegre altyapı modelleri geliştirmektedir. Bu çabalar yalnızca enerji üretimini dönüştürmekle kalmayıp, aynı zamanda sanayi süreçlerinin karbonsuzlaştırılması, enerji arz güvenliğinin artırılması ve sürdürülebilir ekonomik büyümenin desteklenmesi açısından da stratejik katkılar sunmaktadır.

Türkiye ise bu dönüşümde henüz erken aşamada olmakla birlikte, ciddi bir potansiyele sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının bolluğu, coğrafi konumu, genç mühendislik altyapısı ve stratejik maden varlıkları (örneğin bor mineralleri) Türkiye'yi hidrojen üretimi ve ihracatı açısından avantajlı kılmaktadır. Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın hazırladığı Ulusal Enerji Planı ve Yeşil Mutabakat Eylem Planı'nda hidrojenin enerji dönüşümündeki rolü vurgulanmakta; ancak henüz uygulama düzeyinde bütüncül ve somut bir politika çerçevesi bulunmamaktadır.

Güney Marmara Bölgesi ise Türkiye ölçeğinde hidrojen ekosistemi açısından dikkat çeken bir bölge haline gelmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeli, sanayi yoğunluğu, liman altyapısı ve bölgesel kalkınma ajansının girişimleri bu bölgeyi potansiyel bir hidrojen vadisi olarak öne çıkarmaktadır. Özellikle Balıkesir ve Çanakkale illerinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrifikasyonu yoluyla elektroliz bazlı yeşil hidrojen üretimi yapılabileceği; ayrıca bu hidrojenin sanayi, ulaşım ve ihracat gibi alanlarda değerlendirilebileceği düşünülmektedir.

Bu bölümde; dünya genelindeki hidrojen stratejileri ve uygulama modelleri, Türkiye'nin mevcut durumu ve politika perspektifleri ile Güney Marmara özelinde gelişen yerel girişimler bütünsel biçimde analiz edilerek, gelecek için atılması gereken adımlara ışık tutulacaktır.

3.1.1. Dünya Ölçeğinde Hidrojen Ekosistemi

Küresel üretim ve tüketim eğilimleri irdelendiğinde, Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan "Global Hydrogen Review 2024" raporuna göre, 2023 itibarıyla dünya genelinde hidrojen tüketimi yaklaşık 97 milyon ton düzeyinde olduğu görülmektedir [1]. Ancak bu

tüketimin %95'inden fazlası hâlen fosil yakıtlardan, özellikle buhar reformasyonu (SMR) yöntemiyle üretilen gri hidrojenle karşılanmaktadır. Küresel senaryolarda, özellikle temiz (düşük veya sıfır karbonlu) hidrojenin üretiminin ve kullanımının 2030 ile 2050 dönemlerinde önemli oranda artacağı öngörülmektedir [1,2]. Burada özellikle elektroliz teknolojilerinde (alkalin, PEM, vb.) gelişme ile üretim maliyetlerinde düşüş öngörülmektedir. Farklı rapor ve çalışmalarda hidrojen üretim verimliliğinin artacağı ve teknolojik gelişmelerle birlikte maliyet rekabetçiliğinin sağlanacağı vurgulanmakta, yeşil hidrojenin kg başına maliyetinin 2030'da 2 USD'nin altına inmesi beklentisi yer almaktadır [2,3].

Avrupa Birliği, "REPowerEU" planı çerçevesinde 2030'da 10 milyon ton yerli temiz hidrojen ve 10 milyon ton ithalat hedefi belirlemiştir; finansal destek ve "Hydrogen Bank" gibi mekanizmalarla üretimi teşvik etmektedir [4]. ABD ise "45V Clean Hydrogen Production Tax Credit" kapsamında vergi teşvikleri sunarak projelerin finansal fizibilitesini artırmaya çalışmaktadır [5]. Avustralya, Orta Doğu, Kuzey Afrika ve Latin Amerika gibi bölgeler de yüksek yenilenebilir enerji potansiyelleriyle temiz hidrojen ihracatına yönelik stratejiler geliştirmektedir [2,6]. Bu bağlamda, farklı çalışmalarda özellikle hidrojen vadileri kavramı üzerinde durulmaktadır. Hidrojen vadileri, belirli coğrafi bölgelerde yerel yenilenebilir enerji kaynaklarını, üretim tesislerini, depolama ve dağıtım altyapısını ve son kullanıcı uygulamalarını entegre eden sistemlerdir. Bu vadiler, lojistik ve üretim maliyetlerini azaltarak, bölgesel sinerji ve yatırım çekiciliğini artırmakta; dünyadaki bazı örnek uygulamalar, bu modelin başarıyla hayata geçirilebileceğini ortaya koymaktadır [7].

Hidrojen vadileri, hidrojenin üretiminden nihai kullanımına kadar tüm değer zincirini entegre eden, bölgesel ölçekli, çok paydaşlı ve çok sektörlü ekosistemler olarak tanımlanmaktadır. Bu vadiler; yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı hidrojen üretimi, depolanması, taşınması ve çeşitli sektörlerde (sanayi, ulaşım, enerji) kullanımı süreçlerini bir arada barındırmakta ve yerel sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle ilişkilendirilmektedir.

Yapılan kapsamlı bir analiz sonucunda, 2023 itibarıyla dünya genelinde **105 hidrojen vadisi girişi** tespit edilmiştir [7]. Bu vadilerin dağılımına bakıldığında, **Avrupa** başı çekmektedir ve küresel toplamın yaklaşık yarısını oluşturmaktadır. Avrupa'yı sırasıyla **Asya ve Kuzey Amerika** izlemektedir. Özellikle Horizon 2020 ve Horizon Europe programları çerçevesinde Avrupa Birliği tarafından desteklenen birçok vadi projesi bulunmaktadır.

Vadilerin gelişim durumu incelendiğinde, %60'tan fazlasının hâlen planlama veya erken uygulama aşamasında olduğu görülmektedir. Sadece sınırlı sayıda hidrojen vadisi tam anlamıyla operasyonel durumdadır. Bu durum, konseptin hâlen gelişmekte olduğunu ve birçok bölgesel girişimin fizibilite ve yatırım hazırlıkları sürecinde bulunduğunu göstermektedir .

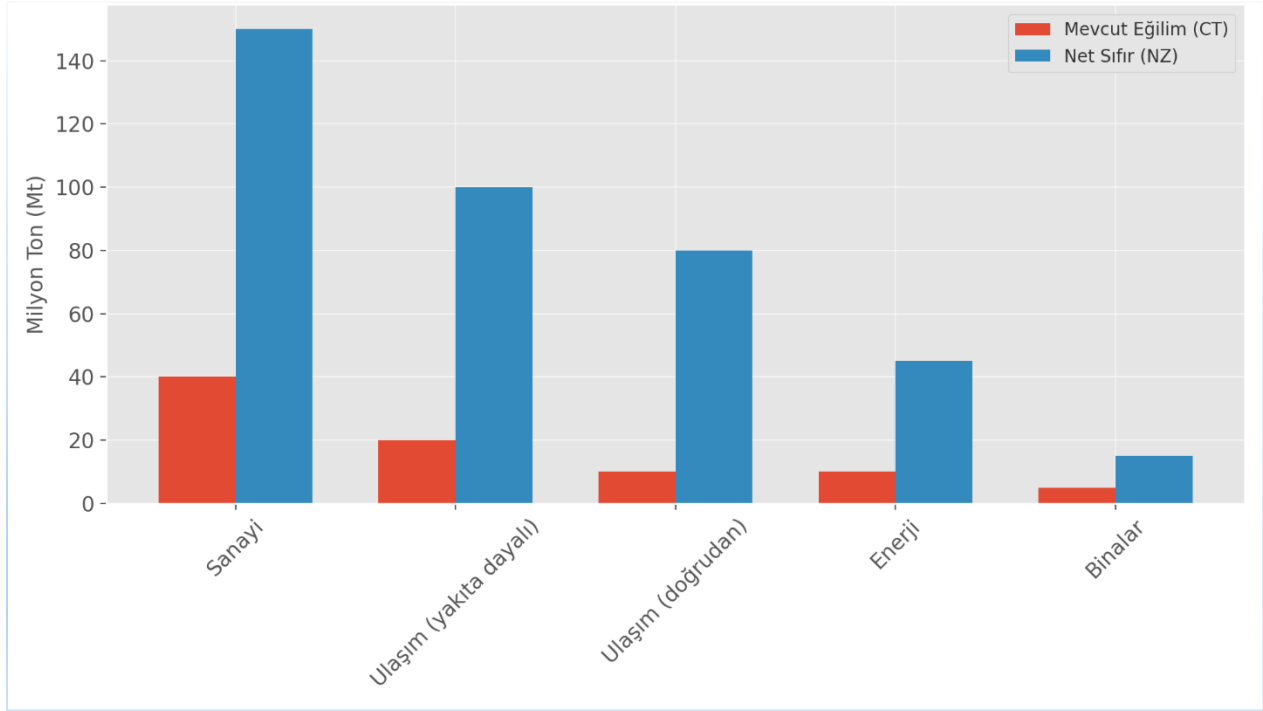
Vadi projeleri farklı ölçeklerde yapılandırılmıştır:

- Bazı vadiler tek bir endüstriyel kümeye odaklanırken,
- Bazıları şehir ölçeğinde çoklu sektörleri hedeflemekte,
- Bazı büyük projeler ise ulusal düzeyde altyapı bütünleşmesini hedefleyen makro ölçekli modeller sunmaktadır.

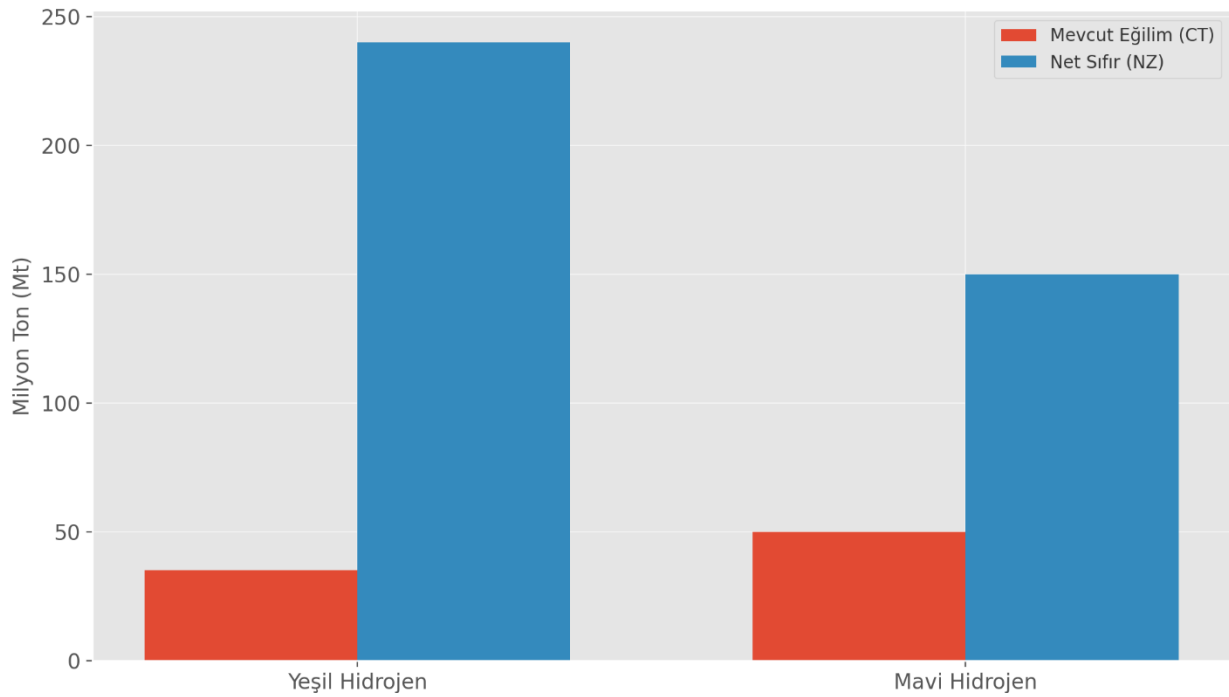
Ref. [7] kapsamında gerçekleştirilen değerlendirmeye göre, hidrojen vadileri sadece teknolojik entegrasyon değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik dönüşüm için bir kaldıraç işlevi görmektedir. Yatırımların yönlendirilmesi, yerel istihdamın artırılması, yeni iş modellerinin geliştirilmesi ve paydaş katılımının güçlendirilmesi açısından vadiler önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Küresel enerji dönüşümünde düşük karbonlu hidrojenin önemi giderek artmakta olup, bu dönüşümün hızı bölgesel politikalar, altyapı yatırımları ve enerji sistemlerinin elektrifikasyon seviyesiyle doğrudan ilişkilidir. BP Energy Outlook 2024'e göre [8], Net Sıfır senaryosunda

düşük karbonlu hidrojen kullanımı 2050'ye kadar 390 Mt seviyesine ulaşmaktadır. Bu kullanım, esas olarak sanayi (örneğin demir-çelik), ulaşım (deniz ve hava taşımacılığı için türev yakıtlar), enerji depolama ve yüksek sıcaklık gerektiren endüstriyel süreçlerde yoğunlaşmaktadır (bkz. Şekil 1).



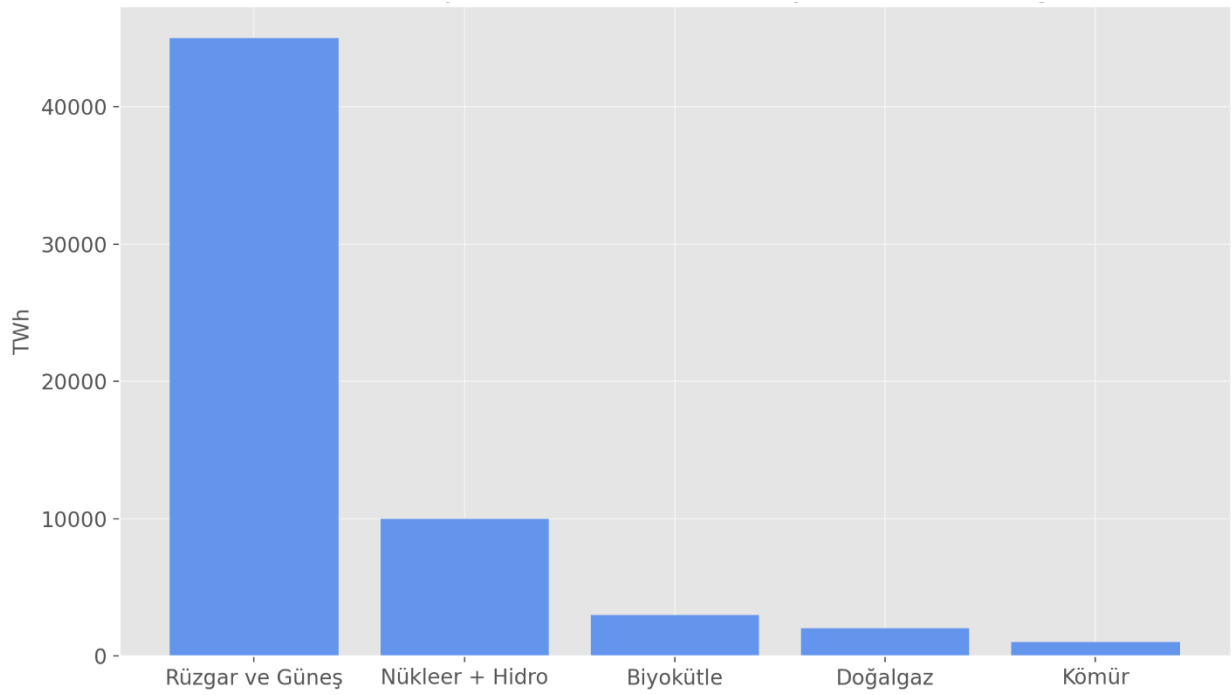
Şekil 1. Sektörel Düşük Karbonlu Hidrojen Talebi (Mevcut Eğilim: 2035, Net Sıfır: 2050)



Şekil 2. Düşük Karbonlu Hidrojen Üretimi Türlerine Göre Dağılım (Mevcut Eğilim: 2035, Net Sıfır: 2050)



Şekil 3. AB ve Asya'da Hidrojen ve Türevi Yakıt Talebi



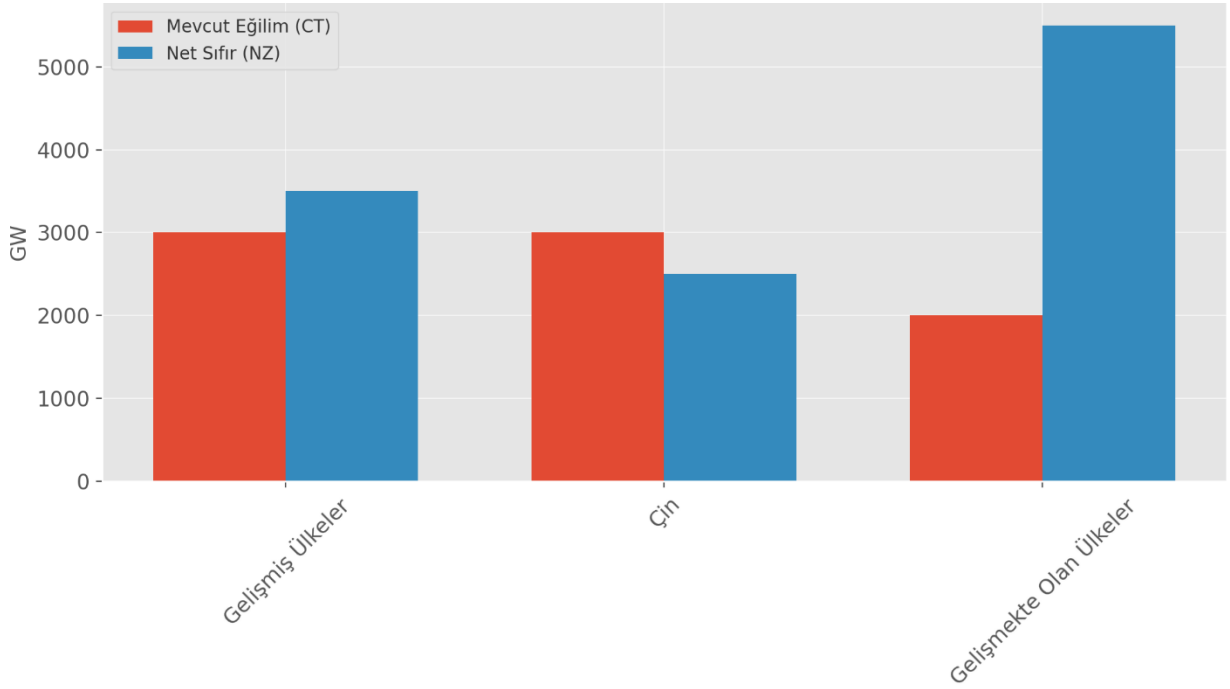
Şekil 4. Net Sıfır Senaryosunda Elektrik Üretimi Kaynaklarına Göre Dağılım (2050)

Şekil 2'de düşük karbonlu hidrojen üretimi türlerine göre dağılım, Şekil 3'te ise AB ve Asya'da hidrojen ve türevi yakıt talebi değişimi gösterilmektedir. Bu iki şeklin arka planını oluşturan detaylı analizi içeren [8]'de ise hidrojen üretiminde yeşil hidrojenin (yenilenebilir elektrikten elde edilen) artan rolünü ve özellikle Çin, Hindistan, AB gibi bölgelerde baskın hale geldiği; mavi hidrojenin ise ABD ve Orta Doğu gibi doğal gaz rezervi zengin ülkelerde sürdüğünü ortaya koyulmaktadır. Hidrojenin saf formda doğrudan kullanımı hâlâ bölgesel kalmakla

birlikte, amonyak ve metanol gibi türev yakıtlar aracılığıyla taşınması ve tüketilmesi de giderek yaygınlaşmaktadır. AB ve Japonya gibi tüketici bölgeler, talebi büyük ölçüde ithalatla karşılamayı planlamakta; bu durum Şekil 3'te AB ve gelişmiş Asya ülkelerinde hidrojen talebinin bileşimi üzerinden de görülebilmektedir.

Bu dönüşümün enerji altyapısı yönünden desteklenmesi gereklidir. Şekil 4'te görüldüğü üzere, Net Sıfır senaryosunda toplam elektrik üretiminin üçte ikisinden fazlası rüzgâr ve güneşten sağlanmakta; bu da yeşil hidrojenin ölçeklenebilirliğini doğrudan belirlemektedir. Ayrıca bu üretim hacminin %30'luk kısmı doğrudan elektrolizle hidrojen üretimi için ayrılmakta olduğu [8]'de belirtilmektedir.

Bu kapasitenin sağlanabilmesi ise kurulu yenilenebilir kapasitenin çok hızlı artışını gerektirmektedir. Şekil 5, 2050 yılına kadar gelişmekte olan ülkelerin kurulu güneş ve rüzgâr gücündeki rolünün artacağını, Çin'in üretim gücünün görece olarak sabit kalacağını ve gelişmiş ülkelerde de büyümenin sürdüğünü göstermektedir.



Şekil 5. Kurulu Güneş Ve Rüzgâr Enerjisi Kapasitesi Dağılımı (Mevcut Eğilim: 2035, Net Sıfır: 2050)

3.1.2. Türkiye’de Hidrojen Ekosistemi

Türkiye, 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda enerji dönüşümünde hidrojenin rolünü artırmaya yönelik kapsamlı stratejik planlar yayımlamıştır. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan “**Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası**” belgesinde, 2035’e kadar 5 GW, 2053’e kadar ise 70 GW elektrolizör kapasitesine ulaşılması ve üretim maliyetlerinin kg başına 2,4 USD’den 2053’te 1,2 USD’ye düşürülmesi hedeflendiği belirtilmektedir [9]. Söz konusu yol haritası; üretim, iletim, depolama ve kullanım aşamalarında hidrojen değer zincirinin geliştirilmesini; ilgili hukuki ve piyasa düzenlemeleri ile insan kaynağının artırılmasını öngörmektedir.

Türkiye’de hidrojen, çeşitli sektörlerde kullanım potansiyeli taşımaktadır:

- **Sanayi:** Rafineri, petrokimya, gübre ve çelik üretiminde kullanılan gri hidrojenin, karbon yakalama teknolojileri (CCS) destekli mavi veya yenilenebilir kaynaklı yeşil hidrojenle ikame edilmesi hedeflenmektedir [10]. Bu kapsamda, **TENMAK** ve **TÜBİTAK** iş birliğinde

- yerli üretim kapasitesini artırmaya yönelik **elektrolizör geliştirme çalışmaları** yürütülmekte; yüksek verimlilik ve yerli teknolojilerle rekabetçi sistemler hedeflenmektedir.
- **Ulaşım:** Ağır vasıta, otobüs ve lojistik sektörlerinde yakıt hücreli araçlar için pilot projeler yürütülmekte, bu alanda geliştirme faaliyetleri ve denemeler gerçekleştirilmektedir [10,11]. Türkiye’de hidrojenle çalışan ilk otobüs prototipleri geliştirilmeye başlanmış, yakıt hücreli taşımacılık Ar-Ge gündemine alınmıştır.
 - **Isıtma ve Binalar:** Doğalgaz şebekesine hidrojen karışımı uygulamaları ve ısıtma sistemlerinde alternatif yakıt olarak hidrojenin kullanımı üzerinde çalışmalar devam etmektedir [12]. Bu bağlamda, **GAZBİR-GAZMER** öncülüğünde Konya’da yer alan bir test merkezinde hidrojenin doğalgaz şebekesine %20 oranında karıştırılması üzerine saha testleri sürdürülmektedir.
 - **Elektrik ve Depolama:** Yenilenebilir enerjiden elde edilen fazla elektriğin “Power-to-Hydrogen (P2H)” dönüşümüyle depolanması, mevsimsel denge sağlamada önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir [9].

Hidrojen teknolojilerinin gelişimi, hem kamu hem de özel sektör tarafından desteklenmektedir. **TENMAK**, şu anda **Ulusal Temiz Hidrojen Stratejisi ve Eylem Planı** hazırlıklarını sürdürmekte olup, planın tamamlanması ile birlikte hukuki çerçeve, destek mekanizmaları ve yatırım ortamı daha da netleşecektir. Ayrıca **TÜBİTAK MAM Enerji Enstitüsü**, hidrojen üretimi, depolaması ve özellikle **yakıt pili sistemleri** konusunda çok sayıda ulusal ve uluslararası projede teknik liderlik yürütmektedir. Hidrojenin mobil ve sabit uygulamalarda kullanımına yönelik modüler yakıt pili sistemleri geliştirilmekte, saha uygulamaları desteklenmektedir.

Araştırma altyapısı bakımından da Türkiye’de önemli gelişmeler yaşanmaktadır. **Koç Üniversitesi Hidrojen Teknolojileri Araştırma Merkezi**, hem temel bilim hem de uygulamalı mühendislik düzeyinde hidrojen üretimi, depolama ve dönüştürme teknolojileri üzerine araştırmalar gerçekleştirmekte; elektrokimyasal sistemler, katalizör geliştirme ve sistem entegrasyonu konularında uzmanlaşmıştır. Geçmişte, Türkiye’de **UNIDO** (Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı) desteğiyle yürütülen hidrojen projeleri kapsamında da farkındalık artırıcı faaliyetler gerçekleştirilmiş ve teknik eğitimlerle kapasite geliştirme sağlanmıştır.

SHURA tarafından yayımlanan raporda, ülkemizin hem iç tüketim hem de ihracat potansiyeli vurgulanmakta, pilot projeler ve Ar-Ge çalışmalarının önemi belirtilmektedir [8]. Ayrıca, yerli ve yabancı firmalar tarafından rafineri, petrokimya ve enerji sektörlerinde yeşil/mavi hidrojen projeleri başlatılmakta, teknolojik iş birlikleri kurulmaktadır [7,9].

3.1.3. Güney Marmara Bölgesi’nde Hidrojen Ekosistemi

Güney Marmara Bölgesi, Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan TR22 bölgesi, Türkiye’nin en yüksek rüzgâr enerjisi kurulu gücüne sahip bölgelerinden biridir. **2023 yılı itibarıyla bölgede 2.100 MW’ın üzerinde rüzgâr kurulu gücü bulunmakta olup**, bu değer Türkiye genelindeki toplam rüzgâr kapasitesinin yaklaşık **%20’sine karşılık gelmektedir** [12]. Bölgenin toplam yenilenebilir enerji kapasitesi ise 3.500 MW’ın üzerindedir. Özellikle **off-shore rüzgâr potansiyeli**, bölgenin gelecekteki enerji üretim kapasitesini daha da artırma potansiyeline sahiptir [13]. Bu yüksek üretim kapasitesi, bazı dönemlerde bölgesel tüketimin üzerine çıkmakta, bu da **yeşil hidrojen üretimi** için stratejik bir avantaj sunmaktadır [12]. Güney Marmara hidrojen tüketim potansiyeli yüksek enerji yoğun sektörlerin yoğunlaştığı bir bölgedir. Bölgede farklı sanayi kümelenmeleri mevcuttur ve bölgedeki **Bandırma ve Çanakkale liman altyapısı**, yeşil hidrojen türevlerinin (örneğin yeşil amonyak, yeşil metanol) ihracatı için lojistik avantaj yaratmaktadır [11].

Bu güçlü altyapı çerçevesinde, **Türkiye’nin ilk ve tek resmi hidrojen vadisi** olan **HYSouthMarmara Projesi**, Avrupa Komisyonu tarafından **Clean Hydrogen Partnership**

kapsamında fonlanarak hayata geçirilmiştir. Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA) koordinasyonunda yürütülen proje, 15 paydaşın iş birliğiyle hayata geçirilmektedir. .

Proje, Güney Marmara’da yenilenebilir kaynaklardan yeşil hidrojen üretilmesini, bu hidrojenin endüstride kullanılmasını ve bölgesel bir yeşil hidrojen değer zincirinin oluşturulmasını hedeflemektedir. Proje kapsamında en az 4 MW kapasiteli bir elektrolizör ile yılda 500 ton yeşil hidrojen üretimi planlanmakta; üretilen hidrojen tüp treylerler ile yüksek basınçlı gaz formunda taşınarak şu **dört ana uygulamada** değerlendirilecektir:

- **Düzcamlar Üretimi:** Gri hidrojen yerine yeşil hidrojen doğrudan kullanılacaktır.
- **Hidrojen Peroksit Üretimi:** Girdilerde yeşil hidrojen ile ikame sağlanacaktır.
- **Seramik Endüstrisi:** Enerji yoğun hızlı pişirme proseslerinde doğal gaz yerine yeşil hidrojen kullanılacaktır.
- **Sodyum Bor Hidrür:** Katı hâl hidrojen depolama ve borhidrür esaslı güç kaynağı geliştirme çalışmaları yürütülecektir.

Yeşil hidrojenin üretimi için **bölgedeki güneş ve rüzgâr santralleri** entegre edilecek; suyun elektrolizi ile elde edilen hidrojen, **kimya, cam ve seramik** gibi enerji yoğun sektörlerde **yakıt, proses girdisi ve indirgen** madde olarak kullanılacaktır. Projenin nihai hedefi, Güney Marmara’yı **Türkiye’nin ilk karbon nötr bölgesi** yapacak bir **yeşil hidrojen ekosistemi** kurmak ve bu deneyimi ülke geneline yaymak olarak tanımlanmıştır.

3.1.4. Genel Değerlendirme ve Karşılaştırmalı Analiz

Küresel Yönelimler: Küresel hidrojen ekosistemi, 2023 itibarıyla artan talep, teknoloji geliştirme ve maliyet düşüşü gibi faktörler çerçevesinde hızla büyümektedir. Temiz hidrojen projeleri duyurulsa da, projelerin yatırım kararına ulaşma oranı halen düşük kalmaktadır. Politik teşvik mekanizmaları, özellikle AB’nin “REPowerEU” hedefleri ve ABD’nin 45V vergi kredisi uygulamaları, bu dönüşümü desteklemektedir.

Türkiye’de Durum: Türkiye, 2053 net sıfır emisyon hedefiyle hidrojen teknolojilerini stratejik bir öncelik olarak benimsemiştir. Ulusal strateji belgeleri çerçevesinde temiz hidrojenin üretim kapasitesinin artırılması, maliyetlerin düşürülmesi ve çeşitli sektörlerde kullanımının yaygınlaştırılması hedeflenmektedir. Ancak, mevcut projelerin çoğu pilot aşamasında olup, yatırım ve altyapı eksiklikleri önemli engeller olarak değerlendirilmektedir.

Güney Marmara Bölgesi Özellikleri: Güney Marmara, yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli, gelişmiş sanayi altyapısı ve stratejik liman konumu sayesinde, Türkiye’nin hidrojen ekosisteminde model bir bölge oluşturma potansiyeline sahiptir. Bu durum, sanayi tesislerinin, yenilenebilir enerji üretiminin ve mevcut gaz altyapısının entegre edilmesi yoluyla hem iç tüketim hem de ihracat açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

3.2. Uluslararası Birliklerin Üst Politika Belgelerinin Analiz Edilmesi

Bu alt bölümde, dünyada yeşil ve sürdürülebilir dönüşüm sürecine yön veren bazı üst politika belgeleri değerlendirilmiştir. Söz konusu belgeler, özellikle iklim ve enerji eksenindeki hedefler çerçevesinde hazırlanan European Green Deal, REPowerEU ve Hydrogen Roadmap Europe başlıkları altında ele alınarak; bu belgelerin stratejik öncelikleri, araçları, öngördükleri dönüşüm mekanizmaları ve hidrojenin bu süreçteki rolüne dair öne çıkan unsurlar ortaya konulmuştur. Bu kapsamda, aşağıdaki alt başlıklarda her bir belgenin arka planı, temel ilkeleri ve politikalarda öngörülen enstrümanlar ile Türkiye ve Güney Marmara Bölgesi’ne yönelik yansımaları değerlendirilecektir.

3.2.1. European Green Deal

Bu alt başlıkta, European Green Deal (EGD veya Avrupa Yeşil Mutabakatı) çerçevesinde yayımlanan resmî belgeler ve bilgilendirme notları dikkate alınarak AB'nin iklim ve çevre politikalarındaki ana kapsam ve hedefler özetlenmektedir. EGD, Avrupa Komisyonu'nun Aralık 2019'da kabul ettiği, 2050 yılına kadar iklim-nötr bir Avrupa ve sürdürülebilir bir büyüme modelini hedefleyen kapsamlı stratejisidir [15].

Arka Plan ve Amaçlar

- **İklim-Nötr Hedefi:** Avrupa Birliği, 2050 itibarıyla sera gazı emisyonlarını net sıfıra indirmeyi amaçlamaktadır. Bu hedef, "European Climate Law" (Avrupa İklim Yasası) ile hukuki çerçeveye kavuşturulmuştur [14,15].
- **Ekonomik Dönüşüm Vurgusu:** EGD, yalnızca bir iklim politikası olmayıp, ekonomik büyümeyi karbon ve kaynak kullanımından ayırmayı hedefleyen yeni bir büyüme stratejisi olarak tasarlanmıştır [14].
- **Toplumsal ve Bölgesel Adalet:** EGD, yeşil dönüşümün herkese adil olması gerektiğini, bu süreçte dezavantajlı bölgeleri veya sektörleri destekleyecek mekanizmalar geliştirilmesi gerektiğini belirtmektedir [16].
- **Sektörel Kapsam:** Temiz enerji, sürdürülebilir ulaşım, binaların enerji verimliliği, sanayinin karbonsuzlaştırılması, dögüsel ekonomi, tarım-gıda sistemleri (Farm to Fork), orman ve ekosistem koruma gibi farklı alanları kapsamaktadır [14,16].

Temel İlkeler ve Politik Araçlar

a) Fit for 55 Paketi

AB, 2030 yılına kadar net sera gazı emisyonlarında en az %55 azaltım (1990'a kıyasla) hedefi belirlemiştir. Bu doğrultuda "Fit for 55" paketindeki mevzuat önerileri (Emissions Trading System reformu, Yenilenebilir Enerji Direktifi revizyonu, Enerji Verimliliği Direktifi vb.) devreye girmektedir [17].

b) İklim Yasası (European Climate Law)

2050 yılı iklim nötr hedefine yasal bağlayıcılık kazandırmakta, ara hedefleri (2030 için %55) netleştirmektedir. Bu, yatırımcılar ve paydaşlar için öngörülebilirlik sağlamayı amaçlamaktadır [14].

c) Finansman ve Yatırım Mekanizmaları

Sürdürülebilir Avrupa Yatırım Planı, 1 trilyon avroyu aşan yeşil yatırım seferberliğini hedeflemektedir [15].

ETS (Emisyon Ticareti Sistemi) Gelirleri ve Sosyal İklim Fonu gibi araçlarla enerji yoksulluğunu hafifletmek ve düşük gelirli kesimleri desteklemek amaçlanmaktadır [17].

AB Bütçesi, Horizon Europe, InnovFund gibi programlar aracılığıyla Ar-Ge ve pilot projelere finansman desteği verilmektedir [14,15].

d) Karbon Sınır Düzenlemesi

Karbonsuzlaşmada öncü olan AB sanayisinin rekabetçiliğini korumak için, "carbon leakage" riski taşıyan sektörlerle yönelik bir karbon sınır ayarlama mekanizması tasarlanmaktadır [14].

Hidrojen Boyutu ile İlgili Yaklaşımlar

- **Enerji Dönüşümünde Hidrojenin Rolü:** EGD'ye göre, enerji sektörünün karbonsuzlaşmasında hidrojen kritik bir enstrümandır. Hidrojen, özellikle sanayi, ulaşım ve ısıtmada fosil yakıtların yerini alarak emisyon azaltımına katkıda bulunma potansiyeline sahiptir [18].
- **Altyapı ve Ar-Ge Destekleri:** AB, "Alternatif Yakıt Altyapısı Yönetmeliği" gibi düzenlemelerle hidrojen dolum istasyonlarının yaygınlaşmasını ve elektrolizör teknolojilerinin gelişimini teşvik etmektedir [18]. Horizon Europe ve benzeri fonlar aracılığıyla yakıt hücresi ve hidrojen teknolojileri odaklı Ar-Ge faaliyetlerine destek sunulmaktadır.
- **Yenilenebilir Enerji Direktifi (RED II ve Revizyonu):** Hidrojenin yenilenebilir kaynaklardan üretilmesini (yeşil hidrojen) ve endüstri ile ulaşımında kullanımını destekleyerek 2030 hedeflerini güçlendirmeyi amaçlamaktadır [17,18].

Uygulama Örnekleri ve İlerlemeler

- **Binalar:** "Renovation Wave" girişimiyle binaların enerji verimliliğini artırmak ve düşük karbonlu ısıtma-soğutma sistemlerine geçiş hedeflenmektedir. Burada hidrojenle çalışan kombi veya yakıt hücresi sistemleri gelecekte potansiyel barındırmaktadır [15].
- **Ulaşım:** CO₂ standartlarının sıkılaşması (yeni binek araçların 2035 sonrası sıfır emisyon olması) ve alternatif yakıt altyapısının genişlemesiyle ağır taşıtlar ve trenler dahil, hidrojen temelli ulaşım çözümlerine kapı aralanmaktadır [17,18].
- **Orman ve Biyoçeşitlilik İnisiyatifleri:** "3 Billion Trees" hedefi gibi ekolojik eylemler, EGD'nin yalnızca iklim değil, ekosistem odaklı olduğunun göstergesidir [19]. Enerji ve hidrojen projelerinde çevresel hassasiyet gözetilmesi bu perspektifle uyumludur.

Türkiye ve Güney Marmara Bölgesi'ne Yönelik Yansımalar

- **Yeşil Mutabakat Uyumu ve Sınırdaki Karbon Düzenlemesi:** AB, sınırdaki karbon düzenlemesi ile karbon yoğun ürünlere ek maliyet getirecektir. Güney Marmara Bölgesi'nde üretim yapan ihracatçı firmaların, çimento, demir-çelik, kimya gibi sektörlerde hidrojeni kullanarak karbon ayak izini azaltması stratejik önem taşımaktadır [14].
- **Yeni Pazar ve Finansman Fırsatları:** AB fonları (Horizon Europe, vb.) aracılığıyla, bölgesel hidrojen merkezlerinin kurulması ve Ar-Ge projelerinin desteklenmesi mümkündür [15,18].
- **Endüstriyel Dönüşüm:** EGD kapsamında sanayide karbonsuzlaşma teşvik edilirken, Güney Marmara'da da "yeşil üretim" kapasitesi güçlendirilebilir. Bu, ihracatta rekabet avantajı sağlayabilir [16].
- **Entegrasyon ve Mevzuat Uyumu:** EGD, karbon piyasaları, sertifikasyon ve raporlama alanında standartlar getirirken, Türkiye ve Güney Marmara'daki hidrojen projelerinin AB kriterleriyle uyumlu olması, ihracat ve uluslararası iş birliği için kritik olacaktır [14,18].

3.2.2. REPower Eu

Bu alt başlıkta, REPowerEU Planı kapsamında yayımlanan çeşitli resmî belgeler esas alınarak, Avrupa Birliği'nin Rusya menşeli fosil yakıt bağımlılığını hızla azaltmak ve temiz enerjiye geçişi hızlandırmak amacıyla atılan adımlar özetlenmektedir. REPowerEU, Avrupa Komisyonu tarafından Mayıs 2022 tarihinde sunulmuş kapsamlı bir girişimdir ve enerji arz

güvenliğini güçlendirmeyi, enerji maliyetlerini dengelemeyi ve iklim hedeflerine ulaşmayı amaçlamaktadır [20].

Arka Plan ve Amaçlar

- **Enerji Krizine Tepki:** Rusya'nın Ukrayna'ya yönelik saldırısı sonrasında oluşan küresel enerji piyasası çalkantıları ve yüksek fiyatlar, AB içinde enerji arz güvenliği risklerini keskinleştirmiştir. REPowerEU Planı, bu riske karşı Avrupa'nın Rus fosil yakıtlarına bağımlılığını sonlandırmak ve yeşil dönüşümü hızlandırmak için hazırlanmıştır [21].
- **Üç Temel Unsur:** REPowerEU, enerji talebini düşürmeyi (enerji verimliliği ve tasarrufu), enerji kaynaklarını çeşitlendirmeyi ve temiz enerjiyi (yenilenebilir enerji kaynakları, düşük karbonlu alternatifler) artırmayı önceliklendirerek hareket etmektedir [22].
- **Ek Finansman ve Yatırım:** Plan, 2027'ye kadar ek olarak 210 milyar avro yatırım gerektiğini öngörmektedir. Bu tutarın, AB'nin hâlihazırda Rus fosil yakıtlarına yılda yaklaşık 100 milyar avro ödediği dikkate alındığında, uzun vadede daha ekonomik ve sürdürülebilir bir yapı sağlayacağı öngörülmektedir [20].

Temel İlkeler ve Politik Araçlar

- **Enerji Tasarrufu ve Verimlilik Artışı:** REPowerEU, AB'nin gaz tüketimini %15 oranında azaltma hedefi belirlemesini sağlamış ve bu oranın üzerinde (yaklaşık %18) bir düşüş gerçekleşmiştir [21]. Ayrıca binaların enerji verimliliği artırma odaklı yenilenmesi, sanayide verimli teknolojilere geçiş gibi alanlar önemli destek mekanizmalarından faydalanmaktadır [21].
- **Enerji Arzının Çeşitlendirilmesi:** Plan, yeni LNG altyapıları, boru hattı bağlantıları ve güvenilir enerji ortakları (Norveç, ABD, Orta Doğu, Afrika vb.) ile anlaşmalar yoluyla, Rusya'dan gelen fosil yakıt akışını farklı kaynaklara yönlendirmeyi hedeflemektedir [22,23].
- **Temiz Enerji Üretimini Artırılması:** Rüzgâr ve güneş enerjisi kurulumlarının hızlandırılması, yenilenebilir hidrojen ve biyometan üretimini artırılması REPowerEU'nun odağına yer almaktadır. Özellikle elektrolizör kurulu kapasitesinin yükseltilmesi ve sanayinin yeşil yakıtlara geçişini hızlandırılması amaçlanmaktadır [20,24].
- **Altyapı ve Ar-Ge Destekleri:** AB, REPowerEU doğrultusunda Uyum Politikası Fonları ve İyileşme ve Dayanıklılık Mekanizması gibi kaynakları devreye alarak, sınır ötesi enerji altyapısına yatırım yapılmasını, ısı pompaları gibi teknolojilerin üretiminde ölçek büyütülmesini ve ilgili Ar-Ge çalışmalarını desteklemektedir [20].

Hidrojen Boyutu ve İlgili Yaklaşımlar

- **Yenilenebilir Hidrojen Hedefleri:** REPowerEU, 2030'a kadar ilave 15 milyon ton yenilenebilir hidrojen üretimi (ve toplamda 20 milyon ton) öngörerek, fosil yakıt kullanımında hızlı bir azalmayı mümkün kılmayı hedeflemektedir [20].
- **Mevzuat ve Sertifikasyon:** AB, hidrojen piyasasını geliştirmek için karbon içeriği ölçüm standartları, sertifikasyon mekanizmaları ve ticaret platformlarını oluşturmayı hedeflemektedir. Bu sayede AB içinde yeşil hidrojen kullanımını yaygınlaştırılması planlanmaktadır [23].

Uygulama Örnekleri ve İlerlemeler

- **Gaz Talebinin Azaltılması:** AB, 2022-2023 döneminde doğal gaz tüketimini gönüllü belirlenen %15'lik hedefin de ötesine geçerek %18 oranında azaltmış, böylece yaklaşık 125 bcm'lik bir tasarruf sağlamıştır [20,22].
- **Depolama Seviyeleri ve Arz Güvenliği:** Depolama tesislerinin hedeflenen tarihten önce %80 kapasiteye, 2023 yılında ise yaz ortasında %90 seviyesine ulaşması, kış aylarında arz güvenliğini güçlendirmiştir [20].
- **Yenilenebilir Enerji Kurulumları:** Rüzgâr ve güneş enerjisi projeleri hız kazanarak, enerji üretiminde temel konvansiyonel kaynaklardan daha yüksek paya ulaşmıştır. Biyometan üretim kapasitesi ve yenilenebilir hidrojen projeleri de devreye girerek özellikle sanayide dönüşüm hızlandırılmaktadır [24].

Türkiye ve Güney Marmara Bölgesi'ne Yönelik Yansımalar

- **Altyapı ve Yatırım Fırsatları:** REPowerEU Planı çerçevesinde AB üye ülkelerine, yeşil hidrojen üretimi, yenilenebilir enerji yatırımları, LNG altyapısının çeşitlendirilmesi ve biyometan üretimi gibi alanlarda kullanılmak üzere önemli miktarda finansman fonu sağlanmaktadır. Ancak bu fonların doğrudan yararlanıcıları sadece Avrupa Birliği üye ülkeleridir. Türkiye, AB üyesi olmamakla birlikte Katılım Öncesi Yardım Aracı (IPA) kapsamında bazı enerji projelerinde AB fonlarından dolaylı olarak faydalanabilmektedir. REPowerEU fonları ise hâlihazırda IPA kapsamı dışında değerlendirilmektedir. Dolayısıyla, Türkiye'nin bu fonlara doğrudan erişimi bulunmamaktadır. Buna rağmen, REPowerEU kapsamındaki fonların oluşturduğu politika çerçevesi ve finansal öncelikler, AB ile yakın ekonomik ilişkisi olan ülkeler açısından yatırım ve iş birliği fırsatları yaratmaktadır. Özellikle Güney Marmara bölgesinde yer alan kamu kurumları, yerel yönetimler ve özel sektör temsilcileri; AB üyesi proje ortaklarıyla konsorsiyum oluşturarak Horizon Europe, Innovation Fund, veya Clean Hydrogen Partnership gibi diğer AB programları üzerinden yeşil hidrojen üretimi, depolama, taşımacılık ve kullanım projeleri için fonlara erişim sağlayabilmektedir. Sonuç olarak, REPowerEU fonları Türkiye'nin doğrudan başvuru yapabileceği bir finansman kaynağı olmasa da, AB politikalarıyla uyumlu stratejik projeler ve uluslararası ortaklıklar aracılığıyla dolaylı finansman imkânları sunmakta, ayrıca yeşil dönüşüm politikalarının yönünü belirlemede referans bir çerçeve teşkil etmektedir. Bu bağlamda Güney Marmara bölgesinin yeşil hidrojen ve biyometan gibi alanlardaki yatırım planlarının AB hedefleriyle uyumlu hâle getirilmesi, ileride açılacak ikincil finansman kanallarına erişim açısından önem taşımaktadır.
- **Sanayi Dönüşümü:** Özellikle çimento, rafineri ve petrokimya gibi yüksek enerjili sektörler, REPowerEU'nun öngördüğü temiz yakıt ve enerji verimliliği çözümlerini benimseyerek rekabet gücünü koruyabilme potansiyeline sahiptir.
- **Entegrasyon ve Dış Ticaret:** AB'nin enerji altyapısını çeşitlendirme çabası, Türkiye'nin Avrupa enerji piyasalarıyla daha sıkı entegrasyon sağlaması ve Güney Marmara'nın hidrojen merkezi konumunu değerlendirmesi için stratejik fırsatlar sunmaktadır.

3.2.3. Hydrogen Roadmap Europe

Bu alt başlıkta, "Hydrogen Roadmap Europe" raporu temel alınarak, Avrupa genelinde hidrojenin 2050'ye kadar nasıl gelişeceğine dair projeksiyonlar ve öneriler özetlenmektedir. Rapor, Avrupa'da temiz enerji dönüşümünde hidrojenin potansiyelini ve hangi sektörlerde nasıl yaygınlaşacağını kapsamlı şekilde ele almaktadır [25].

Arka Plan ve Amaçlar

- **EU Enerji Dönüşümünde Hedefler:** Avrupa Birliği, Paris Anlaşması doğrultusunda sera gazı emisyonlarını 2050 yılına kadar önemli oranda azaltmayı hedeflemektedir. "Hydrogen Roadmap Europe", hidrojenin bu süreçte yenilenebilir kaynaklarının yaygınlaştırılması, karbondan arındırılması zor sektörlerin dönüştürülmesi ve uzun vadeli enerji depolama yaklaşımlarının geliştirilmesi gibi işlevlerle kilit rol oynayacağını vurgulamaktadır.
- **Kapsam ve Vizyon:** Rapor, ulaşım, sanayi, bina ısıtma, enerji depolama gibi farklı sektörlerde hidrojen kullanımının 2030 ve 2050 yol haritalarını sunmakta; Avrupa'nın bu alanda küresel liderliği yakalaması için atılması gereken adımları ortaya koymaktadır.

Temel İlkeler ve Politik Araçlar

Rapor, AB'nin enerji, çevre ve sanayi politikalarına entegre edilmek üzere birtakım temel ilkeler ve düzenleyici yaklaşımlar önermektedir:

- **Uzun Vadeli Yol Haritaları:** AB düzeyinde, hidrojen temelli teknolojilerin gelişimini hızlandıracak ve yatırımcıya öngörülebilirlik sunacak bir stratejik çerçevenin oluşturulması gerektiği savunulmaktadır.
- **Karbon ve Yenilenebilir Hedefleri:** Hidrojenin düşük/karbon-nötr üretim yollarını (örneğin elektroliz veya karbon yakalama ve depolama teknolojisiyle doğal gaz reformasyonu) teşvik etmek amacıyla emisyon ticaret sistemi düzenlemeleri, karbon fiyat mekanizmaları ve sertifikasyon çerçevelerine ihtiyaç duyulduğu belirtilmektedir.
- **Altyapı ve Standardizasyon:** Hidrojen altyapısının (üretim, taşıma, depolama, dağıtım) geliştirilmesi ve güvenlik, teknik standartlar, sertifikasyon gibi konularda ortak normların oluşturulması bir öncelik olarak ifade edilmektedir.

Hidrojen Boyutu ve İlgili Yaklaşımlar

- **Üretim Teknolojileri:** Rapor, iki ana yol üzerinde durmaktadır:
 - **Elektroliz:** Yenilenebilir kaynaklı elektrikle suyu ayrıştırarak karbon içermeyen hidrojen üretimi.
 - **Doğal Gaz Reformasyonu + karbon yakalama ve depolama:** Doğal gazdan elde edilen hidrojenin karbon yakalama ve depolama (CCS) teknolojisiyle temizlenmesi.
- **Kullanım Alanları:**
 - **Sanayi:** Özellikle rafineriler, amonyak üretimi, çelik endüstrisi gibi yüksek emisyonlu sektörlerde hidrojenin yakıt veya hammadde olarak kullanılmasının karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltabileceği belirtilmektedir.
 - **Ulaşım:** Ağır taşıtlar, otobüsler, trenler, deniz taşıtları gibi batarya teknolojisinin yetersiz kaldığı segmentlerde hidrojenin pratik ve hızlı bir çözüm sunduğu vurgulanmaktadır.
 - **Bina ve Şebeke:** Doğalgaz altyapısına hidrojen karıştırarak veya saf hidrojenle ısıtma, yakıt hücreli kojenerasyon uygulamaları ve enerji depolama gibi seçeneklerin Avrupa'daki bina stokunun karbondan arındırılmasında etkili bir çözüm olacağı ifade edilmektedir.
- **Finansman Mekanizmaları:** Geniş ölçekli hidrojen altyapısı ve Ar-Ge projelerinin desteklenmesinde AB fonları (ör. Horizon 2020/Horizon Europe, Avrupa Yatırım Bankası kredileri vb.) ve ulusal fonların yanı sıra karbon fiyatlandırma araçlarından elde edilen gelirlerin kullanılması önerilmektedir.

Uygulama Örnekleri ve İlerlemeler

- **Pilot Projeler:** Avrupa genelinde belirli bölgelerde, rüzgârdan elektrolize (ör. Almanya, Hollanda, Danimarka) veya CCS'li doğal gaz reformasyonuna dayanan ticari ölçekli projelerin yürütüldüğü belirtilmektedir.
- **Altyapı Dönüşümü:** Bazı Avrupa ülkelerinde doğalgaz hatlarına kademeli olarak hidrojen karıştırılması ve tuz kavitelerinde hidrojen depolanması gibi projeler uygulanmakta olduğu; ayrıca Fransa, Belçika, Hollanda ve Almanya'da hidrojen boru hatlarının zaten faaliyet gösterdiği belirtilmektedir.
- **Yakıt Hücreli Taşıtlar:** Almanya başta olmak üzere birçok ülkede yakıt hücreli otobüs filoları ve hafif/orta ağırlıktaki ticari araç filoları test edilmektedir. Tren hatlarının dizelden hidrojenle çalışan trenlere dönüşümü de pilot ölçekte gündemdedir.

Türkiye ve Güney Marmara Bölgesi'ne Yönelik Yansımalar

- **Stratejik Fırsatlar:** Türkiye'de rafineriler, demir-çelik sektörü ve doğal gaz altyapısı gibi hidrojen kullanımına uygun alanlar bulunmakta; raporun işaret ettiği dönüşüm adımları, özellikle enerji yoğun sanayi ve ulaşım alanlarında Türkiye için fırsatlar sunmaktadır.
- **Bölgesel Uygulamalar:** Güney Marmara Bölgesi'nin rüzgâr ve güneş kaynaklarına sahip olması, farklı endüstriyel tesisleri barındırması sebebiyle hidrojen projeleri için potansiyel barındırdığı değerlendirilmektedir. Mevcut doğal gaz altyapısına düşük oranlı hidrojen karıştırılması veya seçili şehirlerin pilot olarak dönüştürülmesi gündeme gelebilir. Ayrıca liman, kara ve demiryolu ulaşımında hidrojenin ağır araçlarda denenmesi, bölgesel ölçekte emisyonları düşürmeye katkı sağlama potansiyeli içermektedir.

3.3. Ulusal Hidrojen Yol Haritası, Eylem Planı ve İş Modeli Örneklerinin En Güncel Versiyonlarının İncelenmesi, İyi Uygulama Örneklerine Ait Modellerin Analiz Edilmesi

Bu bölümde, hidrojen teknolojileri alanında ulusal ölçekte hazırlanan strateji ve eylem planları incelenmekte; her bir ülkenin yol haritaları, uygulama örnekleri ve iş modeli tasarımları değerlendirilerek başarılı örneklerden çıkarılabilecek dersler ortaya konmaktadır. Bu amaçla, ilk olarak 3.3.1'de ülke bazlı analizler yapılacak ve ardından 3.3.2'de mukayeseli analizlerle genel sonuçlara ulaşılabilecektir.

3.3.1. Ülke Bazlı Modeller

Bu alt bölümde, hidrojen yol haritaları, eylem planları ve uygulama örnekleri ülke bazlı olarak incelenmiş; her ülkenin stratejik yaklaşımları, öncelikli sektörleri, finansman mekanizmaları ve mevzuat alt yapısı özetlenmiştir.

Türkiye

Strateji Belgeleri ve Genel Hedefler

Türkiye'nin hidrojen alanındaki stratejik yaklaşımı, **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından 2023 yılında yayımlanan "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası"** belgesinde kapsamlı biçimde ortaya konmuştur. Söz konusu belgede, üretimden depolamaya, taşımadan nihai kullanıma kadar hidrojenin tüm değer zincirine yönelik politika ve hedefler tanımlanmıştır. Bu yol haritasına göre, Türkiye'nin 2030 yılına kadar en az 2 GW elektrolizör kapasitesine ulaşması, 2035'te bu kapasitenin 5 GW'a çıkarılması hedeflenmektedir. Ayrıca, yeşil hidrojenin kilogram başına üretim maliyetini 2035 yılında 2,4 dolar 2053'e kadar 1,2 ABD dolarının altına düşürülmesi hedeflenmektedir.

Bununla birlikte, “**Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası Raporu**” [26] da özel sektör ve sivil toplum bakış açısıyla önemli bir tamamlayıcı belge niteliği taşımaktadır. Rapor, üretim, depolama, dağıtım ve kullanım teknolojilerinin geliştirilmesine dair öneriler sunulmakta; Türkiye'nin hidrojen ekosisteminin gelişimi için yol gösterici unsurlar ele alınmaktadır. Ayrıca, “**Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı**” [27] çerçevesinde, karbon emisyonlarının azaltılması ve Avrupa Birliği Yeşil Mutabakatı'na uyum sağlanması süreçlerinde hidrojenin önemi vurgulanmaktadır.

Kısa vadede, doğal gaz şebekesine belirli oranlarda hidrojen karıştırılmasına yönelik pilot projeler ile yenilenebilir enerji kaynaklarından yeşil hidrojen üretimine dair uygulamalar ön plandadır. Uzun vadede ise, özellikle ağır sanayi ve ulaştırma sektörlerinde hidrojenin yaygın kullanımı hedeflenmektedir. Böylece Türkiye, hem iç talebi karşılayacak hem de ihracat potansiyeli oluşturacak kapsamlı bir hidrojen ekonomisinin inşasını amaçlamaktadır.

Öncelikli Sektörler

- **Ağır Sanayi:** Demir-çelik, çimento, rafineri, kimya gibi yoğun enerjili sektörlerde hidrojenin kullanılması [26].
- **Ulaşım:** Yakıt hücreli otobüsler, kamyonlar ve tren gibi uygulamalarda pilot çalışmalar; demiryolu ve deniz taşımacılığında ilerleyen dönem için potansiyel değerlendirmesi.
- **Isıtma ve Doğal Gaz Şebekesi:** Konut ve ticari binalarda doğal gaz-hidrojen karışımıyla ilk aşamada emisyon azaltımı hedefi.

Finansman ve Teşvik Mekanizmaları

TÜBİTAK ve KOSGEB gibi kurumlarca sağlanan AR-GE ve inovasyon destekleri, özel sektör-üniversite iş birliği ve uluslararası kuruluşlar (Dünya Bankası, EBRD vb.) kaynaklı yeşil finansman modelleri değerlendirilmektedir [27].

Mevzuat ve Kurumsal Yapı

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ticaret Bakanlığı gibi kurumlar ile sivil toplum kuruluşları, akademi ve özel sektör koordinasyonunda, hidrojen standartları ve sertifikasyon süreçlerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Almanya

Strateji Belgesi ve Temel Hedefler

Almanya, 2030'da 5 GW, 2040'ta 10 GW üzeri elektroliz kapasitesi hedeflemiştir. Ayrıca sektörel dönüşüm için “Hydrogen Action Plan Germany” [28] ile uygulama adımları güncellenirken, “National Hydrogen Strategy” [29] belgesinde hidrojenin enerji dönüşümündeki kritik rolünü vurgulanmıştır.

Öncelikli Sektörler

- **Sanayi (Çelik ve Kimya):** Karbonsuz çelik üretimi amacıyla kömürün yerini hidrojenin alması hedeflenmektedir.
- **Ulaşım ve Lojistik:** Ağır yük taşımacılığı, demiryolu (hidrojen trenleri), liman ve havalimanı lojistiğinde hidrojen temelli çözümler değerlendirilmektedir.
- **Enerji Depolama:** Elektrik üretiminde mevsimsel depolama için hidrojenin kullanımı amaçlanmaktadır.

Finansman ve Teşvik Mekanizmaları

Almanya, hidrojen projeleri için 9 milyar avro (7 milyar ulusal, 2 milyar uluslararası) bütçe ayırmıştır [29]. AB'nin IPCEI (Important Project of Common European Interest) çerçevesinde de ek finansman sağlanabilmektedir.

Mevzuat ve Kurumsal Yapı

Federal Ekonomi ve İklim Koruma Bakanlığı (BMWK) liderliğinde, Ulusal Hidrojen Konseyi gibi danışma kurullarıyla koordinasyon sağlanmakta; AB regülasyonları (RED II vb.) çerçevesinde mevzuat düzenlemeleri yürütülmektedir [28].

Birleşik Krallık

Strateji Belgeleri ve Hedefler

“UK Hydrogen Strategy” [30] ile başlayan politika çerçevesi, 2024’te yayımlanan “Hydrogen Strategy Update to the Market” [31] ile güncellenmiştir. İlk etapta 5 GW olarak konan 2030 hedefi, güncel politikalarla 10 GW düzeyine çıkarılmıştır.

Öncelikli Sektörler

- **Sanayi:** Humber ve Teesside bölgelerinde mavi ve yeşil hidrojen kullanılarak sanayi dönüşümü hedeflenmektedir.
- **Ulaşım:** Yakıt hücreli kamyon, otobüs ve trenlerde pilot uygulamalar (HydroFLEX projesi) ile öncü örnekler ortaya konulmaktadır.
- **Isıtma:** Konutlarda doğal gaz yerine kısmi hidrojen karışımı (HyDeploy, H100 Fife gibi pilot uygulamalar) denenmektedir.

Finansman ve Teşvik Mekanizmaları

Birleşik Krallık, “Hydrogen Business Model” ve Net Zero Hydrogen Fund gibi mekanizmalarla özel sektör projelerini desteklemektedir [30]. Karbon Yakalama (CCS) altyapısına da hükümet tarafından ciddi kaynak aktarılmaktadır.

Mevzuat ve Kurumsal Yapı

BEIS (İşletme, Enerji ve Sanayi Stratejisi Bakanlığı) liderliğinde, Ofgem gibi düzenleyici kurumlarla birlikte mevzuat ve sertifikasyon çerçevesi oluşturulmaktadır [31].

Hollanda

Strateji Belgesi ve Hedefler

“Hydrogen Roadmap Netherlands” [32] kapsamında 2030’da 3-4 GW elektroliz kapasitesi hedeflendiği, uzun vadede Avrupa içindeki hidrojen ticaretinde merkez olma stratejisi güdülmekte olduğu belirtilmektedir.

Öncelikli Sektörler

- **Liman ve Lojistik:** Özellikle Rotterdam Limanı üzerinden hidrojen ithalat-ihracat akışları.
- **Sanayi ve Rafineri:** Kimya sektöründe yeşil veya mavi hidrojen kullanımı.
- **Offshore Rüzgar Entegrasyonu:** Rüzgâr enerjisiyle yeşil hidrojen üretim projeleri.

Finansman ve Teşvik Mekanizmaları

SDE++ (Sürdürülebilir Enerji Üretimi Teşviki) kapsamında hidrojen projeleri desteklenmekte, ayrıca AB fonları ve özel sektör yatırımları kullanılmaktadır [32].

Mevzuat ve Kurumsal Yapı

Hollanda Ekonomi ve İklim Bakanlığı liderliğinde, “Guarantees of Origin” üzerinden üretilen hidrojenin karbon ayak izini doğrulayan sertifikasyon mekanizmaları geliştirilmektedir.

Japonya

Strateji Belgeleri ve Hedefler

“The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells - Japan” [33] kapsamında 2030’da hidrojen maliyetinin 30 yen (~0,2 USD)/Nm³ düzeyine çekilmesi ve 2050’de daha da rekabetçi kılınmasının mümkün olduğu öngörülmektedir.

Öncelikli Sektörler

- **Yakıt Hücreli Araçlar:** Toyota, Honda gibi markalarla Japonya bu alanda küresel liderliğe oynamayı hedeflemektedir.
- **Evsel Yakıt Hücreleri (Ene-Farm):** Konutlarda elektrik ve ısı ihtiyacının karşılanması amaçlanmaktadır.
- **Büyük Ölçekli Güç Üretimi:** İthal hidrojenle çalışan pilot santrallerde test aşamasındadır.

Finansman ve Teşvik Mekanizmaları

NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization) aracılığıyla Ar-Ge faaliyetleri ve pilot projeler desteklenmektedir [33].

Mevzuat ve Kurumsal Yapı

METI (Japonya Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı) koordinasyonunda, Avustralya ve Brunei gibi ülkelerden hidrojen ithalat projeleri yürütülmektedir. Hidrojen tedariki ve güvenlik standartları sıkı şekilde mevzuata entegre edilmiştir.

ABD

Strateji Belgesi ve Hedefler

ABD, yakın dönemde "U.S. National Clean Hydrogen Strategy & Roadmap" [34] belgesini yayımlamış, 2030'da 10 milyon ton, 2050'de 50 milyon ton üretim hedefi belirlemiştir.

Öncelikli Sektörler

- **Sanayi:** Demir-çelik, rafineri, kimya.
- **Ulaşım:** Uzun mesafe kamyonlar, demiryolu, gemi, havacılık vb. ağır taşıt segmentlerinde yakıt hücreli ulaşım çözümleri.
- **Elektrik ve Depolama:** Mevsimsel büyük ölçekli enerji depolaması; gaz türbinlerini hidrojenle çalıştırma planları.

Finansman ve Teşvik Mekanizmaları

- **Bipartisan Infrastructure Law (BIL):** 8 milyar \$'lık hidrojen merkezleri fonu.
- **Inflation Reduction Act (IRA):** Üretim vergi kredisi (PTC) gibi teşvikler.
- **Energy Bakanlığı (Department of Energy - DOE)** tarafından araştırma ve demonstrasyon projelerine ek hibeler [34].

Mevzuat ve Kurumsal Yapı

Enerji Bakanlığı (Department of Energy - DOE), Çevre Koruma Ajansı (Environmental Protection Agency – EPA), Ulaştırma Bakanlığı (Department of Transportation – DOT) vb. kurumlar arası koordinasyonla federal düzeyde Temiz Hidrojen Üretim Standardı (Clean Hydrogen Production Standard) geliştirilmektedir. Eyalet bazında ek destek programları da bulunmaktadır.

Kanada

Strateji Belgesi ve Hedefler

"Hydrogen Strategy for Canada" [35] 2020'de yayımlanmış olup, 2030'a kadar 5 milyon ton/yıl hidrojen üretimi ve 2050'de net sıfır hedefi doğrultusunda hidrojenin nihai enerji tüketimindeki payını %30 seviyesine taşıma vizyonu konmuştur.

Öncelikli Sektörler

- **Ulaşım:** Uzun mesafe kamyonlar, otobüsler, trenler.
- **Sanayi ve Isıtma:** Petrokimya tesisleri, bina ısıtmada kısmi hidrojen uygulamaları.
- **İhracat:** Japonya, Güney Kore ve Avrupa pazarına yeşil/mavi hidrojen veya türevlerin satışı.

Finansman ve Teşvik Mekanizmaları

Federal düzeyde NRCan (Natural Resources Canada) ve eyalet yönetimleri (Alberta, Ontario vb.) tarafından destek programları. Clean Fuel Standard ve karbon fiyatlamasıyla hidrojenin ekonomik açıdan rekabetçi hâle gelmesi hedeflenmektedir [35].

Mevzuat ve Kurumsal Yapı

NRCan koordinasyonunda, bölgesel hidrojen hub'ları oluşturma çalışmaları hız kazanmıştır. Ulusal ölçekte "Düşük Karbonlu Yakıt Standardı (Low Carbon Fuel Standard)" ve sertifikasyon düzenlemeleri geliştirilmektedir.

3.3.2. Mukayeseli Analiz ve Genel Değerlendirme

Bu alt bölümde, **ülkelerin hidrojen yol haritaları** ve eylem planlarına ilişkin önceki başlıkta (3.3.1) sunulan bilgilerin ışığında, **karşılaştırmalı bir tablo** aracılığıyla (Tablo 1) özet bir değerlendirme yapılacak ve sonrasında ortak noktalar, farklılıklar ve genel eğilimler üzerinde durulacaktır.

Tablo 1. Ülke Bazlı Uygulamaların Mukayeseli Analizi

Ülke/Strateji	Ana Hedef ve Amaçlar	Hidrojen Üretim Yöntemleri ve Öncü Teknolojiler	Öncelikli Sektörler ve Kullanım Alanları	Zaman Çizelgesi ve Miktar Hedefleri	Finansman / Teşvik Mekanizmaları	Kurumsal / Mevzuat Yapısı
Türkiye	-2030'a kadar hidrojen ekosistemini geliştirmek -Elektrolizör kurulu güç kapasitesininin 2030 yılında 2 GW, 2035 yılında 5 GW ve 2053 yılında 70 GW'a ulaşmasını sağlamak- Yeşil hidrojen kilogram başına üretim maliyetini 2035 yılında 2,4 dolar 2053'e kadar 1,2 ABD doların altına düşürmek -Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretim kapasitesini artırmak -AB Yeşil Mutabakatı'na uyumu sağlamak	-Yenilenebilir enerjiden elektroliz -Atıksu ve biyokütleden hidrojen üretimi -Pilot düzeyde CCS ve mavi hidrojen	- Kimya, rafineri, demir-çelik, çimento -Ulaşım (otobüs, tren vb.) -Isıtma (doğal gaz-hidrojen karışımı)	- 2030'a kadar %20 doğal gaz karışımı pilot uygulaması -2030 sonrasında daha geniş çaplı yayılım	- TÜBİTAK, KOSGEB AR-GE destekleri -Özel sektör-üniversite iş birlikleri -Yeşil finansman arayışları (Dünya Bankası, AB, EBRD vb.)	- Enerji, Sanayi ve Ticaret Bakanlıkları -Sivil Toplum Kuruluşları (Hidrojen Teknolojileri Derneği, vb.) -Yeşil Mutabakat Eylem Planı mevzuat uyumu
Almanya	-2030'da 5 GW, 2040'ta 10 GW üstü kapasiteye ulaşmak -Endüstriyel dönüşümü hızlandırmak -Avrupa hidrojen liderliği	- Yeşil hidrojen (elektroliz) -Mavi hidrojen (doğal gaz + CCS) geçiş dönemi	- Ağır sanayi (çelik, kimya) -Ulaşım (yük taşımacılığı, demiryolu) -Enerji depolama	- 2030'da 5 GW elektroliz -2040'ta 10 GW üzeri	-9 milyar avro (7 ulusal, 2 uluslararası) -IPCEI projeleriyle AB fonları	- Federal Ekonomi ve İklim Koruma Bakanlığı -Ulusal Hidrojen Konseyi -AB regülasyonları (RED II, ETS) uyumu
Birleşik Krallık	- 2030'da 10 GW üretim kapasitesi (ilk hedef 5 GW) -Net sıfır 2050 hedefine katkı	- Mavi (doğal gaz + CCS) ve yeşil hidrojen (elektroliz) -Teknoloji tarafsızlık yaklaşımı	- Sanayi (çelik, kimya, rafineri) -Ulaşım (ağır vasıtalar, tren) -Konut ısıtma (karışım pilotları)	-2024-2025: İlk büyük projeler -2030: 10 GW üretim kapasitesi	- Hydrogen Business Model -Net Zero Hydrogen Fund (240 milyon £) -CCS altyapı destekleri	- BEIS (şimdiki adı: Enerji Güvenliği Bakanlığı) liderliği -Ofgem vb. düzenleyiciler -Hidrojen sertifikasyon taslağı

Hollanda	-2030'da 3-4 GW elektroliz -Avrupa hidrojen ticaret merkezi olmak	- Offshore rüzgâr + elektroliz -Mavi hidrojen (doğalgaz + CCS) geçiş dönemi	- Liman ve lojistik (Rotterdam) -Sanayi ve rafineriler -Offshore yenilenebilir entegrasyonu	- 2030: 3-4 GW -2040+: AB içi hidrojen ticareti liderliği	- SDE++ destek mekanizması -AB fonları ve özel sektör ortaklıkları	- Ekonomi ve İklim Bakanlığı -Guarantees of Origin -Yoğun kamu-özel iş birliği
Japonya	-2030'da hidrojen maliyetini 30 yen/Nm ³ 'e düşürmek -2050'de daha da rekabetçi seviyeye inmek	- Mavi hidrojen ithalatı (Avustralya, Brunei) -Gelişmiş elektroliz teknolojileri (yeşil hidrojen)	- Yakıt hücreli araçlar -Evsel yakıt hücreleri (Ene-Farm) -Büyük ölçekli güç üretimi (pilot)	- 2030: 30 yen/Nm ³ 2050: 20 yen/Nm ³ hedefi	- NEDO aracılığıyla AR-GE destekleri -Araç ve ekipman alım teşvikleri	- METI liderliğinde ithal hidrojen projeleri -Güvenlik ve standardizasyon ile sıkı takip
ABD	-2030'da 10 MMT, 2050'de 50 MMT temiz hidrojen -Net sıfır 2050 hedefleriyle uyumlu	- Elektroliz (yeşil) -Mavi (fosil + CCS) -Nükleer tabanlı "turkuaz" modelleri	-Sanayi (çelik, rafineri, kimya) -Ulaşım (uzun yol kamyon, tren, gemi) -Elektrik üretimi ve depolama	-2025: İlk hub'lar -2030: 10 MMT -2050: 50 MMT	-Bipartisan Infrastructure Law (8 milyar \$ Hydrogen Hub) -Inflation Reduction Act (üretim vergi kredisi)	-DOE liderliğinde EPA, DOT vb. -Clean Hydrogen Production Standard -Eyalet bazında ek teşvikler
Kanada	-2030'a kadar 5 milyon ton/yıl üretim -2050 net sıfır için hidrojenin %30 final enerji payı	-Yeşil hidrojen (elektroliz) -Mavi hidrojen (doğal gaz + CCS)	-Ulaşım (ağır vasıta, tren) -Sanayi, ısıtma ve ihracat	-2025: İlk büyük projelerin devreye girmesi -2030: 5 milyon ton/yıl üretim	-Federal + eyalet destekleri (NRCan) -Karbon vergisi, Clean Fuel Standard	-Natural Resources Canada koordinasyonu -Bölgesel hidrojen merkezleri -Ulusal standart ve sertifikasyon

Tablo 1. 7 farklı ülkenin (Türkiye, Almanya, Birleşik Krallık, Hollanda, Japonya, ABD ve Kanada) hidrojen stratejilerini karşılaştırmalı bir bakışla özetlemektedir. Aşağıda, ortak eğilimler, ayrıışan yönler ve genel gözlemler sıralanmıştır:

Ortak Eğilimler

- **Hidrojen Üretiminde Çift Yol (Yeşil & Mavi):** Tüm ülkeler, kısa-orta vadede mavi hidrojen (fosil + CCS) seçeneğini değerlendirirken, uzun vadede yeşil (yenilenebilir) kaynağa geçme hedefindedir.
- **Sanayi ve Ağır Ulaşım Odaklılık:** Çelik, rafineri, kimya gibi karbondan arındırılması zor sektörler ve uzun mesafe/yük taşımacılığı ilk hedef alanları olarak öne çıkmaktadır.
- **Büyük Ölçekli Kamu Teşvikleri:** Geniş çaplı fonlar, vergi teşvikleri (ör. ABD'de IRA-PTC, AB'de IPCEI) ve kamu-özel sektör iş birliği modelleri yaygındır.
- **Altyapı ve Mevzuat Reformu:** Boru hatlarının hidrojenle uyumu, depolama kapasitesi, sertifikasyon ve karbon izleme (GHG hesaplama) kritik önem taşımaktadır.

Ayrıışan Yöner

- **Hedef Büyüklükleri ve Zamanlaması:** Ülkelerin teknolojik kapasiteleri, enerji altyapıları ve politik öncelikleri farklıdır. Örneğın ABD ve Kanada geniş coğrafyaları ve fosil rezervleriyle mavi hidrojen potansiyeline, Hollanda ise lojistik avantajıyla AB ticaretinde öncü olmaya odaklanmaktadır.
- **Teknoloji Vurgusu:** Japonya, yakıt hücrelerine ve evsel uygulamalara (Ene-Farm) yoğunlaşırken; Almanya ve Birleşik Krallık, sanayide karbonsuzlaşma ve CCS ile entegrasyon üzerinde daha çok durmaktadır.
- **Kaynak ve İthalat/İhracat Stratejileri:** Almanya ve Japonya gibi ülkeler, hidrojen ithalatına yönelik anlaşmalar peşinde iken; Kanada ve ABD kendi iç tüketimlerinin yanı sıra ihracatı da değerlendirmektedir.

Türkiye Perspektifi

- **Yenilenebilir Potansiyel:** Türkiye, güneş ve rüzgâr tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarını hidrojen üretiminde kullanarak hem enerji ithalatını azaltabilecek, hem de AB pazarına “yeşil” kimlikli ürünler sunabilecektir.
- **Ar-Ge ve Pilot Projeler:** Doğal gaz şebekesine kısmi karışım projeleri ve ulaşım sektörü denemeleri önem taşımaktadır. Almanya, Hollanda gibi ülkelerdeki pilot projelerden alınacak dersler, Türkiye için yol gösterici olabilir.
- **Mevzuat ve Yeşil Mutabakat:** AB ile entegre ticaret yapısı göz önüne alındığında, karbon ayak izi sertifikasyonu, temiz enerji kaynaklı üretim ve sınırda karbon düzenlemeleri konusunda ilerleme gerekli olacaktır.

Geleceğre Yönelik Beklentiler

- **Maliyet Düşüşü:** Elektrolizör teknolojilerindeki gelişmeler, ölçek ekonomileri ve karbon yakalama teknolojilerinin olgunlaşmasıyla birlikte hidrojenin birincil enerji kaynağı olarak yaygınlaşması hızlanacaktır.
- **Yeni İş Modelleri ve Pazar Mekanizmaları:** Örneğın, Birleşik Krallık Hidrojen İş Modeli, ABD'nin Üretim Vergi Kredisi (PTC) gibi yaklaşımları küresel ölçekte benzer uygulamalara ilham verebilir.
- **Uluslararası Rekabet ve İş Birliğı:** Hidrojen ticaretinde üretim maliyeti düşük bölgeler ihracatçı olurken, büyük tüketici bölgeler ithalata yönelecektir. Bu da yeni jeopolitik dinamikler yaratma potansiyeline sahiptir.

Genel olarak, ülke örnekleri hidrojenin enerji dönüşümündeki merkezî rolünü teyit etmekte, ülkemiz gibi güçlü yenilenebilir potansiyeline sahip ülkelerin de uluslararası iyi uygulama ve finansman fırsatlarından yararlanarak kendi stratejilerini başarıyla uygulayabileceğini göstermektedir.

3.4. Temiz Hidrojen Alanında Geliştirilen/Uygulanan Mevzuat ve Standardizasyon Çerçevesinin Değerlendirilmesi

Temiz (düşük/sıfır emisyonlu) hidrojenin küresel ölçekte hızlı bir şekilde benimsenmesi, enerji sistemlerinin karbondan arındırılması için kritik bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Bu bağlamda farklı ülkeler ve bölgelerde, hidrojenin üretimi, sertifikasyonu, teşviki, altyapısı ve kullanımıyla ilgili mevzuat ve standartlar oluşturulmaktadır. Aşağıda Avrupa Birliğı (AB), Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ve diğere bölgelerdeki gelişmeler ile uluslararası standardizasyon çerçevesi özetlenmekte ve ardından kısa bir genel değerlendirme sunulmaktadır.

3.4.1. Avrupa Birliğı (AB)

a) Yetki Tüzükleri ve Yenilenebilir Hidrojen Tanımları

Avrupa Komisyonu, hidrojenin “yenilenebilir” sayılabilmesi ve yaşam döngüsü sera gazı (GHG) emisyonlarının hesaplanması konusunda iki önemli yetki tüzüğü (delegated regulation) hazırlamaktadır [36]. Bu tüzükler, elektrolizde kullanılan elektrik kaynağının gerçekten

yenilenebilir olduğunun kanıtlanmasını zorunlu kılmaktadır. Ayrıca sera gazı emisyonlarının hesaplanmasında üretim, taşıma ve dönüştürme aşamalarının ayrıntılı şekilde izlenmesi gerekmektedir [37-39].

b) REPowerEU ve 10+10 Milyon Ton Hedefi

AB, REPowerEU planı doğrultusunda 2030 itibarıyla 10 milyon ton yerli üretim yenilenebilir hidrojen ve 10 milyon ton ithalat hedefi belirlemektedir [36]. Bu sayede endüstri ve ulaşım gibi karbon azaltımının daha zor olduğu sektörlerde hidrojen talebinin artırılması öngörülmektedir. Bu hedefle üye devletlerde hidrojen projelerine yönelik ek finansal ve idari kolaylıklar sağlanmakta; Avrupa Hidrojen Bankası gibi mekanizmalarla piyasa açığı giderilmeye çalışılmaktadır [36,40].

c) Hidrojen ve Dekarbonize Gaz Piyasaları Paketi

AB'nin "Hydrogen and Decarbonised Gas Market Package" olarak bilinen mevzuatı, doğal gaz altyapısının hidrojenle uyumlu hâle getirilmesi, boru hatlarının tarifelendirilmesi ve üçüncü taraf erişimi gibi konuları ele almaktadır [41]. Böylelikle hidrojen ağlarının işletimi, gaz/hidrojen karışımları ve piyasaların entegrasyonu ortak bir hukuki çerçevede tanımlanmaktadır.

d) Standardizasyon ve Sertifikasyon Çalışmaları

- **CertifHy:** Yenilenebilir veya düşük karbonlu hidrojen için "Guarantee of Origin" sistemini AB genelinde standart hâle getirmektedir [42].
- **ECH2A Roadmap on Hydrogen Standardisation:** Avrupa Temiz Hidrojen İttifakı (ECH2A) tarafından yayımlanan bu yol haritası, üretim, dağıtım, endüstriyel kullanım ve mobilite gibi başlıklarda standartların ve mevzuatın güncellenmesi gereken noktaları işaret etmektedir [43].
- **Ulusal Düzeyde Örnekler:** Örneğin Norveç, CCS destekli mavi hidrojen ve yenilenebilir kaynaklı yeşil hidrojen projelerini mevzuat ve teşviklerle desteklemektedir [44].

3.4.2. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)

a) 45V Clean Hydrogen Production Tax Credit

ABD, "Inflation Reduction Act" kapsamında "45V" olarak anılan Temiz Hidrojen Üretim Vergi Kredisi sistemini oluşturmuştur. Ocak 2025'te yayımlanan nihai kurallara göre, yaşam döngüsü emisyonu 4 kgCO₂-eşdeğeri/kg hidrojenin altında olan projeler kademeli teşviklerden yararlanabilmektedir [45]. Bu sistem; "yeşil hidrojen" (yenilenebilir elektrik üretimi), "mavi hidrojen" (doğal gaz+CCS) ve diğer düşük karbonlu yöntemleri kapsamakta; karbon yoğunluğuna göre vergi kredisi oranı değişmektedir.

b) Clean Hydrogen Production Standard (CHPS)

ABD Enerji Bakanlığı (DOE), "Clean Hydrogen Production Standard Guidance" adıyla üreticilerin hangi koşullarda düşük emisyonlu hidrojen sayılacağına dair yaklaşımı yayımlamıştır [46]. Burada "doğrudan" ve "dolaylı" emisyonların hesaba katılması, üretimde kullanılan elektriğin saatlik bazda yenilenebilir kaynakla eşleştirilmesi (hourly matching) gibi kurallar öngörülmektedir. Söz konusu rehber, 45V vergi kredisine hak kazanma sürecinde kritik bir referans niteliğindedir [45,46].

c) Diğer Federal ve Eyalet Düzenlemeleri

- **Regulatory Framework for Hydrogen in the U.S. – Clean Air Task Force:** Bu raporda, ABD'deki hidrojen tedarik zinciri, izinler ve kurumlar arası iş birliği detaylandırılmaktadır [47].
- **Hydrogen Hubs Program:** DOE, Hidrojen Merkezleri üzerinden bölgesel üretim ve tüketim ekosistemlerini desteklemekte; eyalet düzeyinde kamu-özel yatırımlar teşvik edilmektedir [46].
- **Kod ve Standartlar:** NFPA 2, ASME, SAE J2601 vb. ulusal kodlar, hidrojenin güvenli kullanımı ve taşınmasına ilişkin teknik hükümler içermektedir [48].

3.4.3. Diğer Bölgeler ve Uluslararası Standartlar

a) Kanada

Kanada, üretimden nihai kullanıma kadar farklı aşamalardaki mevzuat boşluklarını ve önceliklerini belirlemiştir [49]. Aynı zamanda “Temiz Hidrojen Yatırımları Vergi Kredisi (Clean Hydrogen Investment Tax Credit)” ile hidrojen projelerini teşvik etmektedir. Kod ve standartlarda (ör. boru hatları, tanklar, yakıt kalitesi) hızla güncellemeler yapılmakta olup, federal düzeyde ortak bir çerçeveye oluşturulmaktadır.

b) Avustralya

Avustralya’da hidrojen projelerinin lisanslandırma, çevre izni, iş güvenliği gibi alanlarda hangi federal yasaların geçerli olduğu [49] dokümanında detaylı biçimde açıklanmaktadır. Ek olarak, yeşil hidrojenin ihracatı ve yerel kullanımına yönelik yeni teşvik paketleri tartışılmaktadır.

c) Asya Ülkeleri

- **Japonya:** Hidrojen ekonomisine yönelik faaliyetler çerçevesinde; enerji ithalatında amonyağın rolü, hidrojenle çalışan gemiler ve yakıt hücreli araçlar için mevzuat düzenlemeleri yapılmaktadır [41].
- **Güney Kore:** Üreticilerin sera gazı emisyonlarını raporlamaları ve düşük karbonlu hidrojen için sertifika almaları hedeflenmektedir [48].
- **Hindistan:** Ulusal ölçekte “Yeşil Hidrojen Misyonu (Green Hydrogen Mission)” kapsamında ağır sanayi (çelik, rafineri vb.) ve ulaşımda hidrojenin kullanımı teşvik edilirken, “Ulusal Yeşil Hidrojen Standardı (National Green Hydrogen Standard)” taslağı doğrultusunda mevzuat hazırlanmaktadır [44,50].

d) Uluslararası Standardizasyon: ISO ve GH2

- **ISO/TS 19870:2023:** Bu teknik spesifikasyon, hidrojenin üretimi, koşullandırılması ve taşınmasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının ölçüm metodolojisini ortaya koymaktadır [51]. Bu sayede farklı sertifikasyon şemalarının karşılıklı tanınırlığına zemin hazırlanmaktadır.
- **GH2 Standard 2.0:** Bu standart kapsamında, tamamen yenilenebilir kaynaklı hidrojenin çevresel ve sosyal standartlarını tanımlamaktadır [52]. Ayrıca bu kapsamda, su kullanımı, biyoçeşitlilik ve yerel topluluklarla etkileşim gibi alanlara dair detaylı ilkeler öngörmektedir.

e) Küresel Analiz ve Bilgi Paylaşımı

- **Global Hydrogen Review 2024:** Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) tarafından yayımlanan rapor, küresel hidrojen projeleri ve politikalarına kapsamlı bakış sunmakta; sera gazı eşiği, sertifikasyon ve yasal düzenlemeler konularındaki eğilimleri incelemektedir [53].
- **Regulations, Codes & Standards (RCS) - Hydrogen Knowledge Centre:** Bu platform, hidrojenle ilgili mevzuat ve standartların güncel bir envanterini tutarak sektör paydaşlarına rehber niteliği taşıyan bilgiler aktarmaktadır [48].

3.4.4. Özet Değerlendirme

- **Küresel Yönelimler:** Temiz hidrojenin gelişimi için mevzuat ve standartların hızla oluşturulduğu görülmektedir. AB, ABD, Kanada, Avustralya ve Asya ülkeleri gibi dünyanın farklı bölgelerinde, hem yerel hem de uluslararası sertifikasyon/teşvik mekanizmaları üzerine yoğunlaşılmaktadır.
- **Emisyon Eşiği:** ABD’de 4 kgCO₂-eşdeğeri/kg H₂ sınırı (45V) ve AB’de belirlenen koşullar, üretimde gerçek düşük karbon salınımı sağlamayı amaçlamaktadır.

- **Sertifikasyon ve Standardizasyon:** ISO/TS 19870:2023 gibi uluslararası dokümanlar, GH2 Standard 2.0 gibi gönüllü inisiyatifler ve AB'nin CertifHy programı, yaşam döngüsü emisyonu hesaplama ve güvenlik boyutunu ortak çerçevelere kavuşturmaktadır.
- **Teşvik ve Yatırım Çerçevesi:** ABD'nin vergi kredisi (45V), AB'nin hydrogen bank/ihale sistemleri ve Kanada gibi ülkelerin yatırım kredileri, büyük ölçekli projeleri teşvik etmektedir.
- **Altyapı ve Sektörel Uygulamalar:** Hem boru hattı hem kara/deniz ulaşımı gibi konularda ayrıntılı teknik standartlar (ASME, SAE, NFPA, CEN vb.) geliştirilmektedir. Giderek daha fazla ülkede hidrojenin endüstri (çelik, kimya), ulaşım (ağır vasıta, denizcilik) ve ısıtma uygulamalarına dair mevzuatlar hazırlanmaktadır.

3.5. Yeşil Yakıtlarda Uluslararası Teşvik Uygulamalarının Analiz Edilmesi

Dünya genelinde karbon emisyonlarını hızla azaltma gerekliliği, enerji sektörünün tüm bileşenlerinde yenilikçi ve sürdürülebilir çözümlerin önünü açmaktadır. Özellikle yeşil hidrojen gibi düşük karbonlu veya karbon-nötr yakıtlar bu dönüşümün merkezinde konumlanmakta olup, maliyet-fayda dengesinin iyileşmesi için uluslararası düzeyde çok sayıda teşvik ve destek mekanizması uygulanmaktadır. Bu destekler, gerek devletler gerekse özel sektör nezdinde yatırım risklerini düşürmek, teknolojik gelişmeyi hızlandırmak, altyapı projelerini desteklemek ve kapsamlı bir ekosistem oluşturmak amacını taşımaktadır. Aşağıdaki alt başlıklarda, yeşil yakıtlara yönelik uluslararası teşvik mekanizmalarının (Hydrogen Bank, Carbon Contract for Difference, IRA vb.) temel özellikleri, işleyiş biçimleri ve hidrojen sektörünün gelişimine katkıları analiz edilmektedir.

3.5.1. European Hydrogen Bank

Bu alt başlıkta, Avrupa Komisyonu tarafından yeşil hidrojenin teşvikine yönelik olarak geliştirilen ve özellikle REPowerEU Planı ile European Green Deal kapsamında önemi vurgulanan European Hydrogen Bank (Avrupa Hidrojen Bankası) inisiyatifi ele alınmaktadır. European Hydrogen Bank kavramı, yenilenebilir (yeşil) hidrojenin AB genelinde ve uluslararası pazarlarda ölçeklenmesini hızlandırmak üzere geliştirilen yenilikçi bir finansman yaklaşımı olup, yatırımcılar ile son kullanıcılar arasındaki maliyet açığını kapatarak piyasanın gelişmesine katkı sunmayı hedeflemektedir [54,55].

Arka Plan ve Amaçlar

Avrupa Komisyonu, 2030'a kadar AB içinde 10 milyon ton ve AB dışından 10 milyon ton yenilenebilir hidrojen tedarik edilmesini amaçlayan REPowerEU hedefleri doğrultusunda, yeşil hidrojen piyasasında mevcut fiyat ve yatırım belirsizliklerini azaltmak için Hydrogen Bank inisiyatifini duyurmuştur [55,56]. Bu yaklaşım, Emisyon Ticareti Sistemi (ETS) gelirlerinden beslenen İnovasyon Fonu gibi araçlar aracılığıyla yenilenebilir hidrojen projelerini desteklemeyi ve AB genelinde talep-güvence mekanizmaları oluşturarak özel sektör yatırımını teşvik etmeyi öngörmektedir. Ayrıca, AB'nin Net-Zero Industry Act ve Green Deal Industrial Plan gibi üst politika düzenlemeleriyle de uyumlu bir çerçeve sunmayı amaçlamaktadır [57].

Temel İlkeler ve İşleyiş

Hydrogen Bank, yeşil hidrojen üreticileri ile tüketicileri arasındaki maliyet boşluğunu kapatmak, ölçek ekonomisini mümkün kılmak ve uzun vadeli piyasa öngörülebilirliği sağlamak üzere tasarlanmıştır. Bu çerçevede:

- **Açık Artırma (Auction) Modeli:** Hidrojen üreticilerinin sunduğu teklifler, rekabetçi bir açık artırma yoluyla değerlendirilmekte ve en düşük maliyet-fiyat farkını talep eden projelerin desteklenmesi planlanmaktadır. Bu modelde, yeşil hidrojen üreticilerinin belirli birim

üretim (örneğin kg başına) için talep ettikleri destek miktarını teklif ettikleri, rekabete dayalı bir finansman mekanizmasıdır. En düşük sübvansiyon teklifini veren projeler desteklenmektedir. Bu yöntemle kamu kaynaklarının etkin kullanımı ve maliyet etkin temiz hidrojen üretiminin teşviki amaçlanmaktadır. [55,58].

- **Auctions-as-a-Service Yaklaşımı:** AB düzeyindeki pilot ihalelere katılan ve yeterlilik kriterlerini karşılayan ancak AB fonundan pay alamayan projelerin, gönüllü olarak üye ülkeler tarafından doğrudan milli bütçelerle desteklenmesi öngörülmektedir [58]. Böylelikle ülkeler, ek bir ulusal ihale sürecine gerek kalmadan AB çapındaki ihale platformunu kullanarak projelerini finanse edebilmektedir.
- **Hibrit Finansman ve Destek Mekanizmaları:** AB Emisyon Ticareti Sistemi gelirleri, İnovasyon Fonu ve üye devletlerin kendi kaynakları bir araya getirilerek hibrit bir destek modeli oluşturulmaktadır. Bu model, yenilenebilir hidrojen projelerindeki sermaye giderlerini (CAPEX) ve üretim aşamasındaki işletme giderlerini (OPEX) azaltmayı hedeflemektedir [60].
- **Sertifikasyon ve Karbon İçeriği İzlemesi:** Yenilenebilir hidrojen üretiminin “RFNBO” (Renewable Fuels of Non-Biological Origin) kriterlerine uygunluğunu doğrulamak için Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan kurallar uygulanmaktadır [55]. Bu standartlar, üretim kaynağının yenilenebilirliği ve karbon ayak izinin hesaplanması gibi unsurları kapsamaktadır.

Potansiyel Etkiler ve Bölgesel Yansımalar

Hydrogen Bank inisiyatifi, AB içinde ve uluslararası ölçekte yeşil hidrojenin hızla ölçeklenmesini sağlamayı amaçlamaktadır. Buna bağlı olarak:

- **Piyasa Genişlemesi ve Fiyat İstikrarı:** Uzun vadeli alım anlaşmaları ve sabit prim ödemeleri sayesinde yeşil hidrojen piyasasının daha istikrarlı bir yapıya kavuşması beklenmektedir [55]. Böylece, yenilenebilir hidrojen fiyatlarının öngörülebilirliği artmakta ve özel sektörün yatırım motivasyonu yükselmektedir.
- **Yatırım ve İş Birliği Fırsatları:** Üye ülkeler veya AB dışı ülkeler, “Auctions-as-a-Service” modeliyle Hydrogen Bank çerçevesinde düzenlenen ihalelere katılarak ek finansman imkânları bulmakta; böylelikle temiz hidrojen üretimi ve ihracatı artmaktadır [59].
- **Teknolojik ve Sanayi Dönüşümü:** Elektrolizör teknolojileri başta olmak üzere üretim ekipmanlarının maliyetinin ölçek ekonomisi ile azaltılabilmesi amaçlanmaktadır. Enerji yoğun sektörlerdeki (demir-çelik, çimento vb.) karbonsuzlaşma süreçlerinde hidrojen kullanımının artması beklenmektedir [54].

3.5.2. Carbon Contract for Difference (CCfD)

Bu alt başlıkta, karbon fiyatlandırma politikalarındaki oynaklık ve belirsizliklere karşı özellikle enerji yoğun sektörlerdeki dekarbonizasyon yatırımlarını teşvik etmek amacıyla son dönemde gündeme gelen Carbon Contract for Difference (CCfD) mekanizmasının çerçevesi incelenmektedir. CCfD yaklaşımı, konvansiyonel fosil yakıtlı üretime kıyasla daha yüksek maliyetli olan düşük karbonlu veya karbon-nötr teknolojilere yönelik ek finansman ve fiyat istikrarı sağlamayı hedeflemektedir [61]. Bu kapsamda CCfD'nin arka planı ve amaçları, temel ilkeleri ve işleyişi ile potansiyel etkileri değerlendirilmektedir.

Auction ve CCfD modelleri arasındaki farkın da burada belirtilmesi faydalı olacaktır. Auction modeli, üreticilerin birim hidrojen başına talep ettikleri destek miktarını rekabetçi şekilde sundukları ve en düşük tekliflerin desteklendiği, tek seferlik prim ödemesine dayanan bir yapıya sahip bulunmaktadır. Buna karşılık CCfD modeli, karbon emisyonu içermeyen üretim

süreçlerine yönelik olarak, üreticiye önceden belirlenen karbon referans fiyatı ile piyasa fiyatı arasındaki farkı uzun vadeli sözleşmeler aracılığıyla garanti eden bir destek mekanizması sunmaktadır. Auction modeli daha kısa vadeli ve uygulaması görece daha sade bir yapı sergilemektedir. CCfD ise yatırımcılara daha yüksek gelir öngörülebilirliği sağlayarak, karbon azaltımı hedeflerine doğrudan katkıda bulunmaktadır.

Arka Plan ve Amaçlar

Emisyon Ticaret Sistemi gibi mevcut karbon fiyat mekanizmaları, enerji yoğun sanayilerde yapılacak büyük ölçekli dekarbonizasyon yatırımları için öngörülebilir bir gelir desteği için yeterli olmayabilmektedir. Özellikle karbon fiyatlarının dalgalı seyri, yatırımcıların uzun vadeli planlama yapmasını zorlaştırmaktadır [62,63]. CCfD mekanizması, düşük karbon teknolojilerine yapılan yatırımların fizibilitesini artırmak amacıyla, yatırımcıya belli bir karbon fiyatı taahhüdü sunarak karbon fiyatı değişkenliğinden kaynaklanan riski azaltmayı hedeflemektedir [64]. Bu yaklaşım, REPowerEU ve benzeri Avrupa Birliği (AB) politikalarıyla uyumlu bir şekilde, endüstrinin fosil yakıtlardan uzaklaşmasını hızlandırmayı ve yenilikçi teknolojilerin hızlı ölçeklenmesini sağlamayı amaçlamaktadır [65].

Temel İlkeler ve İşleyiş

a) Maliyet Boşluğunun Kapatılması:

CCfD, düşük karbonlu üretimin konvansiyonel üretim yöntemlerine kıyasla daha yüksek olabilen işletme ve ilk yatırım maliyetlerini telafi etmeye yönelik bir teşvik mekanizması olarak çalışmaktadır. Belirlenen “karbon dönüş fiyatı (carbon strike price)” ile piyasa karbon fiyatı arasındaki fark, devlet veya ilgili kamu fonları tarafından üstlenilmekte; piyasa fiyatı dönüş fiyatı seviyesinin üstüne çıktığında ise bu kez üretici farkı kamu tarafına geri ödemektedir [61,66].

b) Uzun Vadeli Sözleşmeler ve Gelir İstikrarı:

CCfD'ler, genellikle 10-15 yılı bulabilen sürelerle imzalanmakta ve bu süreçte yatırımcılara öngörülebilir bir gelir akışı sunmaktadır [67]. Bu uzun vadeli sözleşmeler, özellikle çelik, çimento, kimya gibi enerji yoğun sektörlerde karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik büyük ölçekli dönüşüm projelerinin finansmanını kolaylaştırmaktadır [68].

c) Rekabetçi İhale ve Seçim Süreci:

Kamusal fonun etkin kullanımını sağlamak için CCfD desteği, rekabetçi ihaleler yoluyla tahsis edilmektedir. Bu ihalelerde proje geliştiriciler, ihtiyaç duydukları karbon dönüş fiyatı değerini beyan ederek yarışmakta; en düşük fiyat farkını talep eden ve teknik açıdan yeterli bulunan projeler destek almaya hak kazanmaktadır [69]. Bu yaklaşım, teşviklerin maliyet etkin biçimde dağıtılmasına imkân vermektedir.

d) Devlet Yardımı ve AB Mevzuatıyla Uyum:

AB devlet yardımı kuralları çerçevesinde, CCfD gibi mekanizmaların rekabeti bozmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu nedenle, CCfD müzakereleri sırasında proje geliştiriciler ve kamu otoritesi arasında, hangi ölçütlerin (emisyon azaltım potansiyeli, teknoloji olgunluğu, maliyet etkinliği vb.) esas alınacağı net olarak tanımlanmaktadır [63,70]. Ayrıca, karbon sızıntısını önlemek amacıyla AB genelinde ortak standartlar ve sertifikasyon çerçeveleri geliştirilmektedir.

Potansiyel Etkiler ve Bölgesel Yansımalar

a) Yatırım Çekiciliğinin Artması ve Finanse Edilebilirlik:

Karbon fiyatlarındaki dalgalanmalar, yeşil teknoloji projelerinde finansman maliyetlerini yükseltmektedir. CCfD, yatırımcıya uzun vadeli bir fiyat güvencesi sunarak projelerin finanse edilebilirliğini artırmakta, özel sektör fonlarının düşük karbonlu teknolojilere yönelmesine katkıda bulunmaktadır [61,65].

b) Sanayi Dönüşümünün Hızlanması:

Çelik, çimento, kimya gibi sektörler, CCfD destekli projelerle fosil yakıt kullanımı yerine yenilenebilir kaynaklara geçişlerini hızlandırmaktadır. Böylelikle üretim süreçlerinin karbonsuzlaşması ve AB'nin 2030-2050 iklim hedeflerine ulaşılması kolaylaşmaktadır [66,68].

c) Teknoloji Gelişimi ve Maliyet Düşüşü:

CCfD mekanizmaları, başlangıçta yüksek maliyetli ve henüz geniş ölçekte kullanılmayan teknolojilerin hızla gelişmesine yol açmaktadır. Böylece, ölçek ekonomisi etkisiyle zaman içinde maliyetlerin düşmesi beklenmektedir. Bu da AB sanayisinin küresel temiz teknoloji pazarında rekabetçiliğini artırabilmektedir [62,64].

d) Bölgesel Farklılıklar ve Uyum İhtiyacı:

CCfD uygulamalarının birden çok üye devlette devreye alınması, rekabet dengelerinin korunması için AB düzeyinde koordinasyon gerektirmektedir. Farklı bölgelerdeki enerji fiyatları, altyapı koşulları ve teknolojik hazırlık seviyesi, CCfD ihaleleriyle elde edilecek sonuçları doğrudan etkilemektedir [69,70].

3.5.3. The Inflation Reduction Act (IRA)

Bu alt başlıkta, ABD'de 2022 yılında kabul edilen Inflation Reduction Act (IRA) kapsamındaki özellikle temiz enerji, karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik düzenlemeler incelenmektedir. IRA, enerji sektöründen sağlık politikalarına uzanan geniş bir yelpazede teşvik ve vergi düzenlemeleri içeren kapsamlı bir yasal çerçeve olup, yeşil dönüşümü hızlandırmak ve karbon yoğunluğunu azaltmak amacıyla çeşitli finansman ve destek mekanizmaları sunmaktadır [71,72]. Aşağıda, IRA'nın arka planı ve amaçları, temel ilkeleri ve uygulama mekanizmaları ile potansiyel etkileri özetlenmektedir.

Arka Plan ve Amaçlar

Amerika Birleşik Devletleri'nin karbon emisyonlarını azaltarak enerji güvenliğini güçlendirmeyi hedefleyen IRA, 2030 yılına kadar emisyonları %40 seviyesinde azaltmayı ve aynı zamanda enerji maliyetlerini düşürerek istihdam olanaklarını artırmayı amaçlamaktadır [73]. Bu kapsamda, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik vergi teşviklerinin yanı sıra, hidrojen, batarya teknolojileri ve diğer enerji depolama projelerine yapılan yatırımlar da destek kapsamına alınmaktadır [72].

Temel İlkeler ve İşleyiş

a) Yenilenebilir Enerji ve Temiz Teknoloji Teşvikleri:

IRA, yenilenebilir enerji projelerine (güneş, rüzgâr, hidrojen vb.) yönelik vergi indirimleri ve finansal teşvikler sunmaktadır. Örneğin, Investment Tax Credit (ITC) ve Production Tax Credit (PTC) gibi vergi kredilerinin sürelerinin uzatılması ve kapsamlarının genişletilmesi, temiz enerji projelerinin ekonomik fizibilitesini artırmakta ve özel sektör yatırımlarını teşvik etmektedir [74].

b) Karbon Yakalama ve Depolama Destekleri:

Fosil kaynaklı emisyonların azaltılmasını amaçlayan karbon yakalama, kullanma ve depolama (CCUS) teknolojilerinin gelişimini destekleyen vergi indirimleri ve hibe programları, IRA'nın karbon azaltım stratejisinde önemli bir yer tutmaktadır. Böylelikle enerji yoğun sanayi tesislerinin fosil yakıtlara bağımlılığını azaltması ve karbon salınımında büyük bir azaltım elde edilmesi hedeflenmektedir [73].

c) Vergi Düzenlemeleri ve Kaynak Yaratma:

IRA kapsamında getirilen kurumlar vergisi tabanının güçlendirilmesi ve yüksek gelirli için ek vergi düzenlemeleriyle sağlanan gelirin, enerji dönüşümü ve sağlık reformu alanında kullanılacak mali kaynak yaratılması öngörülmektedir [71].

Potansiyel Etkiler ve Bölgesel Yansımalar

a) Küresel Temiz Enerji Yatırımlarının Hızlanması:

IRA ile birlikte, ABD’de temiz enerji projelerinin finansal cazibesi artmakta ve küresel ölçekte yeşil teknolojilere yatırım yapılmasına yönelik rekabet desteklenmektedir. Avrupa Birliği, Japonya ve diğer gelişmiş ekonomiler de benzer teşvik paketlerini devreye alarak rekabet koşullarını korumaya çalışmaktadır [73].

b) Tedarik Zinciri ve İstihdam Fırsatları:

Yenilenebilir enerji, batarya üretimi ve hidrojen gibi sektörlerin yerli üretimi ve istihdam kapasitesini artırmak amacıyla getirilen ek teşvikler, özellikle imalat sanayinde yeni iş kollarının oluşmasına ve bölgesel kalkınmaya katkı sunmaktadır [74].

c) Karbon Emisyonlarının Azaltılması ve İklim Hedefleri:

IRA’nın, ABD’nin 2030 yılına kadar karbon emisyonlarını önemli ölçüde azaltmasına katkı sağlayarak küresel iklim hedeflerine yaklaşmada kritik bir rol oynaması beklenmektedir. Ek olarak, fosil yakıt kullanımının kademeli olarak azalacağı ve yenilenebilir altyapının güçleneceği öngörülmektedir [71,72].

d) Uluslararası İş Birliği ve Politika Yakınsaması:

ABD’nin bu kapsamlı paketi hayata geçirmesinin, diğer ülkelerin de benzer karbon azaltım ve temiz enerji politikalarını uygulamaya almasını hızlandırma potansiyeli mevcuttur. Uluslararası iş birliği, karbon fiyatlandırması ve ortak teknolojik Ar-Ge projeleri gibi alanlarda yeni fırsatlar doğması beklenmektedir [73].

3.5.4. Diğer Destek Mekanizmaları

Bu alt başlıkta, yeşil hidrojenin üretim, taşıma, depolama ve kullanım alanlarında yürürlüğe giren veya planlanan diğer destek mekanizmaları özetlenmektedir. Söz konusu mekanizmalar; farklı finansman modelleri, sigorta ve yatırım garantisi araçları, altyapı geliştirme programları ve çapraz sektör iş birlikleri gibi çerçeveleri kapsamakta, düşük karbonlu hidrojen ekosisteminin hızla ölçeklenmesini amaçlamaktadır [75,76]. Aşağıda, bu mekanizmaların öne çıkan nitelikleri ve potansiyel etkileri ele alınmaktadır.

Altyapı Odaklı Teşvikler ve Kamu-Özel Ortaklıkları

Düşük karbonlu veya yeşil hidrojenin yoğun kullanımına yönelik en kritik ihtiyaçlardan biri, gerekli altyapı yatırımlarının hızlı ve koordineli biçimde hayata geçirilmesidir. Bu kapsamda bazı ülkeler, hidrojen dolum istasyonlarının kurulumu ve boru hattı gibi taşıma altyapıları için özel teşvik programları devreye almaktadır. Örneğin, “mevcutluk ödemesi (availability payment)” ve kamu-özel ortaklığı modelleriyle, özel yatırımcılara uzun vadeli gelir garantisi sunularak altyapı projelerinin finanse edilebilirliği artırılmaktadır [75]. Benzer biçimde, Avrupa’da ve Asya’da hedeflenen hidrojen koridorlarının oluşturulması için büyük ölçekli altyapı fonları ve projeleri duyurulmaktadır [76].

Yatırım ve İhracat Garantileri

Hidrojen projelerinin yüksek ilk yatırım maliyeti ve uzun geri ödeme süreleri, uluslararası mecrada risk azaltımı (de-risking) mekanizmalarına yönelik ihtiyacı artırmaktadır [77]. Bu çerçevede; yatırımcıların siyasal veya finansal risklere karşı korunması için “yatırım garantisi” veya “dış ticaret kredisi güvencesi” (örn. Hermes Cover, UFK, vb.) gibi kamu teminat enstrümanları uygulanabilmektedir [78]. Gelişmekte olan ülkelerde hidrojen projeleri yürüten şirketler, bu mekanizmalar sayesinde ilk yatırım maliyetini azaltarak ve diplomatik destekten faydalanarak daha hızlı fiili yatırıma yönelebilmektedir [79].

Mevzuat ve Standardizasyon Desteği

Hidrojen piyasasında yaşanan önemli bir diğer zorluk, henüz tam oturmamış düzenlemeler ve standardizasyon çerçevesidir [80]. Teknik ve çevresel standartların netleşmesi; yeşil hidrojenin karbon içeriğinin ölçümü, sertifikasyon süreçleri, güvenlik standartları gibi konularda hızlı bir mevzuat uyumu gerekmektedir. Bu alandaki politik destek ve rehberlik, hem üreticiler hem de tüketiciler açısından piyasaya katılımı kolaylaştırmakta ve proje geliştirme risklerini azaltmaktadır. Almanya, Danimarka vb. ülkeler, “temiz hidrojen” tanımını netleştiren ve projelerin sertifikasyonunu teşvik eden mevzuat paketlerini hızla devreye almaktadır [81]

Bölgesel İş Birliği ve Sektörel Arayüz

Yeşil hidrojenin uluslararası ticareti ve ölçekli kullanımının sağlanmasında, bölgesel ve sektörel iş birliği girişimleri önemli rol oynamaktadır. Örneğin, sanayi kümeleri (hidrojen vadileri vb.) veya limanlar ekseninde oluşturulan koalisyonlar, hidrojen tedarik zincirinin uçtan uca entegrasyonunu hedeflemekte ve teknoloji transferini desteklemektedir. Ayrıca, farklı sektörlerin (kimya, çimento, ulaştırma, vb.) buluştuğu platformlar aracılığıyla hidrojen talep havuzları oluşturulmakta ve toplam talebe karşılık verebilecek ölçekli üretim kapasitesi planlanmaktadır [82]. Bu tür iş birlikleri, mekanizmaların etkinliğini artırarak piyasanın hızlı olgunlaşmasına katkı sunmaktadır.

3.5.5. İlgili Destek Mekanizmalarının Hidrojen Sektörünün Gelişmesine Katkıları ve Ülkemize Yönelik Genel Değerlendirme

Önceki alt başlıklarda (3.5.1 – 3.5.4) incelenen Hydrogen Bank, Karbon Fark Sözleşmesi (CCfD), ABD’deki IRA uygulamaları ve diğer uluslararası destek mekanizmaları; hem küresel ölçekte hem de ülkemiz açısından yeşil hidrojen ekosisteminin hızlı ve etkin gelişimini amaçlayan birbirini tamamlayıcı çerçeveler sunmaktadır. Bu mekanizmalar, üretim maliyetlerini düşürme, piyasa öngörülebilirliğini artırma ve altyapı yatırımlarını teşvik etme gibi çeşitli avantajlar sağlayarak, hidrojenin enerji dönüşümünde kritik bir rol üstlenmesine destek olmaktadır. Aşağıda, bu mekanizmaların sektöre katkıları ve Türkiye’ye yönelik değerlendirmeleri özetlenmektedir:

a) Üretim ve Talep Arasında Dengeli Büyüme

- Hydrogen Bank ve CCfD gibi mekanizmalar, üreticilere uzun vadeli fiyat veya gelir güvencesi sağlarken, alıcılar (sanayi, ulaşım vb.) açısından da tedarik güvenilirliğini artırmaktadır [54,61]. Ülkemizde de elektrolizör üretimi ve fosil yakıt bağımlılığının azaltılmasında bu tür risk paylaşım modellerinin benimsenmesi, özel sektörün hidrojen yatırımlarına ilgisini artırabilme potansiyeline sahiptir.
- IRA kapsamındaki vergi teşvikleri (ITC, PTC vb.) veya Avrupa’da görülen benzeri vergi indirimleri ve hibrit destek mekanizmaları, hem yabancı yatırımcılar hem de yerli girişimciler için cazip bir pazar oluşturulabilmesi açısından ülkemiz için de örnek teşkil etmektedir [71,73].

b) Ar-Ge ve Teknoloji Gelişiminin Hızlanması

- Gerek Hydrogen Bank ihaleleri gerekse IRA çerçevesinde yer alan temiz enerji AR-GE fonları, hidrojen teknolojilerinin (özellikle elektrolizör, yakıt hücresi vb.) seri üretime geçmesini hızlandırmaktadır [55,74]. Ülkemiz de farklı alanlarda uyguladığı yerlilik şartını hidrojen üretim ve depolama teknolojilerinde de uygulamaya geçirebilir.
- CCfD gibi mekanizmalar, karbon yoğun süreçlerden uzaklaşma sürecinde yenilikçi çözümlerin (örneğin CCUS veya yenilikçi elektroliz teknolojileri) hızla ticarileşmesine katkı sunmaktadır [61,62]. Ülkemizde demir-elik, rafineri ve kimya sektörlerinde bu tip pilot projelerin yaygınlaşması, ihracat rekabetçiliği açısından stratejik bir öneme sahiptir.

c) Altyapı Yatırımlarının Desteklenmesi ve Bölgesel İş Birliği

- Diğer destek mekanizmaları arasında yer alan kamu-özel sektör ortaklığı ve mevcudiyet ödemesi gibi modeller, hidrojen boru hatları, dolun istasyonları ve depolama tesisleri gibi kritik altyapıya uzun vadeli yatırım imkânı vermektedir [75]. Türkiye’de de benzer altyapı projeleri, özellikle liman kentleri veya sanayi bölgeleri ekseninde, kamu-özel sektör ortaklığı modeliyle hayata geçirilebilir.
- Bölgesel iş birliği ve “hidrojen koridorları” gibi girişimler, ülkemizin jeopolitik konumuyla birleştiğinde, hidrojen ihracatı ve transit potansiyelini artırabilir. Özellikle AB’nin net sıfır hedefleri doğrultusunda, Türkiye-AB hidrojen koridorlarının geliştirilebilmesi ihracat fırsatlarını güçlendirecektir [82].

d) Mevzuat ve Standardizasyon Uyumunun Önemi

- Hidrojen sektöründe uluslararası standartların ve sertifikasyon düzenlemelerinin henüz tam olarak oturmamış olması, gerek Hydrogen Bank gerekse IRA benzeri mekanizmaların etki alanını sınırlandırabilmektedir [55,72]. Ülkemizin de “yeşil hidrojen” tanımı, karbon izleme ve sertifikasyon süreçlerinde uyumlu mevzuatı hızla oluşturması, dış pazarlara entegrasyonunu kolaylaştıracaktır.
- Bu tür standardizasyon çalışmaları; yatırımcıların proje geliştirme riskini azaltırken, üretici ve tüketiciler için güvenilir bir pazar zemini oluşturmaktadır [80,81].

e) Türkiye’ye Özgü Yol Haritası ve Fırsatlar

- Ülkemizin yenilenebilir enerji kapasitesinin yüksek olması (güneş, rüzgâr vb.), hidrojenin rekabetçi maliyetlerle üretilebilme potansiyelini güçlendirmektedir. Bu kapsamda, CCfD, Hydrogen Bank ihalelerine benzer modeller ya da doğrudan dış yatırım çekecek vergi teşvikleri değerlendirilebilir.
- Hidrojen projeleri için kamu garantisi sağlanması, risk azaltımı açısından kritik olabilir. Özellikle geliştirilen projelerin uluslararası finansman bulmasında bu tür mekanizmalar önemlidir.
- Sanayi kümeleri ve liman merkezli stratejiler, Türkiye’yi bölgesel hidrojen ticaretinin ana aktörlerinden biri yapabilir. Kamu-özel sektör iş birliğiyle kurulacak “hidrojen vadileri”nin, hem üretim teknolojilerinde Ar-Ge kapasitesini geliştirme hem de ihracat odaklı projeleri teşvik etme potansiyeline sahiptir.

3.6. Genel Sonuç ve Değerlendirme

Dünya genelinde temiz hidrojen teknolojilerinin yaygınlaşmasına yönelik politikalar ve yatırımlar hız kazanırken, Avrupa Birliği başta olmak üzere birçok ülke bu dönüşümde stratejik adımlar atmaktadır. European Green Deal ve REPowerEU gibi politika belgeleri; yeşil hidrojenin enerji üretimi, ulaşım ve sanayi gibi sektörlerde karbon emisyonlarının azaltılmasında temel bir araç olarak kullanılacağını vurgulamaktadır. Bu kapsamda Avrupa Komisyonu’nun European Hydrogen Bank, CCfD ve diğer piyasa temelli destek mekanizmaları ile hidrojen ekosistemini hızla ölçeklendirmeyi hedeflediği görülmektedir. Bu araçlar, finansman güvencesi ve pazar düzenlemeleriyle yenilenebilir hidrojen projelerinin önünü açmakta, karbon yoğun sektörlerin dönüşümünü kolaylaştırmaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, **Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası (2023)”**, ulusal düzeyde hidrojenin üretim, dağıtım ve kullanımına ilişkin temel hedefleri ortaya koymaktadır. 2030 yılına kadar 2 GW ve 2035’te 5 GW elektrolizör kapasitesine ulaşılması; yeşil hidrojen üretim maliyetlerinin düşürülmesi; doğal gaz şebekesine hidrojen karıştırma gibi pilot uygulamaların hayata geçirilmesi gibi hedefler belirlenmiştir. Ayrıca, sivil toplum kuruluşları tarafından hazırlanan raporlar ve Yeşil Mutabakat Eylem Planı gibi tamamlayıcı belgeler, özel sektör ve politika yapımcılar arasında farkındalığın arttığını göstermektedir.

Güney Marmara Bölgesi, Türkiye’nin hidrojen dönüşümündeki en güçlü aday bölgelerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bölgedeki yüksek yenilenebilir enerji potansiyeli, güçlü sanayi

altyapısı, liman erişimi ve devam eden Ar-Ge projeleri, hidrojen üretimi ve kullanımında önemli fırsatlar sunmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği ile ortak yürütülen projeler aracılığıyla, bölge hem yerli hidrojen kullanımını artırma hem de uzun vadede yeşil hidrojen ihracat merkezi olma potansiyeli taşımaktadır.

REPowerEU fonları Türkiye tarafından doğrudan kullanılamasa da, AB'nin temiz enerji politikalarıyla uyumlu projeler geliştirilmesi hâlinde, Horizon Europe, Innovation Fund ve Clean Hydrogen Partnership gibi programlar üzerinden dolaylı fon erişimi mümkündür. Türkiye'nin bu alanlarda uluslararası iş birliklerini güçlendirmesi, teknoloji transferi ve finansman kaynaklarına erişimi kolaylaştıracaktır.

Sonuç olarak, Türkiye ve özelde Güney Marmara Bölgesi; ulusal stratejik hedeflerini AB politikalarıyla uyumlu hâle getirerek, temiz hidrojen dönüşümünden ekonomik, çevresel ve teknolojik açılardan çok yönlü fayda sağlayabilecek güçlü bir konuma sahiptir. Ancak bu sürecin başarılı olabilmesi için politika, finansman ve altyapı düzeyinde bütüncül bir yaklaşım benimsenmesi ve bölgesel girişimlerin ulusal stratejilerle entegre biçimde yürütülmesi gerekmektedir.

4. Güney Marmara Bölgesi Hidrojen GZFT Analizi

Bu bölümde, Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen ekosistemi açısından mevcut durumu, potansiyel gelişim alanları ve stratejik öncelikleri kapsamlı bir biçimde ele alınmaktadır. Çalışma, bölgenin enerji dönüşümündeki özgün koşullarını ortaya koymak, güçlü ve zayıf yönlerini sistematik biçimde değerlendirmek, fırsatlar ve tehditler ekseninde bütüncül bir analiz gerçekleştirmek amacıyla kurgulanmıştır.

İlk alt başlıkta (4.1) Güney Marmara Kalkınma Ajansı ve ilgili kurumlar tarafından hazırlanan strateji dokümanları ayrıntılı şekilde incelenmekte; enerji çeşitliliği, sanayide ve ulaşımda temiz enerji kullanımı, yenilenebilir enerji potansiyeli, Ar-Ge kapasitesi, akıllı şehir uygulamaları ve mevzuat-temelli destek mekanizmaları gibi temel unsurlar ortak değerlendirme başlıkları altında sınıflandırılmaktadır.

İkinci alt başlıkta (4.2) bölgenin hidrojen ekosistemine dair GZFT analizi kapsamlı yöntemsel yaklaşımlar eşliğinde sunulmaktadır. Ağırlıklandırma, bulanık set ve normalizasyon gibi teknikler kullanılarak oluşturulan GZFT matrisi; kriter, kategori ve alt kategori düzeyinde çok boyutlu analizlerle desteklenmektedir. Bu çerçevede stratejik hedef önerileri geliştirilmekte, panel ve anket çalışmalarının çıktıları karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmektedir.

Üçüncü alt başlık (4.3) Çanakkale ve Balıkesir illeri için yeşil hidrojen üretimi, dağıtımı, depolaması ve tüketimine odaklanan mekansal gelişim stratejisini içermekte; kısa, orta ve uzun vadeli dönemlerde uygulanabilecek planlamalar detaylandırılmakta ve paydaş katılımı ile yönetim süreçlerine dair öneriler sunulmaktadır.

Dördüncü alt başlık (4.4) hidrojen arz ve talebine ilişkin projeksiyonları kapsamaktadır. Bu kapsamda kullanılan metodoloji, öngörü senaryoları ve sonuçların sektörel etkileri ortaya konulmaktadır.

Son bölümde (4.5) mevcut doğalgaz altyapısının yeniden amaçlandırılması konusu ele alınmakta; hidrojenin doğalgaz hatlarında taşınması ve karıştırılması bağlamında teknik zorluklar, potansiyel uygulama seçenekleri ve bölgenin altyapısal yeterlilik düzeyi değerlendirilmektedir.

Bu kapsamlı analiz, Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen ekonomisine geçiş sürecinde güçlü bir stratejik referans oluşturarak politika yapımcılar, yatırımcılar ve akademik paydaşlar için karar destek aracı niteliği taşımaktadır.

4.1. Ajans Tarafından Hazırlanan Strateji Dokümanlarının İncelenmesi

Bu alt başlıkta, Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA) tarafından hazırlanan veya Ajans koordinasyonunda yayımlanan farklı dokümanlar incelenmektedir. Söz konusu dokümanlar, TR22 Bölgesi'nin (Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan) enerji görünümünü, yenilenebilir enerji potansiyelini, sanayi ve tarım sektörü temelli enerji projelerini, fizibilite çalışmalarını, yatırım ortamını ve 2024-2028 dönemine dair stratejik yol haritalarını kapsamaktadır. Aşağıda, ilgili dokümanların içerik ve odak alanları özetlenerek, ortaya çıkan ortak değerlendirmeler ve bölgedeki enerji görünümü sunulmaktadır.

4.1.1. Doküman Bazlı İncelemeler

2024-2028 Güney Marmara Bölge Planı [83]

- **Kapsam ve Amaç:** TR22 Bölgesi'nin beş yıllık kalkınma planıdır. "Yeşil büyüme ve dirençlilik" ilkelerine atıf yaparak, bölgenin sanayi, turizm, tarım ve enerji ekseninde gelişmesini hedeflemektedir.
- **Enerjiye Dair Stratejiler:** Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş, biyokütle, jeotermal) daha etkin kullanımı, karbon emisyonlarının azaltılması, akıllı şehirler ve enerji verimliliği uygulamaları teşvik edilmektedir.
- **Hidrojen ve Diğer Yeşil Yakıtlar:** Temiz yakıt teknolojilerinin, sanayi ve ulaşımda fosil kaynak kullanımını ikame edebilmesi öngörülmekte; potansiyel hidrojen projelerinin ve pilot uygulamaların desteklenmesi hedeflenmektedir.

TR22 Bölgesi Yenilenebilir Enerji Sektörü Analizi & Ar-Ge ve Yenilikçilik Stratejisi [84]

- **Mevcut Durum Analizi:** TR22 Bölgesi'nin rüzgâr, güneş, biyokütle, jeotermal gibi yenilenebilir potansiyelleri incelenmekte; coğrafi, iklimsel ve altyapısal avantajları ortaya konmaktadır.
- **Ar-Ge ve Yenilik Vizyonu:** İlgili üniversiteler, teknoparklar ve sektör temsilcilerinin katkısıyla temiz enerji teknolojilerinde yerli kabiliyet geliştirilmesi, bölgesel Ar-Ge altyapısının güçlendirilmesi ve yeni nesil enerji teknolojilerinin (hidrojen, akıllı şebekeler vb.) öne çıkarılması hedeflenmektedir.

TR22 Bölgesi Deniz Üstü Rüzgâr Santrali ve Limanı Ön Fizibilite Raporu [85]

- **Deniz Üstü (Offshore) Rüzgâr Potansiyeli:** Marmara ve Ege denizlerine kıyısı bulunan Balıkesir ve Çanakkale illerinin rüzgâr hızları, deniz tabanı özellikleri ve ekolojik yapısı değerlendirilerek deniz üstü rüzgâr santrali için uygun alanlar değerlendirilmektedir.
- **Limani ve Lojistik Altyapısı:** Deniz üstü türbinlerinin kurulum, bakım ve onarımı için gerekli liman altyapısının iyileştirilmesi ve "enerji limanı" konsepti ele alınmaktadır.
- **Ekonomik Değerlendirme:** Türbin modelleri, yüzer platformlar vs. için CAPEX/OPEX analizleri, rüzgâr verimi ve bakım masrafları gibi parametrelerin yer aldığı bir ön fizibilite sunulmaktadır.

TR22 Bölgesi Yenilenebilir Enerji Araştırması Sonuç Raporu [86]

- **Kapsam ve Metodoloji:** Bölgede rüzgâr, güneş, hidrolik, biyokütle ve hidrojen enerjisine ilişkin uzun dönemli projeksiyonlar ve potansiyel değerler paylaşılmaktadır.
- **Öne Çıkan Bulgular:** Özellikle rüzgâr enerjisinde karasal yatırımların yanı sıra deniz üstü projelere geçişin önemli olduğu, güneş enerjisinin hızla yaygınlaşabileceği, biyokütlede ise tarımsal atıkların değerlendirilmesiyle ek gelir sağlanabileceği belirtilmektedir.
- **Hidrojen ve Dalga Enerjisi:** Raporda, dalga ve akıntı enerjisinin araştırma safhasında olduğu, ancak hidrojen üretiminde yenilikçi uygulamalara zemin oluşturabileceği ifade edilmektedir.

Balıkesir Enerji Yatırım Rehberi [87]

- **Yatırım Ortamı:** Balıkesir ilinin rüzgâr potansiyeli, biyogaz fırsatları, jeotermal kaynakları ve güneşlenme değerleri bakımından avantajlı konumu vurgulanmaktadır.
- **Teşvikler ve Destekler:** Enerji yatırımlarına yönelik ulusal ve bölgesel teşvik mekanizmaları (Yatırım Teşvik Sistemi, YEKDEM vb.) özetlenmekte, ajansın yatırım destek hizmetleri anlatılmaktadır.
- **Örnek Projeler:** Bölgede hâlihazırda faal olan rüzgâr enerjisi santralleri ve biyokütle tesisleri, bunların ekonomik katkıları ve yerel istihdam etkileri ele alınmaktadır.

Balıkesir İli Biyogaz Tesisi Ön Fizibilite Raporu [88]

- **Tarımsal Atık ve Hayvancılık Kaynaklı Biyogaz:** Balıkesir'deki hayvancılık işletmelerinin atık profili ve kalori değerleri analiz edilmekte, potansiyel biyogaz üretim kapasiteleri sunulmaktadır.
- **Teknik ve Ekonomik Değerlendirme:** Biyogaz tesisinin kurulum maliyetleri, geri dönüş süresi, elektrik-ısı üretimi ve bölge ekonomisine katma değeri değerlendirilerek bir ön fizibilite sunulmaktadır.
- **Atık Yönetimi ve Çevresel Katkı:** Biyogaz tesisinin atık yönetimi sorunlarını hafifleteceği ve sera gazı emisyonlarını azaltacağı vurgulanmaktadır.

Çanakkale Enerji Yatırım Rehberi [89]

- **Rüzgâr, Güneş ve Diğer Kaynaklar:** Çanakkale ilinin rüzgâr enerjisindeki öncü konumu, güneş enerjisi projeleri için uygun sahaları ve biyokütle potansiyeli öne çıkarılmaktadır. Bunun yanında, liman altyapısı sayesinde uluslararası enerji ticaretine entegre olabileceği ifade edilmektedir.
- **Mevcut Sanayi ve Yatırım İmkânları:** Jeotermal kaynakların turizm ve seracılıkta kullanımı, rüzgâr türbinleri için ekipman üretimi ve daha fazlasına dair yatırım fırsatları özetlenmektedir.

Çan Termik Santrali Kojenerasyonla Bölgesel Isıtma Sistemi Ön Fizibilite Raporu [90]

- **Kojenerasyon Potansiyeli:** Çan Termik Santrali'nin atık ısısının kullanılarak bölgesel ısıtma sistemleri oluşturulması fikri teknik-ekonomik açıdan değerlendirilmekte; ısı gereksinimi yüksek yerleşim yerlerine düşük maliyetli ve çevreci bir çözüm sunulabileceği belirtilmektedir.

- **Teknik Altyapı ve Proje Maliyeti:** Kazan verimlilikleri, boru hatları, ısı değişim istasyonları gibi bileşenlerin maliyet analizleri yapılmakta, bölgesel ısıtma şebekesinin karbon emisyonlarını azaltacağı vurgulanmaktadır.

TR22 Bölgesi Akıllı Şehirler Raporu [91]

- **Enerji ve Akıllı Şehir Uygulamaları:** Rapor, bölgedeki enerji projelerinin akıllı şehir konseptiyle entegrasyonunu ele almakta; akıllı şebekeler, talep yönetimi ve dijital teknolojilerin kullanımını teşvik etmektedir.
- **Örnek Uygulamalar:** Balıkesir ve Çanakkale illerinde akıllı ulaşım, akıllı aydınlatma, enerji izleme sistemleri gibi pilot proje çalışmalarına yer verilmekte; enerji verimliliğini artıran dijital çözümlerin yaygınlaştırılmasının önemi vurgulanmaktadır.

4.1.2. Ortak Değerlendirme Başlıkları

Yenilenebilir Enerji Çeşitliliği ve Potansiyeli

- Rüzgâr enerjisi (hem karasal hem deniz üstü), güneş, jeotermal, biyokütle gibi kaynakların bölge genelinde önemli rezervleri bulunduğu hemen her dokümanda vurgulanmaktadır [83,84,86,87,89].
- Balıkesir özellikle rüzgâr, jeotermal ve biyogaz; Çanakkale ise rüzgâr, güneş ve liman odaklı deniz üstü projeleri için öne çıkmaktadır.

Sanayi ve Ulaşımında Temiz Enerji Kullanımı

- Farklı belgelerde sanayi kollarının yeşil dönüşümüne dair eylemler yer almaktadır [83,84].
- Çan Termik Santrali Kojenerasyon Projesi gibi uygulama örnekleri, ısıtma ve sanayi proseslerinde fosil yakıtların daha düşük emisyonlu çözümlerle ikame edilebileceğini göstermektedir [90].

Hidrojen, Yeşil Amonyak ve Yeşil Metanol

- Ajans dokümanlarında, hidrojenin gelecekteki enerji karmasında kritik rol oynayacağı ve yeşil amonyak/metanol gibi türev yakıtların ihracat potansiyeli barındırdığı vurgulanmaktadır [83,84].
- Mevcut yenilenebilir kapasitenin bir bölümünün elektrolizörlerle hidrojen üretimine ayrılabilceği ve liman/lojistik avantajları sayesinde uluslararası ticaretin yapılabileceği belirtilmektedir.

Ar-Ge, Teknoloji Geliştirme ve Üniversitelerin Rolü

- TR22 Bölgesi, enerji teknolojileri alanında üniversiteler, araştırma merkezleri ve sanayi kuruluşları arasında iş birliği odaklı projeler yürütmektedir [84].
- Özellikle rüzgâr türbini komponent üretimi, biyogaz tesis teknolojileri, jeotermal sondaj ve hidrojenle ilgili pilot uygulamalar önem arz etmektedir [86,87,89].

Akıllı Şehir Uygulamaları ve Enerji Verimliliği

- “TR22 Bölgesi Akıllı Şehirler Raporu”nda enerji yönetim sistemleri, akıllı sokak aydınlatma ve dağıtık üretim gibi konularla kentlerde karbon emisyonlarının azaltılabileceği belirtilmektedir [91].

- Ajans dokümanlarında, enerji verimliliğini artıran teknolojilerin desteklenmesinin, bölgenin hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacağı ortaya konulmaktadır [83,84].

Deniz Üstü Rüzgâr Santrali ve Enerji Limanı

- “Deniz Üstü Rüzgâr Santrali ve Limanı Ön Fizibilite Raporu”nda, Marmara ve Ege kıyılarında deniz üstü projeler için uygun alanlar saptanmış ve gerekli liman altyapısına ilişkin yol haritası sunulmuştur [85].
- Bu tür yatırımların, hidrojene dayalı yakıtlar ve ihracat senaryoları ile entegre planlandığında daha büyük ekonomik etki yaratacağı düşünülmektedir [86].

Kamu Destekleri, Mevzuat ve Teşvik Mekanizmaları

- Enerji Yatırım Rehberleri (Balıkesir ve Çanakkale) ile biyogaz ve kojenerasyon ön fizibilite raporlarında ulusal düzeyde Yatırım Teşvik Sistemi, YEKDEM ve ilgili mevzuat konularına yer verilmektedir [87-90].
- Farklı dokümanlarda AB odaklı büyük ölçekli hibelerle yatırımcıların hangi alanlarda desteklenebileceğini netleştirilmektedir [83].

4.1.3. Ortak Enerji Görünümü ve Hidrojene Bağlantı

Rüzgâr, güneş, biyokütle ve jeotermal kaynakların tamamının, elektrik ve ısı üretiminden hidrojen gibi katma değerli ürünlere kadar geniş yelpazede değerlendirilmesi planlanmaktadır. Örneğin Balıkesir’de biyogaz ve jeotermal, Çanakkale’de rüzgâr ve güneş öne çıkmaktadır. Burada deniz üstü rüzgâr projeleri için uygun kıyı alanları ve liman altyapısı analiz edilmiş, karbon emisyonlarını azaltmaya büyük katkı yapabilecek GW mertebesinde projeler tasarlanmaktadır. Bu projelerden elde edilecek elektriğin bir kısmı, elektroliz yoluyla yeşil hidrojen üretiminde değerlendirilebilir.

Hidrojen ekonomisine geçiş adımlarının, bölgede kurulacak pilot tesisler (yeşil amonyak, metanol vb.) aracılığıyla hızlanması beklendiği dokümanlarda belirtilmektedir. Özellikle liman merkezli ihracat koridorları ve uluslararası yatırımcılarla iş birliği vurgulanmaktadır. Burada bölgedeki üniversiteler, teknoparklar ve özel sektörün arayüzünde geliştirilecek projelerin, enerji teknolojilerinde yerleşmeye ve yenilikçiliğe katkıda bulunacağı ifade edilmektedir. Rüzgâr türbini komponent üretimi, hidrojen teknolojileri (elektrolizör, yakıt hücresi vb.) ve dijital çözümlerin geliştirilmesi, rekabet gücünü artıracak unsurlardır.

Raporlarda enerji verimliliği, kojenerasyon, akıllı şebeke çözümleri ve atık ısı kullanımı gibi konuların önemine atıf yapılmaktadır. Tarım, sanayi ve kentlerde karbonsuzlaşma hedeflerine ulaşmak için enerji verimliliğini yükseltmek kritik bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Dokümanların tümü, TR22 Bölgesi’nin gelecekte “yeşil büyümeye” odaklı, dirençli bir ekonomik yapıya bürünmesini amaçlamaktadır. Enerji sektörünün bu dönüşümdeki rolü stratejik olarak tanımlanmış, özellikle hidrojen ve türev yakıtların bölgesel kalkınmaya sağlayacağı katkılar ön plana çıkarılmıştır.

4.2. GZFT Analizi

Bu bölümde Güney Marmara bölgesini temel alan GZFT analizi sonuçları sunulmaktadır.

4.2.1. Giriş

Enerji dönüşümünün küresel ölçekte önem kazandığı günümüzde hidrojen, temiz, taşınabilir ve çok yönlü bir enerji taşıyıcısı olarak stratejik önem kazanmıştır. Enerji dönüşümde bölgelerin enerji üretim kapasiteleri, altyapı yeterlilikleri ve teknolojik yetkinlikleri belirleyici faktörler arasında yer almaktadır. Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde ise bölgesel inisiyatifler, ulusal enerji politikalarının etkinliğini doğrudan şekillendirmektedir. Bu bağlamda

Güney Marmara Bölgesi, sahip olduğu enerji çeşitliliği, sanayi kapasitesi ve liman altyapısı ile hidrojen temelli dönüşüm için iyi bir altyapı sunmaktadır. Hidrojen Vadisi girişimi ise bu potansiyelin sistematik, bütünleşik ve sürdürülebilir bir biçimde değerlendirilmesini amaçlayan bölgesel bir vizyon olarak öne çıkmaktadır.

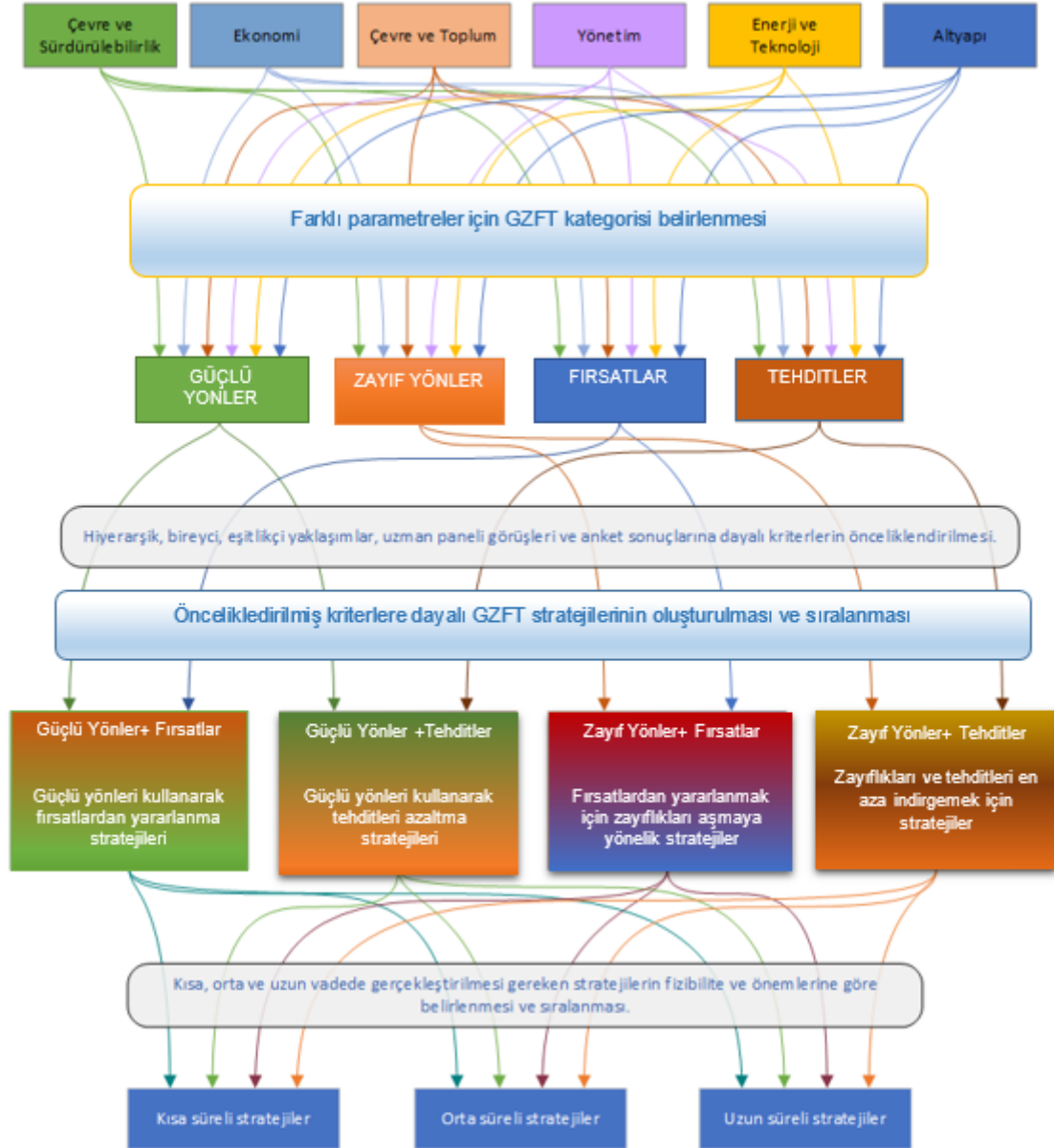
Güney Marmara, Türkiye'nin toplam elektrik üretiminde %12'lik bir paya sahiptir. Bölge, tükettiğinden fazla yenilenebilir enerji üretmektedir. 2 GW'ya yaklaşan kurulu yenilenebilir enerji kapasitesi; rüzgâr, güneş, biyogaz ve jeotermal kaynaklara dayanmaktadır [92]. Bu enerji kaynakları, yeşil hidrojen üretimi için kritik önemdedir. Yeşil hidrojenin düşük emisyon ile elektriği kimyasal formda depolama kapasitesi, özellikle aralıklı üretim yapan rüzgâr ve güneş sistemleriyle entegrasyonunu stratejik hale getirmektedir. Güney Marmara Bölgesi bu açıdan Türkiye'nin yeşil hidrojen üretiminde merkez üslerinden biri olabilir.

Bölgenin yenilenebilir kaynaklara dayalı enerji üretimi kadar önemli bir diğer avantajı ise mevcut sanayi altyapısıdır. Balıkesir'de yürütülen rüzgâr türbini jeneratör ve nacelle üretimine yönelik sanayi faaliyetleri hidrojen teknolojilerinde kullanılabilecek sistem bileşenlerinin de bölgesel olarak üretilebileceğini göstermektedir [93]. Hidrojen üretimi için gereken elektrolizörler, kompresör sistemleri ve basınçlı tanklar gibi unsurların yerleştirilmesi, dışa bağımlılığı azaltacak ve ekonomik değer yaratacaktır.

Sosyo-ekonomik etkiler açısından bakıldığında Hidrojen Vadisi projesi, yalnızca enerji alanında değil, genel bölgesel kalkınma sürecinde de önem arz etmektedir. Hidrojen teknolojilerinin gelişimi, yeni meslek kollarının doğmasına, yüksek katma değerli üretim modellerinin yaygınlaşmasına ve bölgenin uluslararası yatırım çekiciliğinin artmasına katkı sunacaktır. Ayrıca Türkiye'nin iklim hedeflerine ulaşmasında Güney Marmara Bölgesi'nin örnek bir dönüşüm modeli sunması mümkündür. Enerji arz güvenliğini güçlendirmesi, karbon emisyonlarını azaltması ve çevre dostu üretimin teşvik etmesi, projenin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle örtüştüğünü göstermektedir.

Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA), 2024-2028 dönemini kapsayan bölge planında yenilenebilir enerji teknolojilerinin destekleneceğini açıkça beyan etmiştir. Enerji üretiminde çeşitlilik ve temiz kaynak kullanımı öncelikli hedefler arasında gösterilmektedir [94]. Bu plan doğrultusunda Hidrojen Vadisi Projesi, Ajans koordinasyonunda üniversiteler, organize sanayi bölgeleri, enerji şirketleri ve yerel yönetimlerin ortak çalışmasıyla hayata geçirilmiştir. Üniversitelerin sağlayacağı bilimsel ve teknolojik destek, sanayi kuruluşlarının üretim altyapısı ve yatırım iştahı, kamu kurumlarının düzenleyici desteği ile bütüncül bir ekosistem kurulabilir. Sonuç olarak, Güney Marmara Bölgesi, mevcut altyapısı, doğal kaynakları ve kurumsal kapasitesi ile Türkiye'nin hidrojen dönüşümünde öncü rol üstlenebilecek durumdadır. Hidrojen Vadisi vizyonu sadece enerji arzını çeşitlendirmekle kalmayacak; aynı zamanda bölgeyi ileri teknolojilerde uzmanlaşmış, yüksek ihracat potansiyeli taşıyan, sürdürülebilir bir üretim üssüne dönüştürecektir. Bu doğrultuda, bölgenin hidrojen temelli dönüşüm kapasitesi bir fırsat değil, stratejik bir gereklilik olarak ele alınmalıdır.

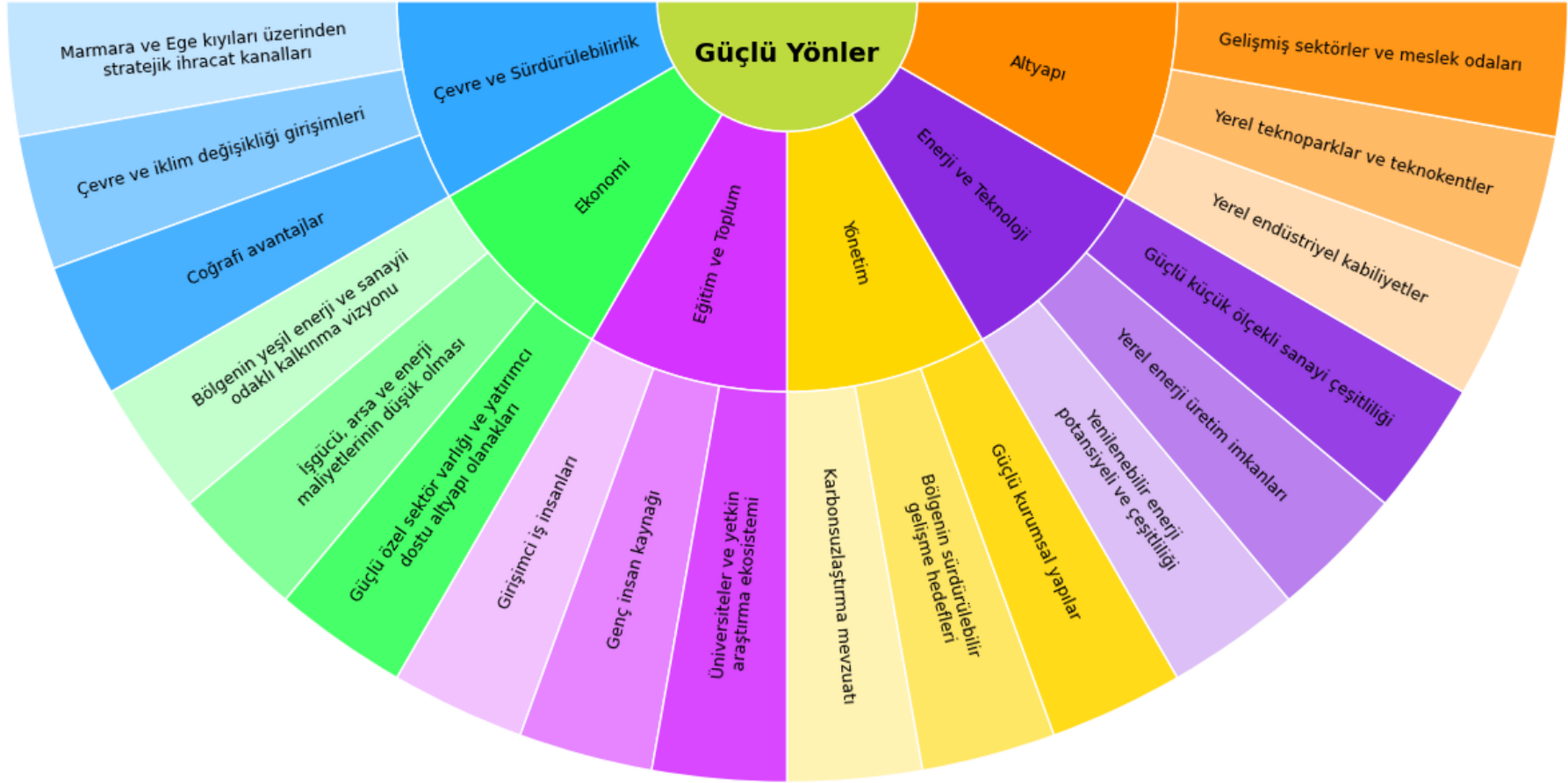
Bu kapsamda, Güney Marmara'da yer alan Hidrojen Vadisi'nin yol haritası dökümanı için GZFT analizi gerçekleştirilmiştir. GZFT analizi, Güney Marmara Bölgesi'nin mevcut güçlü ve zayıf yönlerinin belirlenmesini, dış çevrede ortaya çıkan fırsat ve tehditlerin sistematik biçimde değerlendirilmesini ve böylece uygulanabilir, gerçekçi ve önceliklendirilmiş stratejilerin geliştirilmesini amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında elde edilen analiz bulguları, bölgesel aktörlerin karar destek süreçlerine katkı sunmanın yanı sıra, kamu politikaları, yatırım planlaması ve sanayi iş birlikleri açısından da yön gösterici niteliktedir. Ayrıca analiz çıktıları, Güney Marmara Hidrojen Vadisi Yol Haritasının dinamik yapısını destekleyecek stratejik önerilerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.



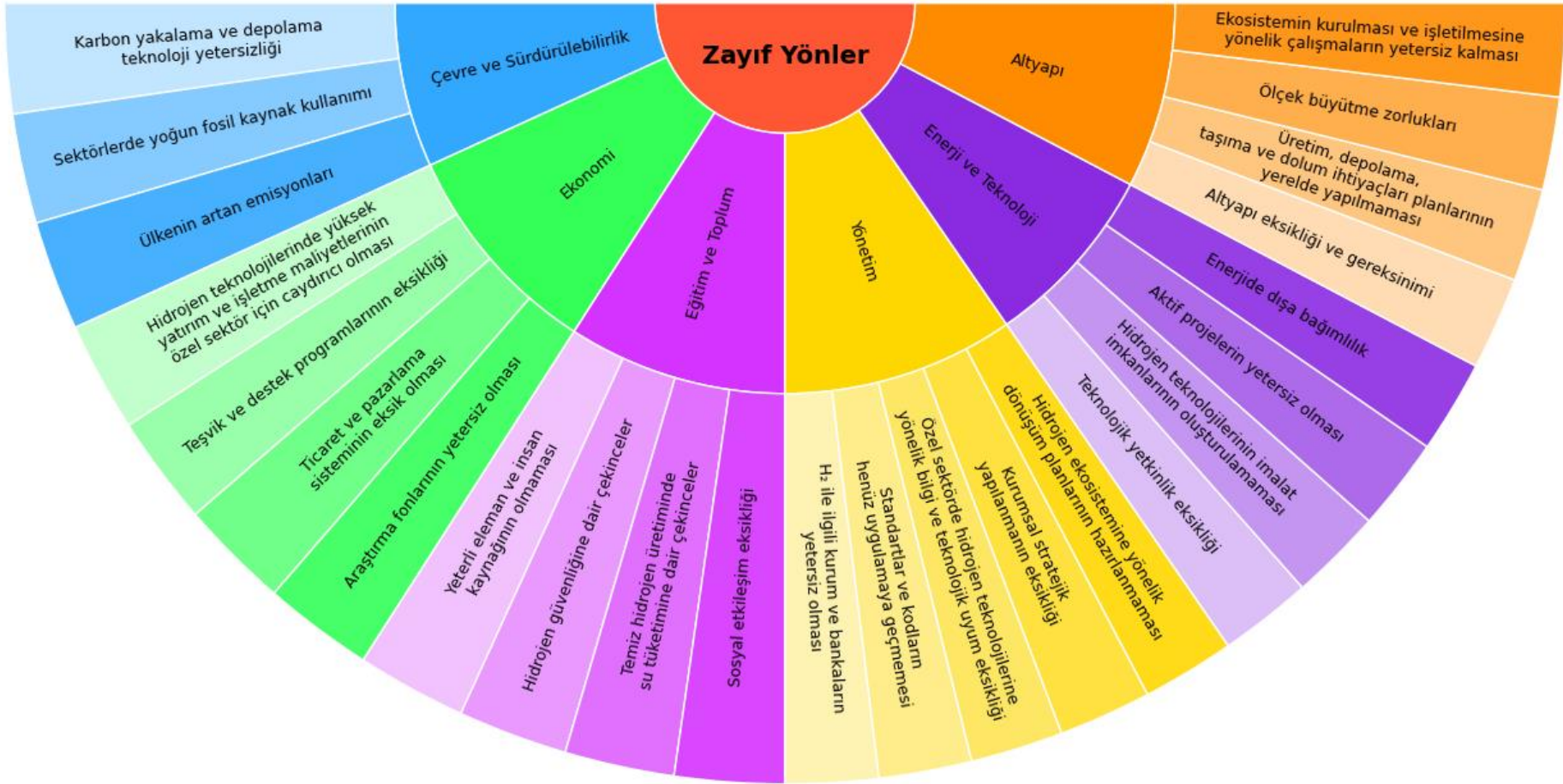
Şekil 6.Çalışmada İzlenen Metodoloji

4.2.2. GZFT Matrisi

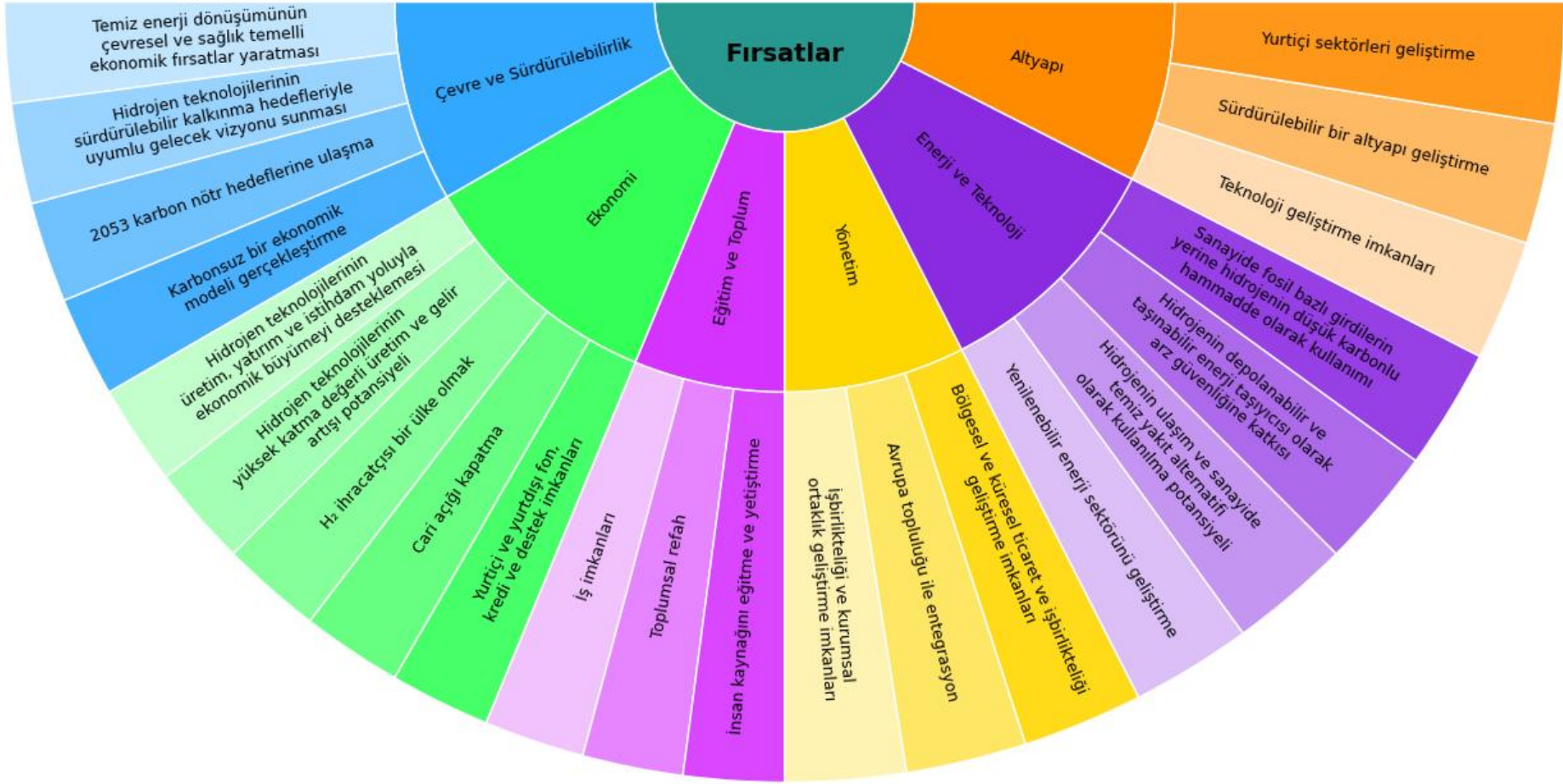
GZFT analizi kapsamında Güney Marmara Bölgesi'nin iç ve dış çevresel faktörlerini değerlendirmek amacıyla çok kriterli karar verme yöntemleriyle bütünleştirilerek uygulanmıştır. GZFT'un her bir ana kategorisi (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar, Tehditler) altı tematik alt kümeye (çevre, ekonomi, eğitim-toplum, yönetim, enerji-teknoloji, altyapı) ayrılmış ve toplamda 90 kriter değerlendirilmiştir. Farklı stratejik perspektifleri yansıtmak amacıyla eşitlikçi, hiyerarşik, bireyselci, eşit ağırlıklı, anket ve panel temelli ağırlıklandırma yaklaşımları benimsenmiş; bu yaklaşımlar, kriterlerin önem derecelerini belirlemede kullanılmıştır. Belirsizlikleri daha etkin temsil edebilmek için üçgen bulanık sayılarla ifade edilen katılımcı değerlendirmeleri, durulaştırma yöntemiyle tekil sayısal değerlere dönüştürülmüş ve normalize edilerek çok kriterli karar modellerinde kullanılmak üzere göreceli önem katsayıları elde edilmiştir. Çalışma kapsamında izlenen metodoloji Şekil 66'da sunulmuştur. Çalışma kapsamında belirlenen güçlü yanlar, zayıf yanlar, fırsatlar ve tehditler sırasıyla Şekil 77, Şekil 88, Şekil 99 ve Şekil 1010'da sunulmuştur.



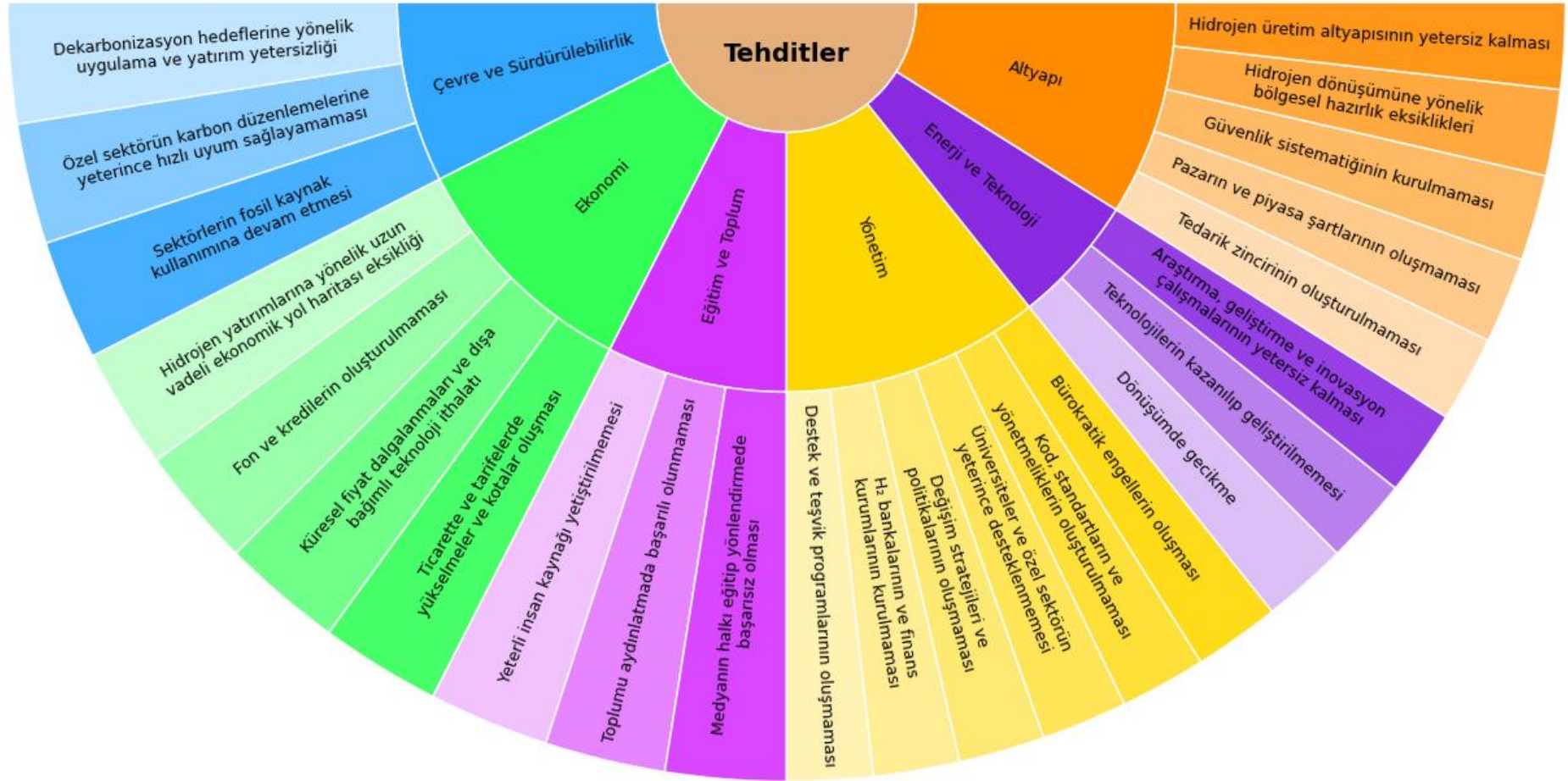
Şekil 7. Güney Marmara Bölgesi Güçlü Yanlar, Alt Kategoriler Ve Kriterleri



Şekil 8. Güney Marmara Bölgesi Zayıf Yanlar, Alt Kategoriler Ve Kriterleri



Şekil 9. Güney Marmara Bölgesi Fırsatlar, Alt Kategoriler Ve Kriterleri



Şekil 10. Güney Marmara Bölgesi Tehditler, Alt Kategoriler Ve Kriterleri

Stratejik planlamada GZFT analizinin en önemli katkısı, yalnızca unsurların tanımlanmasıyla sınırlı kalmayıp, bu unsurların birbirleriyle ilişkilendirilmesi yoluyla strateji geliştirme sürecine doğrudan zemin oluşturmasıdır. Bu bağlamda, G-F (güçlü yön–fırsat), Z-F (zayıf yön–fırsat), G-T (güçlü yön–tehdit) ve Z-T (zayıf yön–tehdit) stratejileri gibi çapraz analizler, somut ve uygulanabilir yönlendirmeler sağlamaktadır.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan GZFT matrisi, Güney Marmara Bölgesi için hidrojenin stratejik konumunu daha iyi kavrayabilmek, riskleri yönetebilmek ve fırsatlardan azami düzeyde yararlanabilmek amacıyla yapılandırılmıştır. GZFT için tanımlanmış olan alt kategoriler ve kriterler Tablo 2’de sunulmuştur. Grafiklerde kolay ifade edilebilmesi için her bir kritere bir kod ataması yapılmıştır. Güçlü Yönler (S), Fırsatlar (O), Zayıf Yönler (W), Tehditler (T) olarak ifade edilirken, alt kategoriler ise Çevre ve Sürdürülebilirlik (ÇS), Ekonomi (E), Eğitim ve Toplum (ET), Yönetim (Y), Enerji ve Teknoloji (EnT), Altyapı (A) olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2. GZFT Kategorileri, Alt Kategorileri Ve Tanımlanan Kriterler

Kategori	Alt Kategori	Kod	Kriter
Güçlü Yönler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	S-ÇS-1	Marmara ve Ege kıyıları üzerinden stratejik ihracat kanalları
Güçlü Yönler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	S-ÇS-2	Çevre ve iklim değişikliği girişimleri
Güçlü Yönler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	S-ÇS-3	Coğrafi avantajlar
Güçlü Yönler	Ekonomi	S-E-4	Bölgenin yeşil enerji ve sanayii odaklı kalkınma vizyonu
Güçlü Yönler	Ekonomi	S-E-5	İşgücü, arsa ve enerji maliyetlerinin düşük olması
Güçlü Yönler	Ekonomi	S-E-6	Güçlü özel sektör varlığı ve yatırımcı dostu altyapı olanakları
Güçlü Yönler	Eğitim ve Toplum	S-ET-7	Girişimci iş insanları
Güçlü Yönler	Eğitim ve Toplum	S-ET-8	Genç insan kaynağı
Güçlü Yönler	Eğitim ve Toplum	S-ET-9	Üniversiteler ve yetkin araştırma ekosistemi
Güçlü Yönler	Yönetim	S-Y-10	Karbonsuzlaştırma mevzuatı
Güçlü Yönler	Yönetim	S-Y-11	Bölgenin sürdürülebilir gelişme hedefleri
Güçlü Yönler	Yönetim	S-Y-12	Güçlü kurumsal yapılar
Güçlü Yönler	Enerji ve Teknoloji	S-EnT-13	Yenilenebilir enerji potansiyeli ve çeşitliliği
Güçlü Yönler	Enerji ve Teknoloji	S-EnT-14	Yerel enerji üretim imkanları
Güçlü Yönler	Enerji ve Teknoloji	S-EnT-15	Güçlü küçük ölçekli sanayi çeşitliliği
Güçlü Yönler	Altyapı	S-A-16	Yerel endüstriyel kabiliyetler
Güçlü Yönler	Altyapı	S-A-17	Yerel teknoparklar ve teknokentler
Güçlü Yönler	Altyapı	S-A-18	Gelişmiş sektörler ve meslek odaları
Zayıf Yönler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	W-ÇS-1	Karbon yakalama ve depolama teknoloji yetersizliği
Zayıf Yönler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	W-ÇS-2	Sektörlerde yoğun fosil kaynak kullanımı
Zayıf Yönler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	W-ÇS-3	Ülkenin artan emisyonları

Kategori	Alt Kategori	Kod	Kriter
Zayıf Yönler	Ekonomi	W-E-4	Hidrojen teknolojilerinde yüksek yatırım ve işletme maliyetlerinin özel sektör için caydırıcı olması
Zayıf Yönler	Ekonomi	W-E-5	Teşvik ve destek programlarının eksikliği
Zayıf Yönler	Ekonomi	W-E-6	Ticaret ve pazarlama sisteminin eksik olması
Zayıf Yönler	Ekonomi	W-E-7	Araştırma fonlarının yetersiz olması
Zayıf Yönler	Eğitim ve Toplum	W-ET-8	Yeterli eleman ve insan kaynağının olmaması
Zayıf Yönler	Eğitim ve Toplum	W-ET-9	Hidrojen güvenliğine dair çekinceler
Zayıf Yönler	Eğitim ve Toplum	W-ET-10	Temiz hidrojen üretiminde su tüketimine dair çekinceler
Zayıf Yönler	Eğitim ve Toplum	W-ET-11	Sosyal etkileşim eksikliği
Zayıf Yönler	Yönetim	W-Y-12	H ₂ ile ilgili kurum ve bankaların yetersiz olması
Zayıf Yönler	Yönetim	W-Y-13	Standartlar ve kodların henüz uygulamaya geçmemesi
Zayıf Yönler	Yönetim	W-Y-14	Özel sektörde hidrojen teknolojilerine yönelik bilgi ve teknolojik uyum eksikliği
Zayıf Yönler	Yönetim	W-Y-15	Kurumsal stratejik yapılanmanın eksikliği
Zayıf Yönler	Yönetim	W-Y-16	Hidrojen ekosistemine yönelik dönüşüm planlarının hazırlanmaması
Zayıf Yönler	Enerji ve Teknoloji	W-EnT-17	Teknolojik yetkinlik eksikliği
Zayıf Yönler	Enerji ve Teknoloji	W-EnT-18	Hidrojen teknolojilerinin imalat imkanlarının oluşturulamaması
Zayıf Yönler	Enerji ve Teknoloji	W-EnT-19	Aktif projelerin yetersiz olması
Zayıf Yönler	Enerji ve Teknoloji	W-EnT-20	Enerjide dışa bağımlılık
Zayıf Yönler	Altyapı	W-A-21	Altyapı eksikliği ve gereksinimi
Zayıf Yönler	Altyapı	W-A-22	Üretim, depolama, taşıma ve dolun ihtiyaçları planlarının yerelde yapılmaması
Zayıf Yönler	Altyapı	W-A-23	Ölçek büyütme zorlukları
Zayıf Yönler	Altyapı	W-A-24	Ekosistemin kurulması ve işletilmesine yönelik çalışmaların yetersiz kalması
Fırsatlar	Çevre ve Sürdürülebilirlik	O-ÇS-1	Temiz enerji dönüşümünün çevresel ve sağlık temelli ekonomik fırsatlar yaratması
Fırsatlar	Çevre ve Sürdürülebilirlik	O-ÇS-2	Hidrojen teknolojilerinin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu gelecek vizyonu sunması
Fırsatlar	Çevre ve Sürdürülebilirlik	O-ÇS-3	2053 karbon nötr hedeflerine ulaşma
Fırsatlar	Çevre ve Sürdürülebilirlik	O-ÇS-4	Karbonsuz bir ekonomik modeli gerçekleştirme
Fırsatlar	Ekonomi	O-E-5	Hidrojen teknolojilerinin üretim, yatırım ve istihdam yoluyla ekonomik büyümeyi desteklemesi
Fırsatlar	Ekonomi	O-E-6	Hidrojen teknolojilerinin yüksek katma değerli üretim ve gelir artışı potansiyeli
Fırsatlar	Ekonomi	O-E-7	H ₂ ihracatçısı bir ülke olmak
Fırsatlar	Ekonomi	O-E-8	Cari açığı kapatma
Fırsatlar	Ekonomi	O-E-9	Yurtiçi ve yurtdışı fon, kredi ve destek imkanları
Fırsatlar	Eğitim ve Toplum	O-ET-10	İş imkanları
Fırsatlar	Eğitim ve Toplum	O-ET-11	Toplumsal refah
Fırsatlar	Eğitim ve Toplum	O-ET-12	İnsan kaynağını eğitime ve yetiştirme
Fırsatlar	Yönetim	O-Y-13	İşbirlikliliği ve kurumsal ortaklık geliştirme imkanları
Fırsatlar	Yönetim	O-Y-14	Avrupa topluluğu ile entegrasyon
Fırsatlar	Yönetim	O-Y-15	Bölgesel ve küresel ticaret ve işbirlikliliği geliştirme imkanları
Fırsatlar	Enerji ve Teknoloji	O-EnT-16	Yenilenebilir enerji sektörünü geliştirme
Fırsatlar	Enerji ve Teknoloji	O-EnT-17	Hidrojenin ulaşım ve sanayide temiz yakıt alternatifi olarak kullanılma potansiyeli
Fırsatlar	Enerji ve Teknoloji	O-EnT-18	Hidrojenin depolanabilir ve taşınabilir enerji taşıyıcısı olarak arz güvenliğine katkısı

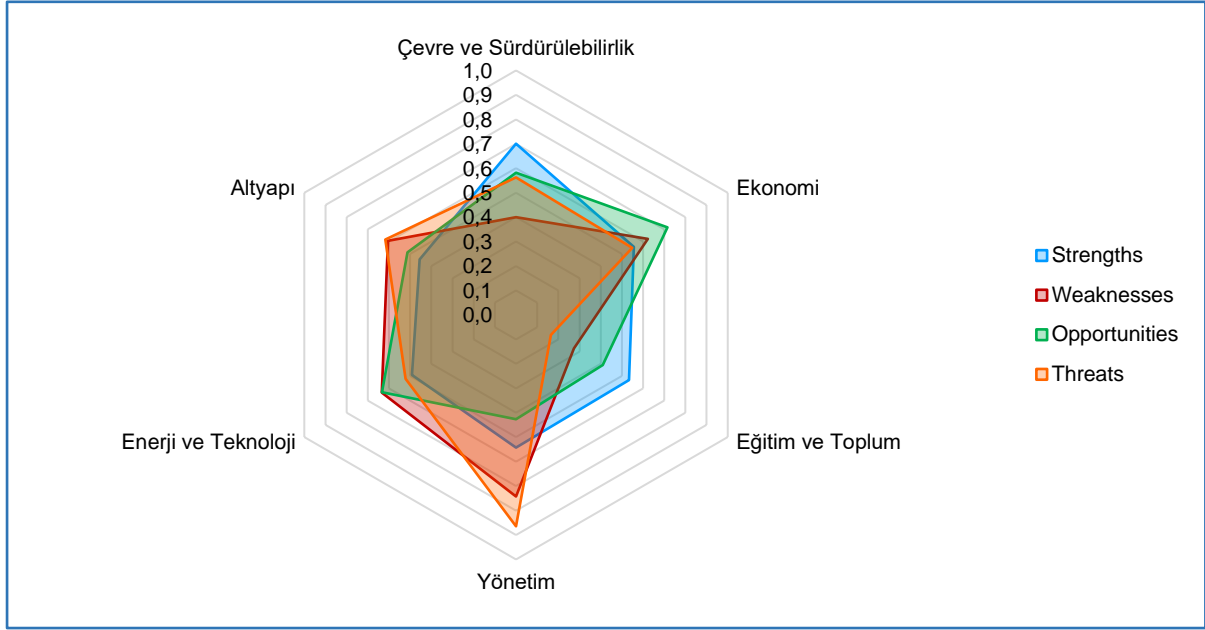
Kategori	Alt Kategori	Kod	Kriter
Fırsatlar	Enerji ve Teknoloji	O-EnT-19	Sanayide fosil bazlı girdilerin yerine hidrojenin düşük karbonlu hammadde olarak kullanımı
Fırsatlar	Altyapı	O-A-20	Teknoloji geliştirme imkanları
Fırsatlar	Altyapı	O-A-21	Sürdürülebilir bir altyapı geliştirme
Fırsatlar	Altyapı	O-A-22	Yurtiçi sektörleri geliştirme
Tehditler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	T-ÇS-1	De karbonizasyon hedeflerine yönelik uygulama ve yatırım yetersizliği
Tehditler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	T-ÇS-2	Özel sektörün karbon düzenlemelerine yeterince hızlı uyum sağlayamaması
Tehditler	Çevre ve Sürdürülebilirlik	T-ÇS-3	Sektörlerin fosil kaynak kullanımına devam etmesi
Tehditler	Ekonomi	T-E-4	Hidrojen yatırımlarına yönelik uzun vadeli ekonomik yol haritası eksikliği
Tehditler	Ekonomi	T-E-5	Fon ve kredilerin oluşturulmaması
Tehditler	Ekonomi	T-E-6	Küresel fiyat dalgalanmaları ve dışa bağımlı teknoloji ithalatı
Tehditler	Ekonomi	T-E-7	Ticarette ve tarifelerde yükselmeler ve kotalar oluşması
Tehditler	Eğitim ve Toplum	T-ET-8	Yeterli insan kaynağı yetiştirilmemesi
Tehditler	Eğitim ve Toplum	T-ET-9	Toplumu aydınlatmada başarılı olunmaması
Tehditler	Eğitim ve Toplum	T-ET-10	Medyanın halkı eğitip yönlendirmede başarısız olması
Tehditler	Yönetim	T-Y-11	Destek ve teşvik programlarının oluşmaması
Tehditler	Yönetim	T-Y-12	H ₂ bankalarının ve finans kurumlarının kurulmaması
Tehditler	Yönetim	T-Y-13	Değişim stratejileri ve politikalarının oluşmaması
Tehditler	Yönetim	T-Y-14	Üniversiteler ve özel sektörün yeterince desteklenmemesi
Tehditler	Yönetim	T-Y-15	Kod, standartların ve yönetmeliklerin oluşturulmaması
Tehditler	Yönetim	T-Y-16	Bürokratik engellerin oluşması
Tehditler	Enerji ve Teknoloji	T-EnT-17	Dönüşümde gecikme
Tehditler	Enerji ve Teknoloji	T-EnT-18	Teknolojilerin kazanılıp geliştirilmemesi
Tehditler	Enerji ve Teknoloji	T-EnT-19	Araştırma, geliştirme ve inovasyon çalışmalarının yetersiz kalması
Tehditler	Altyapı	T-A-20	Tedarik zincirinin oluşturulmaması
Tehditler	Altyapı	T-A-21	Pazarın ve piyasa şartlarının oluşmaması
Tehditler	Altyapı	T-A-22	Güvenlik sistematığının kurulmaması
Tehditler	Altyapı	T-A-23	Hidrojen dönüşümüne yönelik bölgesel hazırlık eksiklikleri
Tehditler	Altyapı	T-A-24	Hidrojen üretim altyapısının yetersiz kalması

4.2.3. GZFT Unsurlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde anketlerden ve farklı ağırlıklandırma yaklaşımları ile elde edilen sonuçlar incelenecektir.

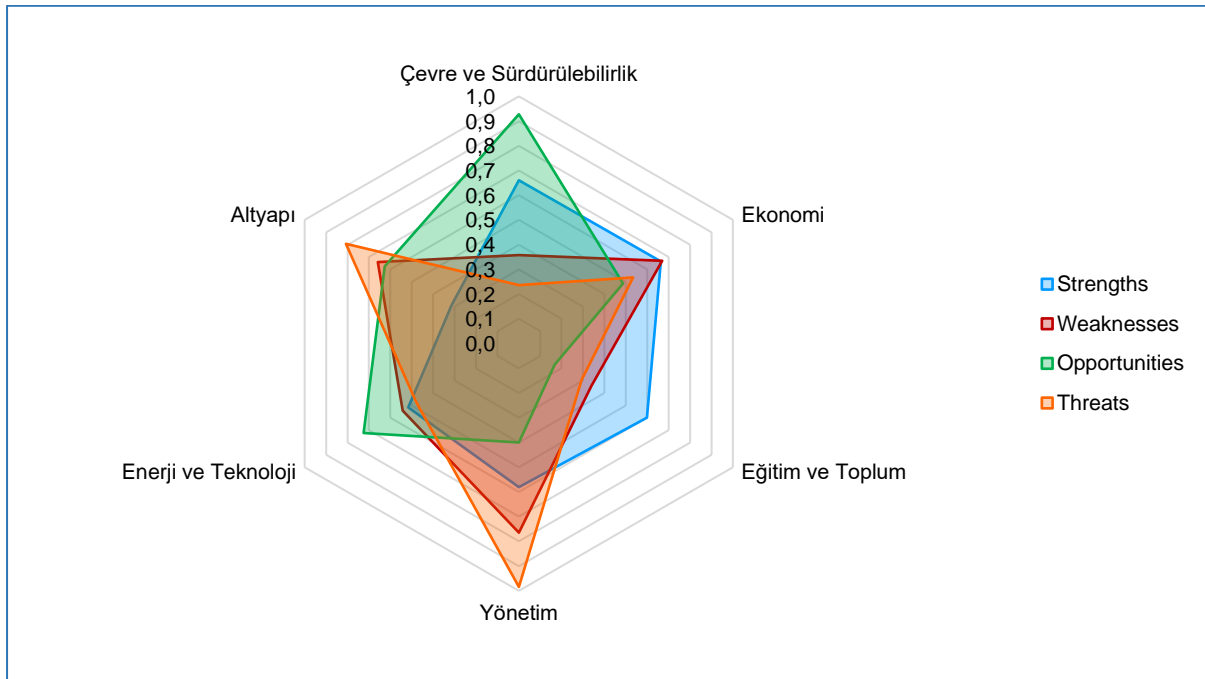
Kategorilerin Değerlendirilmesi

GZFT analizine dayalı stratejik değerlendirmeler, karar vericilere yön belirlemede, zayıf ve güçlü yönlerin tanımlanmasında, fırsatların etkin kullanılmasında ve tehditlerin bertaraf edilmesinde kapsamlı bir çerçeve sunar. Kategoriler değerlendirilirken panel ve anket sonuçları baz alınmıştır. Panel sonuçları, hidrojen alanında akademik çalışma yapan uzman bir kadro ile tartışılarak elde edilmiştir. Panel çalışması yapılırken anket çalışmasına göre daha spesifik ve alanında uzman bir kadronun görüşünün alınması hedeflenmiştir. Panel çalışması sonucunda elde edilen çarpan değerleri Şekil 1111'de sunulmuştur.



Şekil 11. Panel Çalışmasına Göre Alt Kategorilerin Normalize Edilmiş Çarpan Değerleri

Sektörün önde gelen kişileri ile yapılan anketler sonucunda elde edilen alt kategori katsayıları normalize edilerek Şekil 12’de sunulmuştur. Buna göre, altı temel alt kategoriye dair çevresel, ekonomik, toplumsal ve kurumsal faktörlerin anket yoluyla ağırlıklandırılarak ölçüldüğü bir değerlendirme elde edilmiştir. Bu kapsamda, çevre ve sürdürülebilirlik, ekonomi, eğitim ve toplum, yönetim, enerji ve teknoloji ile altyapı kategorilerinin her biri GZFT dörtlemesi çerçevesinde incelenmiş, her birinin stratejik potansiyeli ve risk seviyesi analiz edilmiştir.



Şekil 12. Anket Sonuçlarına Göre Alt Kategorilerin Normalize Edilmiş Çarpan Değerleri

Çevre ve sürdürülebilirlik kategorisi, analizde en güçlü performansı sergileyen başlık olarak öne çıkmaktadır. Güçlü yönlerde maksimum puan alması, bu alanda bölgesel potansiyelin yüksek olduğunu ve mevcut kaynakların etkin kullanıldığını göstermektedir. Aynı şekilde

fırsatların neredeyse tam puana yakın olması, çevre politikaları, yeşil ekonomi ve sürdürülebilir kalkınma gibi kavramların hem yerel hem de ulusal düzeyde destek bulunduğunu ortaya koymaktadır. Zayıf yönlerin çok düşük ve tehditlerin sıfır olması, çevresel konuların hem içsel hem de dışsal açıdan stratejik avantaj sağladığını belirtmektedir. Bu durum, çevre ve sürdürülebilirlik konusunun stratejik yatırımlar açısından düşük riskli, yüksek getirili bir alan olduğuna işaret etmektedir.

Ekonomi kategorisi ise daha karmaşık bir tablo sunmaktadır. Fırsat açısından en yüksek puana sahip olmasına rağmen, zayıflık ve tehdit boyutlarında yüksek skorlar elde edilmiştir. Bu durum, ekonominin dönüşüm potansiyeli taşıyan ancak yapısal sorunlarla mücadele eden bir alan olduğunu göstermektedir. Zayıf yönlerin yüksekliği, iş gücü niteliği, yatırım ortamının sınırlılığı veya ekonomik çeşitliliğin yetersizliği gibi sorunlara işaret edebilmektedir. Tehditlerin orta-yüksek seviyede olması, dış kaynaklı etkilere karşı kırılganlık, rekabet baskısı ve enflasyon gibi makroekonomik risklerin algılandığını göstermektedir. Tüm bunlara rağmen fırsatların yüksek olması, ekonomide iyileşmeye açık güçlü bir zemin olduğunu ve uygun politikalarla önemli kazanımlar sağlanabileceğini göstermektedir.

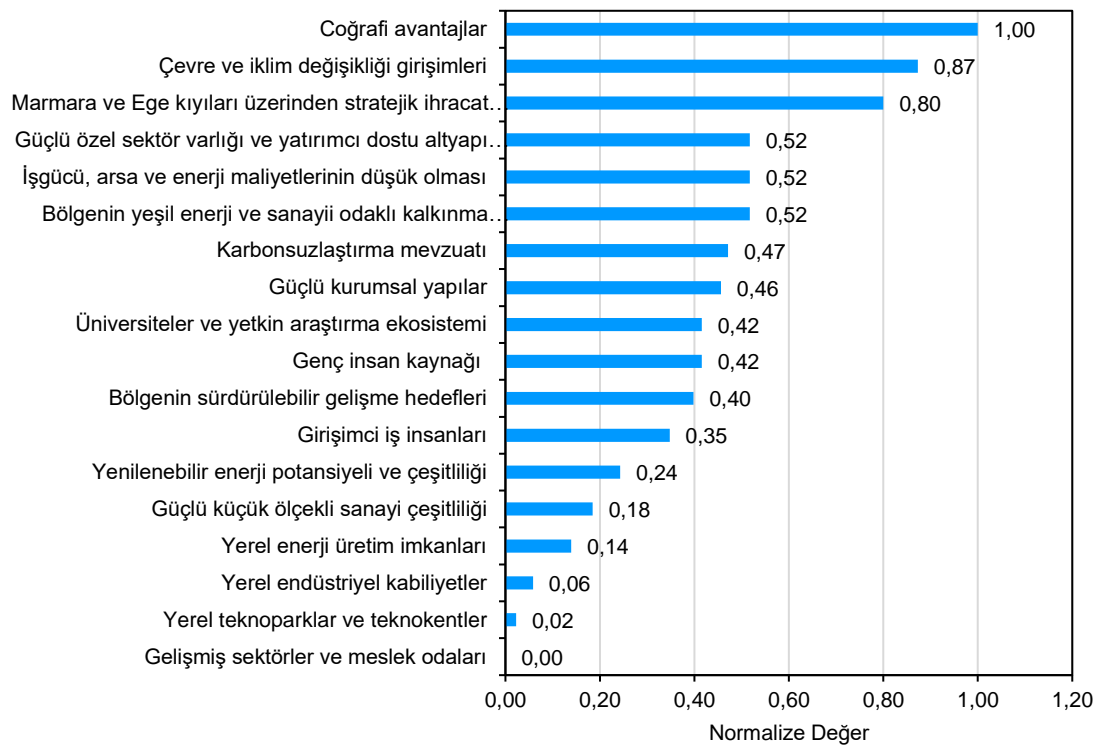
Eğitim ve toplum başlığı ise GZFT bileşenleri arasında en düşük ağırlıklara sahip olan kategoridir. Hem güçlü yönler hem fırsatlar açısından zayıf bir görünüm sunan bu kategori, stratejik belgelerde önceliklendirilmeyen veya görünür olmayan bir alanı temsil ediyor olabilir. Zayıf yönlerin ve tehditlerin neredeyse yok sayılması olumlu bir durum gibi görünse de aslında bu alanda yeterli veri, ilgi ya da farkındalığın bulunmaması gibi bir sorunun da göstergesi olabilir. Eğitim ve toplumsal gelişim, diğer tüm kategorilerin başarısını doğrudan etkileyen bir yapı taşıdır. Dolayısıyla bu alandaki eksikliklerin yalnızca bu kategoriye değil, tüm sistemin verimliliğine dolaylı zarar vereceği unutulmamalıdır.

Yönetim kategorisi ise tehditler ve zayıflıklar açısından en yüksek skoru alarak dikkat çekmektedir. Bu durum, kurumsal kapasite eksikliklerini, yönetim açıklarını, politika uyumsuzluklarını veya karar alma süreçlerindeki gecikmelere işaret etmektedir. Hem içsel hem dışsal risklerin bu denli yüksek algılanması, yönetim alanında yapısal reform ihtiyacına işaret etmektedir. Güçlü yönlerin ve fırsatların düşük seviyede kalması da mevcut durumda stratejik hareket alanının kısıtlı olduğunu göstermektedir. Yönetim kategorisi, GZFT matrisinin zayıf yönler-tehditler (Z-T) stratejilerine göre önceliklendirilmesi gereken bir alandır. Reform, kapasite geliştirme, yasal çerçeve güncellemesi ve enerji alanında yönetsel mekanizmaların güçlendirilmesi gibi uygulamalar bu alanda öncelik kazanmalıdır.

Enerji ve teknoloji kategorisi fırsat bakımından yüksek, ancak güçlü yönler bakımından oldukça zayıf bir profil çizmektedir. Bu durum, bölgede enerji geçişine ve teknolojik dönüşüme yönelik ciddi bir potansiyelin olduğunu fakat mevcut kapasitenin bu fırsatları değerlendirme konusunda yetersiz kaldığını göstermektedir. Zayıflıkların orta seviyede olması teknik altyapı, beşeri sermaye veya finansmana erişim sorunlarını işaret etmektedir. Aynı şekilde tehditlerin de belirgin seviyede olması, bu alanda ilerleme sağlanabilmesi için etkin politikaların hayata geçirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu kategori için stratejiler, mevcut fırsatları değerlendirme ve zayıflıkları azaltma odaklı olmalıdır. Üniversite-sanayi iş birlikleri, Ar-Ge yatırımları, temiz enerji projeleri ve teknoloji transfer mekanizmaları bu amaca hizmet edebilir. Altyapı kategorisi GZFT matrisinde en düşük güçlü yön skoruna sahiptir. Güçlü yönlerin düşük puan alması olması, mevcut altyapının yetersizliğini ve stratejik destekten uzak olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, zayıf yönler ve tehditlerin oldukça yüksek olması altyapı alanının risk taşıyan ve acil müdahale gerektiren bir konu olduğunu ortaya koymaktadır. Hidrojen teknolojileri için gerekli olan altyapının gelişmemiş olması, diğer tüm stratejik kategorileri olumsuz yönde etkileyen bir çarpan etkisi yaratabilir. Bu nedenle, altyapı yalnızca kendi başına değil, ekonomiden eğitime kadar geniş bir alanı etkileyen stratejik bir zemin olarak değerlendirilmelidir. Bu alanda temel yatırım öncelikleri belirlenmeli, kamu-özel sektör ortaklıklarıyla çözüm üretmeye yönelik uzun vadeli planlar yapılmalıdır.

Kriterlerin değerlendirilmesi

Uzman paneli puanlaması ile elde edilen güçlü yönler grafiği Şekil 13'te verilmiştir. En yüksek puana sahip olan kriter Coğrafi avantajlar (S-ÇS-3) olarak belirlenmiştir, Güney Marmara Bölgesi'nin sahip olduğu coğrafi özelliklerin en baskın güçlü yön olduğu anlaşılmaktadır. Bölgenin jeostratejik konumu, ulaşım koridorlarına yakınlığı ve doğal yapısının uygunluğu gibi unsurlar, hem ekonomik faaliyetler hem de enerji altyapısı açısından benzersiz fırsatlar sunmaktadır. Özellikle çok modlu ulaşım, dış ticaret ve enerji transferi gibi konularda coğrafi yapı önemli bir işlev görmektedir. Bu bağlamda, Balıkesir ve Çanakkale illerinden geçen ve Azerbaycan gazını Türkiye üzerinden Avrupa'ya taşıyan Trans-Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı (TANAP) bölgenin enerji lojistiği açısından merkezi bir konumda olduğunu göstermektedir. Ayrıca bölgedeki mevcut doğal gaz altyapısının, yeşil hidrojenin doğal gaz ile birlikte taşınması gibi karbon azaltım hedeflerine yönelik dönüşümlere de uygun bir temel sunduğu değerlendirilmektedir. Bu hatlar, ileride hidrojen karışımı veya saf hidrojen taşıma senaryoları için yeniden amaçlandırılabilir nitelikte olup, bölgenin hidrojen vadisi gelişimi açısından ciddi bir altyapı avantajı teşkil etmektedir. Coğrafi avantajlar kriterini çevre ve iklim değişikliği girişimleri (S-ÇS-2) ve Marmara ve Ege kıyıları üzerinden stratejik ihracat kanalları (S-ÇS-1) takip etmektedir. Bu üç kriterin yüksek puanlanması, Güney Marmara'nın hidrojen teknolojileri için fiziksel, çevresel ve jeopolitik olarak önemli bir avantaja sahip olduğunu göstermektedir. Bölgenin ihracat potansiyeli, iklim odaklı politika uyumu ve stratejik konumu, yatırımcılar ve politika yapıcılar için belirleyici etkenler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, hidrojen vadisi kurgusunun altyapısal olarak güçlü bir zemin üzerine inşa edilebileceğine işaret ederken aynı zamanda bölgenin karbon nötr hedefleriyle uyumlu ilerleyebileceğini de göstermektedir.



Şekil 13. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Güçlü Yönler

Orta düzeyde normalize edilmiş değerlere sahip kriterler arasında *yeşil enerji ve sanayii odaklı kalkınma vizyonu (S-E-4)*, *işgücü, arsa ve enerji maliyetlerinin düşük olması (S-E-5)*, *özel sektör ve altyapı olanakları (S-E-6)* ile *karbonsuzlaştırma mevzuatı (S-Y-10)* ve *kurumsal yapılar (S-Y-12)* gibi yönetim ve ekonomik faktörler yer almaktadır. Ayrıca *üniversiteler ve araştırma ekosistemi (S-ET-9)* ile *genç insan kaynağı (S-ET-8)* gibi insan kaynağına ilişkin

unsurlar da bu grupta yer almaktadır. Bu göstergeler, bölgenin mevcut kapasitesinin gelişmeye açık ancak belirli yapısal destek ve planlama ile stratejik seviyeye taşınabileceğini göstermektedir. Yönetişim altyapısı, kalkınma vizyonu ve beşeri sermaye açısından mevcut potansiyel dikkat çekici olsa da, bu unsurların daha fazla entegre edilerek somut çıktılara dönüştürülmesi gereklidir.

Düşük normalize puanlara sahip kriterler ise daha çok yerel düzeydeki sektörel kapasite ve kurumsal yapılara işaret etmektedir. Yerel teknoparklar ve teknokentler (S-A-17), yerel endüstriyel kabiliyetler (S-A-16) ve gelişmiş sektörler ile meslek odaları (S-A-18) gibi kriterlerin düşük puanlanması, bölgedeki teknoloji tabanlı kalkınma araçlarının henüz yeterince olgunlaşmadığını veya etkisinin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Benzer şekilde yerel enerji üretim imkânları (S-EnT-14) ve küçük ölçekli sanayi çeşitliliği (S-EnT-15) gibi üretim altyapısına dayalı unsurların da düşük sıralanması, bölgedeki ölçek ekonomilerinin sınırlı olduğunu düşündürmektedir. Bu göstergeler, yerelde bilgi, teknoloji ve üretim altyapısının güçlendirilmesi gerektiğini, bölgesel rekabet gücünün artırılması için ekosistemin kapasite geliştirme faaliyetlerine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

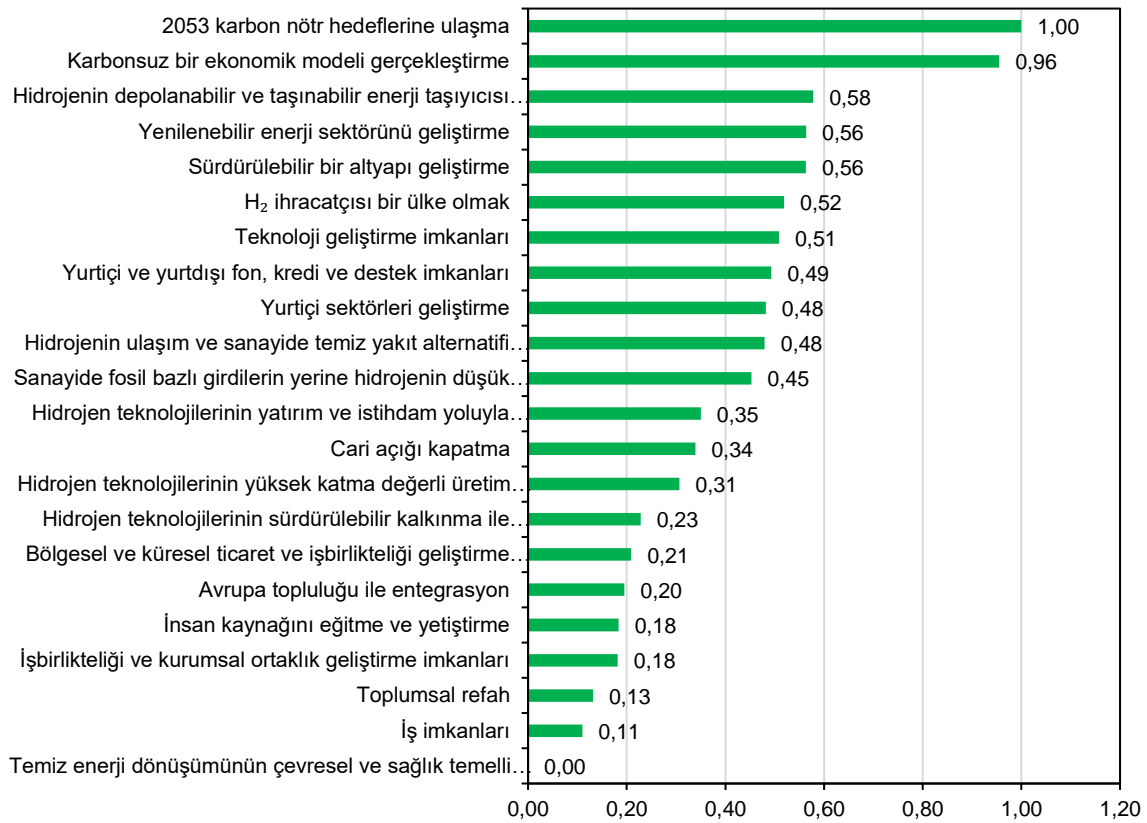


Şekil 14. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Zayıf Yönler

Panel tarafından belirlenmiş zayıf yönler Şekil 14'te sunulmuştur. Normalize edilmiş değerlere göre en yüksek puan alan zayıf yönler incelendiğinde, sektörlerde yoğun fosil kaynak kullanımı (W-ÇS-2) ve karbon yakalama ve depolama teknolojilerinin yetersizliği (W-ÇS-1) öne çıkmaktadır. Bu durum, hidrojen teknolojilerinin gelişimi önünde en büyük engellerin hâlen fosil yakıtı dayalı mevcut yapılar olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, standart ve kodların uygulamaya geçmemiş olması (W-Y-13), ilgili kurumsal ve finansal yapıların eksikliği (W-Y-12) ve kurumsal stratejik yapılanmanın eksikliği (W-Y-15) gibi yönetim ve düzenleme eksiklikleri de yüksek puanlarla dikkat çekmekte, bu da düzenleyici netlik ve kurumsal koordinasyonun geliştirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Orta düzeydeki zayıf yönler daha çok altyapı, planlama ve sistem bütünlüğü ile ilgilidir. Enerjide dışa bağımlılık (W-EnT-20), altyapı gereksinimi (W-A-21), teşviklerin eksikliği (W-E-5) ve teknolojik yetkinlik eksikliği (W-EnT-17) gibi kriterler, hidrojen dönüşümünün ölçeklenebilir ve sürdürülebilir bir biçimde yaygınlaştırılması için gerekli destekleyici yapıların henüz yeterli düzeyde kurulmadığını göstermektedir. Yüksek yatırım maliyetlerinin caydırıcılığı (W-E-4) ve hidrojen teknolojilerinin imalat altyapısının eksikliği (W-EnT-18) gibi unsurlar, özel sektörün katılımını sınırlayan başlıca ekonomik engeller arasında sayılabilir. Bu gruptaki zayıf yönler, koordineli kamu politikaları, altyapı yatırımları ve Ar-Ge destekleriyle aşılabilecek sistemsel sorunları işaret etmektedir.

Düşük normalize değerine sahip zayıf yönler ise daha çok sosyal algı, bireysel farkındalık ve teknik çekincelerle ilgilidir. Sosyal etkileşim eksikliği (W-ET-11), artan emisyonlar (W-ÇS-3), hidrojenin su tüketimi ve güvenliği ile ilgili çekinceler (W-ET-10, W-ET-9) gibi faktörler düşük puan almış ve dolayısıyla mevcut sistemde belirleyici bir engel olmaktan ziyade ikincil nitelikte zayıflıklar olarak değerlendirilmiştir. İnsan kaynağı eksikliği (W-ET-8) de görece daha az önem atfedilen ancak dikkat edilmesi gereken yapısal bir unsur olarak listelenmektedir. Bu kriterler, hidrojen teknolojilerinin sosyo-teknik kabulü, farkındalık düzeyi ve güvenlik açısından toplumsal adaptasyonun güçlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Ancak diğer yapısal ve yönetimsel zayıflıklar kadar kritik bir tehdit oluşturmamaktadır.

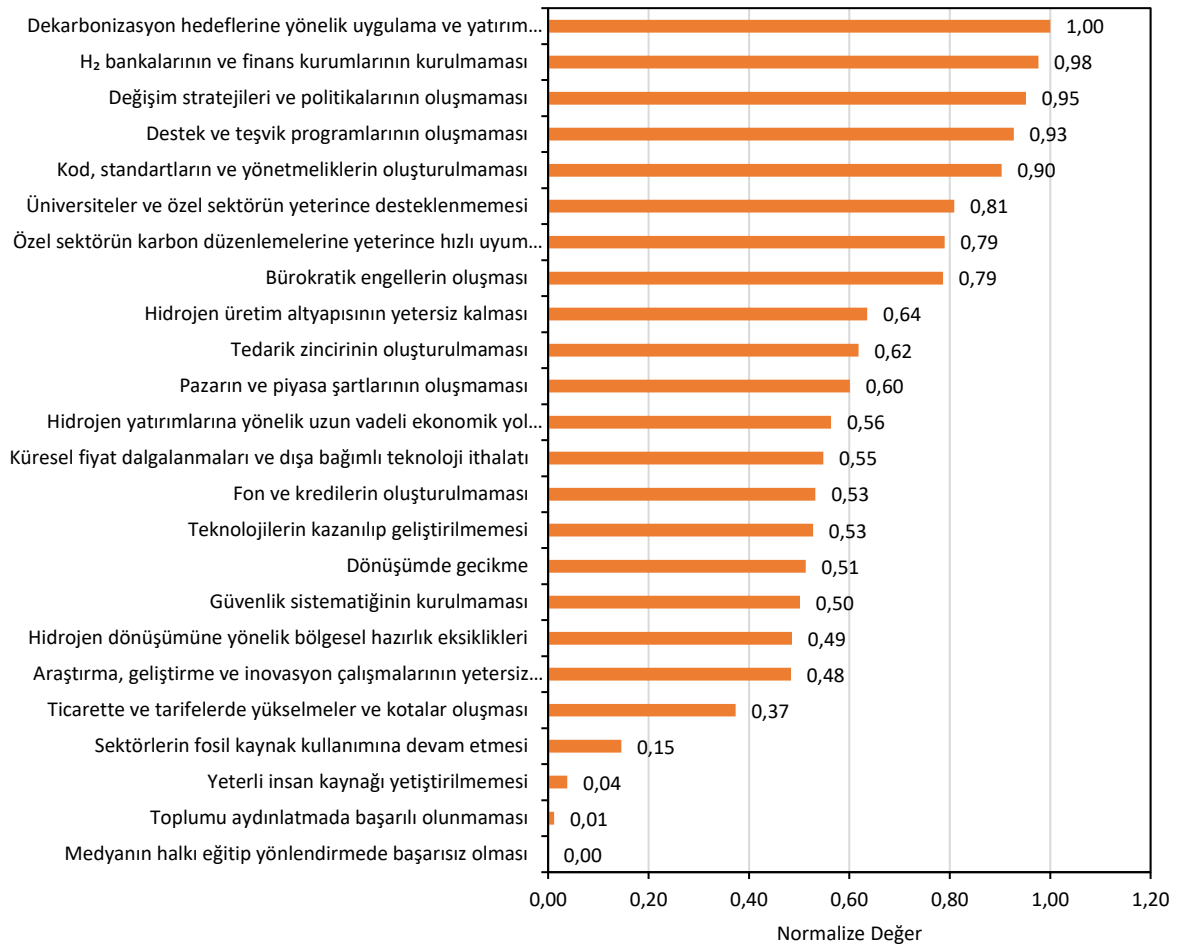


Şekil 15. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Fırsatlar

Şekil 15 panel sonuçlarından elde edilerek normalizasyonu yapılmış olan fırsatlara ait puanlamaları göstermektedir. Normalize edilmiş fırsat kriterleri incelendiğinde en yüksek değerler, 2053 karbon nötr hedeflerine ulaşma (O-ÇS-3) ve karbonsuz bir ekonomik model gerçekleştirme (O-ÇS-4) kriterlerinde toplanmaktadır. Bu durum, hidrojen teknolojilerinin Türkiye'nin uzun vadeli iklim politikaları ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından büyük bir fırsat alanı sunduğunu ortaya koymaktadır. Aynı zamanda bu kriterlerin yüksek puan

alması, politika yapıcıların ve yatırımcıların stratejik yönelimlerinde karbon nötr dönüşümün itici güç olarak konumlandığını göstermektedir. Bu bağlamda hidrojen, sadece teknik bir çözüm değil, aynı zamanda ekonomik ve çevresel dönüşümün anahtarı olarak görülmektedir. Orta grupta yer alan fırsatlar; hidrojenin sanayi ve ulaşımda temiz yakıt alternatifi olması (O-EnT-17), fosil bazlı girdilerin yerine geçme potansiyeli (O-EnT-19), teknoloji geliştirme ve ihracat (O-A-20, O-E-7), fon ve kredi erişimi (O-E-9) gibi başlıklarda yoğunlaşmaktadır. Bu kriterler, hidrojenin ekonomik katma değer yaratma kapasitesi, dış ticaret dengesine olumlu katkısı ve yenilikçilik potansiyeli ile ilişkili olup, bölgesel kalkınma hedefleriyle uyumlu önemli büyüme alanlarını işaret eder. Ayrıca sürdürülebilir altyapı geliştirme (O-A-21) ve yenilenebilir enerji sektörünün güçlendirilmesi (O-EnT-16) gibi kriterler de sistematik dönüşüm için kritik eşikleri temsil etmektedir. Bu orta seviye fırsatlar, doğru planlama ve teşvik mekanizmalarıyla hızla stratejik kazanımlara dönüştürülebilir.

Düşük normalize puanlara sahip fırsatlar ise daha çok sosyal faydalar, uluslararası işbirliği ve kapasite geliştirme ile ilgilidir. Temiz enerji dönüşümünün ekonomik fırsatları (O-ÇS-1), toplumsal refah (O-ET-11), işbirlikleri ve insan kaynağı yetiştirme (O-Y-13, O-ET-12), Avrupa entegrasyonu ve bölgesel ticaret (O-Y-14, O-Y-15) gibi konuların görece daha az puanlanmış olması, karar vericilerin önceliğini somut ekonomik çıktılar ve teknolojiye dayalı fırsatlara verdiğini göstermektedir. Bu tür kriterler, her ne kadar sistemik dönüşümün önemli parçaları olsa da, uygulamaya geçiş aşamasında geri planda kalma eğilimi taşımaktadır. Ancak bu alanlarda yapılacak gelişmeler, hidrojen ekonomisinin sosyal kabulü ve dış ilişkilerde entegrasyonu açısından tamamlayıcı rol oynayacaktır.



Şekil 16. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Tehditler

Şekil 16 panel tarafından ağırlıklandırılmış tehditlere ait değerleri göstermektedir. Tehdit kriterlerinin normalize değerlerine göre analizinde, en yüksek değerlere sahip olanlar ciddi yapısal ve kurumsal eksikliklere işaret etmektedir. Özellikle dekarbonizasyon hedeflerine yönelik uygulama ve yatırım yetersizliği (T-ÇS-1), H₂ bankalarının ve finans kurumlarının kurulmaması (T-Y-12), değişim stratejileri ve politikalarının eksikliği (T-Y-13), destek ve teşvik programlarının olmayışı (T-Y-11) ve yönetmelik, standart ve kod eksikliği (T-Y-15) gibi tehditler 0.90 ve üzeri skorlarla sıralanmıştır. Bu durum, hidrojen ekonomisinin gelişimi için gerekli olan yönetişimsel altyapının ve finansal mekanizmaların halen yetersiz kaldığını, sistemin kurumsal olgunlaşma düzeyinin oldukça geride olduğunu göstermektedir. Bu tür eksiklikler yalnızca teknik gecikmelere değil, aynı zamanda özel sektör güveni, yatırım iştahı ve uluslararası uyum açısından da ciddi engeller yaratmaktadır.

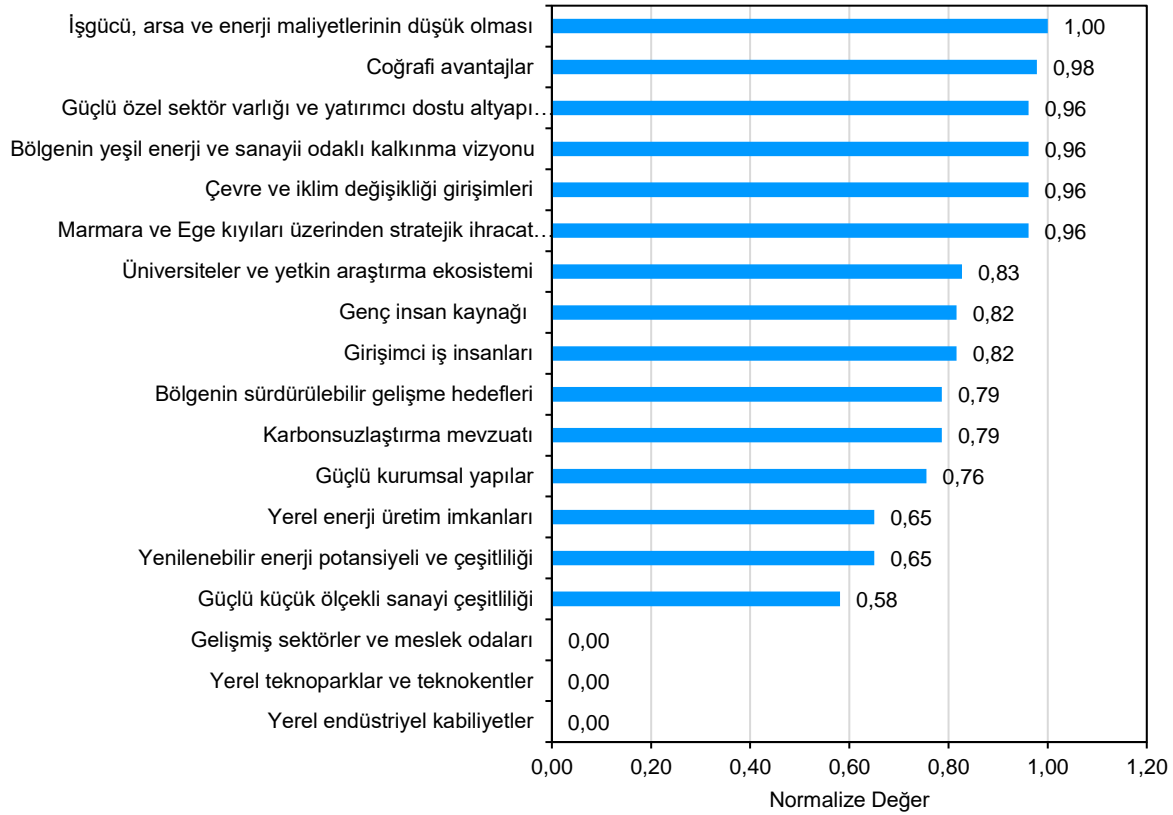
Orta düzeyde tehdit oluşturan kriterler arasında hidrojen üretim altyapısının yetersizliği (T-A-24), tedarik zinciri eksikliği (T-A-20), pazar ve piyasa koşullarının oluşmaması (T-A-21), dışa bağımlı teknoloji ithalatı ve fiyat dalgalanmaları (T-E-6) ile uzun vadeli ekonomik yol haritası eksikliği (T-E-4) gibi unsurlar yer almaktadır. Bunlar, teknik altyapıdan pazara kadar olan zincirin birçok halkasında planlama, yatırım ve stratejik yönelimlerin eksik olduğunu göstermektedir. Ayrıca fon ve kredilere erişim (T-E-5), teknoloji geliştirme ve Ar-Ge yatırımları (T-EnT-18, T-EnT-19) gibi eksiklikler de sistemin ekonomik olarak olgunlaşmasında yaşanan sıkıntıları vurgulamaktadır. Bu tehditler, belirli stratejik müdahalelerle iyileştirilebilecek olmakla birlikte, ihmal edildiklerinde uzun vadeli kırılganlık yaratabilir.

Düşük normalize değerine sahip tehditler daha çok toplumsal farkındalık ve sosyal hazırlık konularına ilişkindir. Medyanın halkı eğitmede başarısız olması (T-ET-10), toplumu aydınlatma eksikliği (T-ET-9) ve insan kaynağı yetiştirme yetersizliği (T-ET-8) gibi unsurlar sistemin teknik veya kurumsal değil, sosyo-kültürel boyutunu yansıtmaktadır. Bu tehditler mevcut durumda en düşük öncelik sırasına sahip olsa da, uzun vadede toplumsal kabul, davranış değişikliği ve insan kaynağının sürekliliği açısından stratejik öneme sahiptir. Benzer şekilde fosil yakıt kullanımının sürmesi (T-ÇS-3), ticari kısıtlamalar ve kotalar (T-E-7) gibi faktörler de kontrol edilebilir ancak izlenmesi gereken dışsal tehditlerdir. Bu bağlamda, düşük puanlı tehditler sistemin sosyal dayanıklılığı ve dış bağımlılık yönlerinden izlenmesi gereken potansiyel riskleri göstermektedir.

Panel sonucu, TR22 bölgesinin hidrojen ekonomisi açısından en güçlü yönlerinin coğrafi avantajlar, çevre ve iklim girişimleri ile stratejik ihracat altyapısı olduğunu ortaya koymaktadır. Buna karşılık yerel teknolojik altyapı, girişimcilik ekosistemi ve sanayi çeşitliliği gibi alanlarda gelişim ihtiyacı dikkat çekmektedir. Zayıf yönler arasında fosil yakıt bağımlılığı ve karbon yakalama altyapısının yetersizliği gibi yapısal eksiklikler öne çıkarken, sosyal kabul ve kurumsal düzenleme eksiklikleri de sistemi zayıflatmaktadır. Fırsatlar açısından değerlendirildiğinde, hidrojenin karbon nötr hedeflere ulaşmadaki rolü ve sürdürülebilir altyapı ile ekonomik dönüşüm potansiyeli dikkat çekmektedir; ancak iş birliği ve sosyal fayda fırsatları görece daha az vurgulanmaktadır. En ciddi tehditler ise kurumsal eksiklikler, teşvik ve finansman yetersizliği ile strateji oluşturamama gibi sistemsel risklerden kaynaklanmakta, sosyal farkındalık ve dış etkenler ise daha düşük önemde tehditler olarak değerlendirilmektedir. Bu genel tablo, bölgesel hidrojen stratejisinin başarıya ulaşması için yönetim, altyapı ve sosyal adaptasyon alanlarında bütüncül ve çok katmanlı bir dönüşüm gerektiğini göstermektedir.

Anket sonuçlarından elde edilmiş olan güçlü yönler grafiği Şekil 17'de sunulmuştur. Anket sonuçlarına göre güçlü yönlerin dağılımı, TR22 bölgesinin hidrojen ekonomisi açısından hangi unsurlarda daha avantajlı bir konumda olduğunu net şekilde ortaya koymaktadır. En yüksek puanlar işgücü, arsa ve enerji maliyetlerinin düşük olması (S-E-5), coğrafi avantajlar (S-ÇS-3), çevre ve iklim değişikliği girişimleri (S-ÇS-2), yeşil kalkınma vizyonu (S-E-4), özel sektör altyapısı (S-E-6) ve stratejik ihracat kanalları (S-ÇS-1) kriterlerinde toplanmıştır. Bu durum, bölgenin fiziki ve ekonomik altyapısının, düşük maliyetli yatırım ortamının ve sürdürülebilirlik

odaklı kalkınma yaklaşımının güçlü bir temel sunduğunu göstermektedir. Özellikle dış ticaret bağlantıları ve çevresel uyum açısından bölgeye olan güvenin oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 17. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Güçlü Yönler

Orta düzeyde puanlanan güçlü yönler arasında üniversiteler ve araştırma ekosistemi (S-ET-9), girişimcilik (S-ET-7), genç insan kaynağı (S-ET-8), kurumsal yapılar (S-Y-12) ve karbonsuzlaştırma mevzuatı (S-Y-10) yer almaktadır. Bu kriterler, bilgi temelli kalkınma, insan sermayesi ve yönetim açısından bölgenin belirli bir olgunluk düzeyine ulaştığını göstermektedir. Aynı zamanda bölgenin sürdürülebilir gelişme hedefleri (S-Y-11) de bu kategoride yer alarak uzun vadeli stratejik planlamaların mevcut olduğunu ortaya koymaktadır. Ancak bu potansiyelin daha fazla somutlaştırılması, Ar-Ge, girişimcilik destekleri ve genç istihdam politikalarıyla pekiştirilmesi önem arz etmektedir.

En düşük puanı alan kriterler ise yerel endüstriyel kabiliyetler (S-A-16), teknoparklar ve teknokentler (S-A-17) ve sektörel gelişmişlik (S-A-18) olmuştur. Bu durum, bölgedeki teknolojik üretim altyapısının ve kümelenme yeteneğinin yetersiz kaldığını ve hidrojen özelinde rekabetçi bir sanayi yapısının henüz tesis edilmediğini göstermektedir. Küçük ölçekli sanayi çeşitliliği (S-EnT-15) her ne kadar orta düzeyde bir puan almış olsa da, bu çeşitliliğin henüz bölgesel ölçekte etkili bir kapasiteye dönüşmediği izlenimi edinilmektedir. Bu alanlarda yapılacak yatırımlar, TR22'nin sadece çevresel ve maliyet avantajlarına değil, aynı zamanda yenilikçilik ve üretim kapasitesine dayalı güçlü yönlerini artırmasına katkı sağlayacaktır.

Genel olarak bakıldığında, çevresel ve doğal faktörler (coğrafya, denizlerle çevrili olma, çevre politikaları) stratejik planlamada öne çıkarken; teknoloji, enerji altyapısı ve sanayi kabiliyetleri gibi uygulama odaklı, teknik kriterler geri planda kalmıştır. Bu dengesizlik, stratejik uygulama sürecinde fırsat maliyeti yaratabilir. Önerilen yaklaşım, mevcut güçlü yönleri kullanırken zayıf kalan kritik teknolojik ve yapısal alanlara özel yatırım ve politika programları geliştirmektir.

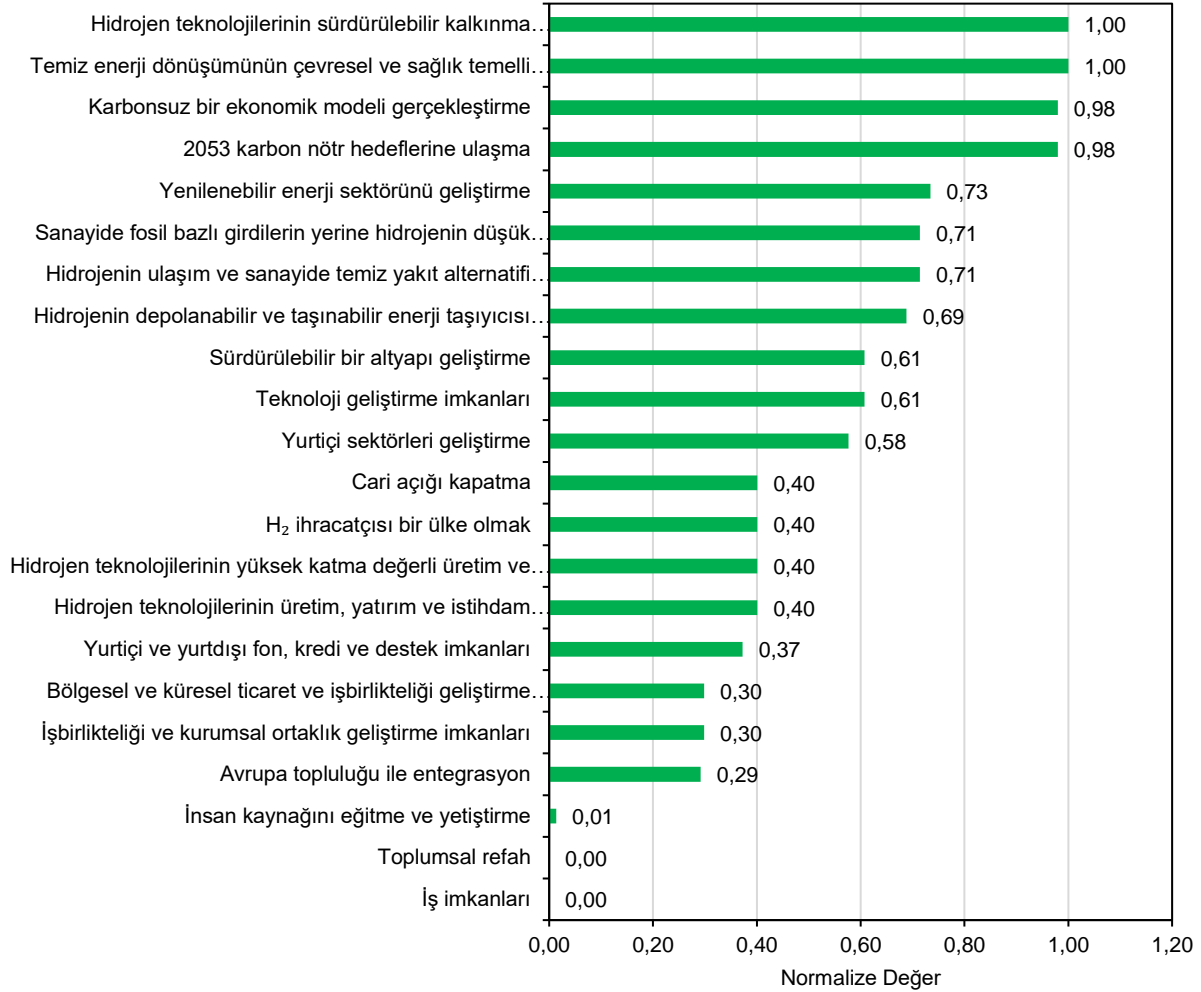


Şekil 18. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Zayıf Yönler

Anket sonuçlarından elde edilmiş zayıf yönler için puanlama grafiği Şekil 18’de sunulmuştur. Anket verilerine göre zayıf yönler arasında en yüksek değerlere sahip kriterler; standartlar ve kodların henüz uygulamaya geçmemesi (W-Y-13), özel sektörde hidrojen teknolojilerine yönelik bilgi ve teknolojik uyum eksikliği (W-Y-14), hidrojen ekosistemine yönelik dönüşüm planlarının hazırlanmaması (W-Y-16) ve kurumsal stratejik yapılanma eksikliği (W-Y-15) gibi yönetimsel ve kurumsal yetersizliklerdir. Bu göstergeler, bölgenin hidrojen teknolojilerinde ilerleyebilmesi için gerekli olan strateji, düzenleme, bilgi altyapısı ve organizasyonel koordinasyonun eksik olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca teşvik programlarının eksikliği (W-E-5) ve H₂ ile ilgili kurumsal ve finansal yapıların olmaması (W-Y-12) da sistemin sürdürülebilirliği açısından ciddi riskleri yansıtmaktadır.

Orta düzeyde puan alan zayıf yönler, altyapı eksiklikleri ve teknik kapasiteyle ilgilidir. Altyapı eksikliği (W-A-21), üretim ve dolun ihtiyaçlarının yerelde planlanmamış olması (W-A-22), ticaret ve pazarlama eksiklikleri (W-E-6), yüksek yatırım maliyetleri (W-E-4), ölçek büyütme zorlukları (W-A-23) ve proje uygulamalarının yetersizliği (W-EnT-19) gibi kriterler, hidrojen dönüşümünün uygulamaya aktarılmasında karşılaşılan zorluklara işaret etmektedir. Bu başlıklar, bölgedeki teknik ve ekonomik kapasitenin artırılması gerektiğini ve stratejik vizyonun yalnızca üst düzey planlarla değil, aynı zamanda uygulama düzeyinde de desteklenmesi gerektiğini göstermektedir.

Düşük puan alan zayıf yönler ise daha çok sosyal ve çevresel çekinceleri içermektedir. Su tüketimi endişeleri (W-ET-10), hidrojen güvenliği (W-ET-9), insan kaynağı eksikliği (W-ET-8), sosyal etkileşim eksikliği (W-ET-11) ve sektörel fosil yakıt bağımlılığı (W-ÇS-2) gibi başlıklar, zayıf yön olarak algılansa da anket katılımcıları tarafından daha az öncelikli tehditler olarak değerlendirilmiştir. Bu durum, sosyal boyutların teknik ve kurumsal eksikliklere kıyasla geri planda kaldığını, ancak uzun vadede toplumsal farkındalık ve yetkin insan kaynağı olmadan sürdürülebilir bir hidrojen dönüşümünün sağlanamayacağını göstermektedir. Bu nedenle, bu alanlar da bütüncül bir politika çerçevesinde ele alınmalıdır.



Şekil 19. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Fırsatlar

Şekil 19 anket sonuçlarına göre normalize edilmiş fırsat puanlamasını göstermektedir. Anket verilerine göre fırsat başlığı altında en yüksek puanları alan kriterler; hidrojen teknolojilerinin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu gelecek vizyonu sunması (O-ÇS-2) ve temiz enerji dönüşümünün çevresel ve sağlık temelli ekonomik fırsatlar yaratması (O-ÇS-1) gibi çevresel sürdürülebilirlik odaklı unsurlar olmuştur. Hemen ardından gelen karbonsuz ekonomik model gerçekleştirme (O-ÇS-4) ve 2053 karbon nötr hedeflerine ulaşma (O-ÇS-3) gibi uzun vadeli iklim hedefleriyle uyumlu kriterler, hidrojen teknolojilerinin sadece enerji sektörü açısından değil, aynı zamanda bütüncül kalkınma politikaları için de stratejik bir araç olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, kamuoyunun ve uzmanların hidrojenin dönüşümsel potansiyeline olan güçlü inancını yansıtmaktadır.

Orta düzeyde puanlanan fırsatlar; yenilenebilir enerji sektörünü geliştirme (O-EnT-16), sanayide düşük karbonlu hammadde kullanımı (O-EnT-19), ulaşım ve sanayide temiz yakıt

potansiyeli (O-EnT-17), arz güvenliği katkısı (O-EnT-18), altyapı ve teknoloji geliştirme olanakları (O-A-21, O-A-20) ile yurtiçi sektörlerin güçlendirilmesi (O-A-22) gibi teknik ve ekonomik fırsatları kapsamaktadır. Bu kriterler, hidrojenin sektörel dönüşümdeki işlevselliğini ve altyapı temelli gelişim sürecini ön plana çıkarmaktadır. Özellikle enerji güvenliği, dış ticaret açığının kapanması ve katma değerli üretim gibi faktörler, ekonomik politikalar açısından güçlü destek noktaları oluşturmaktadır.

En düşük puanlara sahip fırsatlar ise daha çok sosyal ve kurumsal boyutlardadır. İş imkânları (O-ET-10), toplumsal refah (O-ET-11) ve insan kaynağını eğitime ve yetiştirme (O-ET-12) gibi sosyal fayda odaklı kriterlerin düşük önem verilmesi, karar vericilerin bu aşamada daha çok çevresel ve ekonomik ölçekli faydalara odaklandığını göstermektedir. Ayrıca Avrupa topluluğu ile entegrasyon (O-Y-14), iş birliği ve kurumsal ortaklıklar (O-Y-13) ve küresel ticaret fırsatları (O-Y-15) gibi dış ilişkilerle bağlantılı kriterler de görece daha düşük değerlendirilmiştir. Bu durum, bölgesel stratejinin iç dinamiklere daha çok odaklandığını, ancak sosyal ve diplomatik etkilerin henüz stratejik potansiyele tam olarak yansımadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 20. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Tehditler

Şekil 20 anket sonuçlarından elde edilmiş olan tehdit verilerini sunmaktadır. Tehditler başlığı altında en yüksek puanlara sahip olan kriterler; kod, standartların ve yönetmeliklerin oluşturulmaması (T-Y-15) ile değişim stratejileri ve politikalarının eksikliği (T-Y-13) olarak öne çıkmaktadır. Bunları destek ve teşvik programlarının olmayışı (T-Y-11) ve üniversiteler ile özel sektörün yeterince desteklenmemesi (T-Y-14) izlemektedir. Bu sonuçlar, TR22 bölgesinin hidrojen dönüşümünde karşı karşıya olduğu en büyük risklerin, kurumsal altyapı eksiklikleri ve yönetimdeki dağınıklardan kaynaklandığını göstermektedir. Ayrıca bürokratik engellerin oluşması (T-Y-16) ve H₂ bankaları ile finansal kurumların eksikliği (T-Y-12) gibi kriterler de

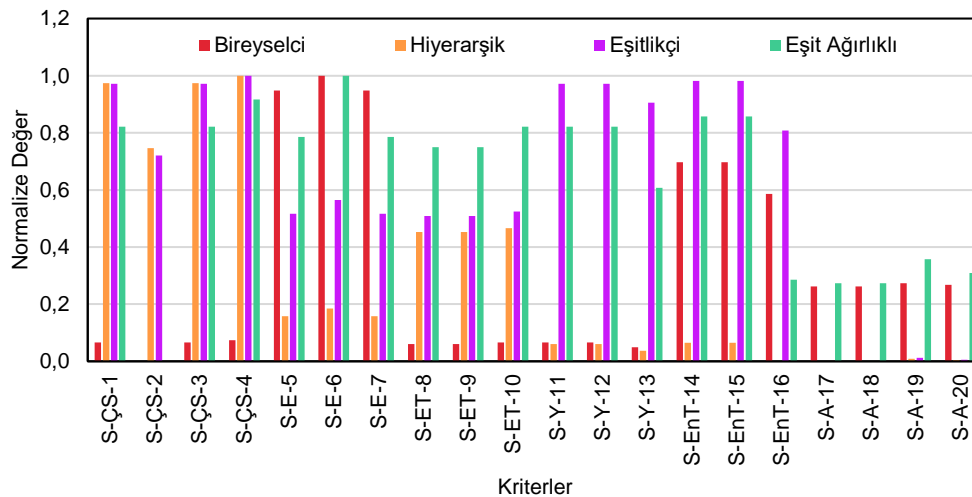
yüksek puanlarla yer alarak bu kurumsal zafiyetin finansal ve operasyonel boyutlarını ortaya koymaktadır.

Orta düzeyde puanlanan tehditler arasında tedarik zincirinin kurulamaması (T-A-20), piyasa şartlarının gelişmemesi (T-A-21), güvenlik sistematığının eksikliği (T-A-22) ve hidrojen altyapısının yetersiz kalması (T-A-24) gibi teknik ve uygulamaya dönük riskler dikkat çekmektedir. Aynı zamanda bölgesel hazırlık eksiklikleri (T-A-23), finansal kaynaklara erişim eksikliği (T-E-5) ve uzun vadeli yatırım yol haritasının olmayışı (T-E-4) gibi başlıklar da hidrojen ekosisteminin gelişimini sınırlayan operasyonel tehditler arasında yer almaktadır. Bu tehditler, yalnızca politika değil; aynı zamanda bölgesel planlama, piyasa mekanizmaları ve teknik kapasiteye yönelik kapsamlı bir müdahale ihtiyacını işaret etmektedir.

Düşük puanlı tehditler ise daha çok sosyal algı, insan kaynağı ve dışsal ekonomik etkilerle ilgilidir. Fosil yakıt kullanımının sürmesi (T-ÇS-3), dekarbonizasyon uygulama eksikliği (T-ÇS-1) ve özel sektörün karbon düzenlemelerine yavaş uyumu (T-ÇS-2) gibi çevresel tehditler anket katılımcıları tarafından daha düşük risk olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca toplum yeterince aydınlatılamaması (T-ET-9), medyanın etkisizliği (T-ET-10) ve yetersiz insan kaynağı (T-ET-8) da sosyal boyutta geri planda kalan tehditlerdir. Bunlar kısa vadede kritik görülmesi de uzun vadeli geçiş süreci için risk oluşturmaktadır. Bu nedenle bu düşük puanlı ancak stratejik öneme sahip sosyal risklerin de bütünsel dönüşüm stratejileri içinde ele alınması önemlidir.

Farklı modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesi

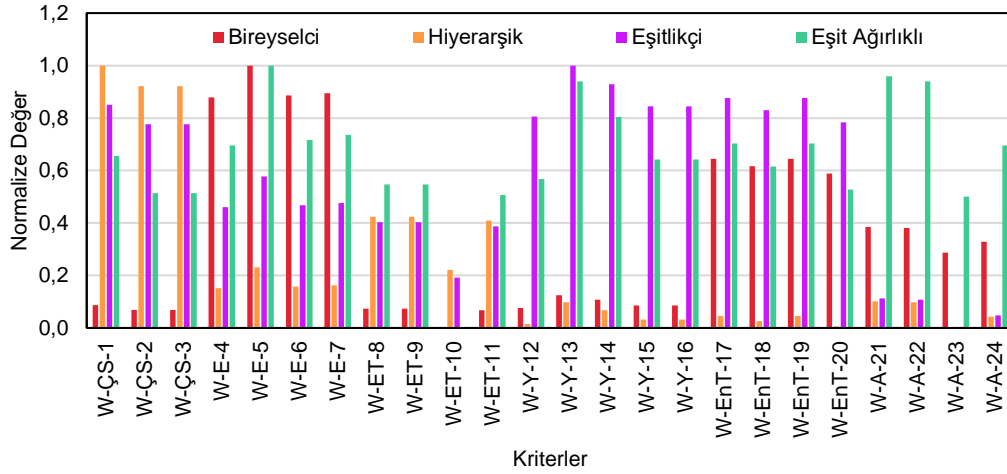
Farklı modelleme yaklaşımlarına göre güçlü yönlerin değerlendirilmesi Şekil 21'de sunulmuştur. Güçlü yönler kategorisinde yer alan kriterler, genellikle eşitlikçi ve hiyerarşik perspektiflerde yüksek skorlar almıştır. Özellikle "Coğrafi avantajlar (S-ÇS-4)", "Çevre ve iklim değişikliği girişimleri (S-ÇS-3)", "Karbonsuzlaştırma mevzuatı (S-Y-11)" ve "Sürdürülebilir gelişme hedefleri (S-Y-12)" gibi kriterler; eşitlikçi yaklaşımda 0.971 gibi yüksek değerlere ulaşmıştır. "Yenilenebilir enerji potansiyeli (S-EnT-14)" ve "Yerel enerji üretimi (S-EnT-15)" gibi teknik kapasiteye dayalı kriterler ise bireyselci ve eşit ağırlıklı modellerde de yüksek skor almaktadır. Yerel endüstriyel kabiliyetler (S-A-17) ve teknoparklar (S-A-18) ise hiyerarşik modellerde düşük değerlere sahiptir, bu durum altyapı unsurlarının karar verici yaklaşımlar açısından henüz yeterince güçlü algılanmadığını gösterebilir.



Şekil 21. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Güçlü Yönlerin Değerlendirilmesi

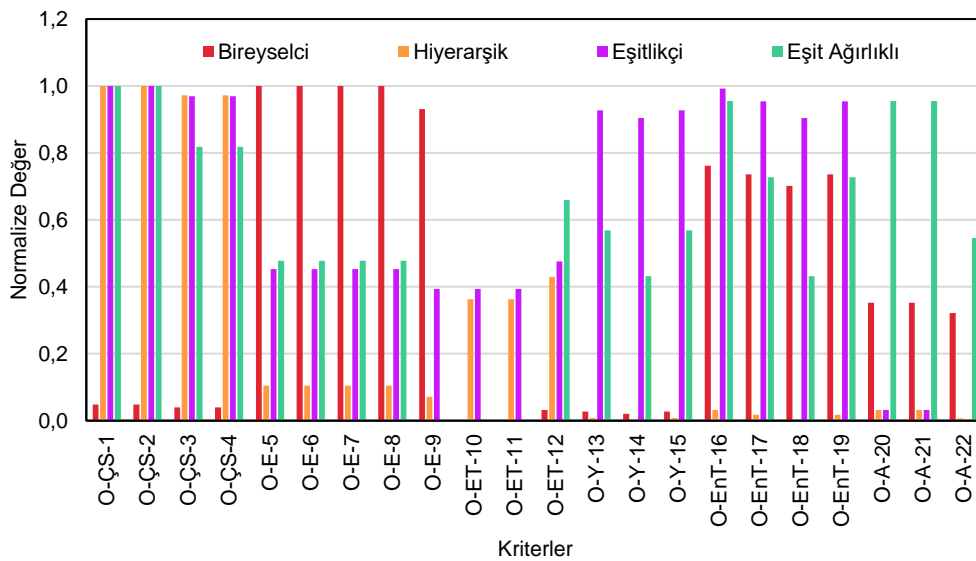
Zayıf yönler ile ilgili değerlendirme Şekil 22'de sunulmuştur. Zayıf yönler kategorisinde "Karbon yakalama teknolojisi eksikliği (W-ÇS-1)", "Araştırma fonlarının yetersizliği (W-E-7)" ve "Yüksek maliyet (W-E-4)" gibi kriterler, hem bireyselci hem eşit ağırlıklı bakışta yüksek önem

atfedilen başlıklardır. “Teşvik ve destek eksikliği (W-E-5)” bireyselci bakışta en yüksek değeri almaktadır. Ölçek büyütme zorlukları (W-A-23) ve ekosistem kurma eksikliği (W-A-24) bireyselci ve eşitlikçi bakışta daha düşük puanlarla yer almaktadır, bu da dönüşümün organizasyonel boyutlarında zayıflık algısının sınırlı olduğunu göstermektedir.



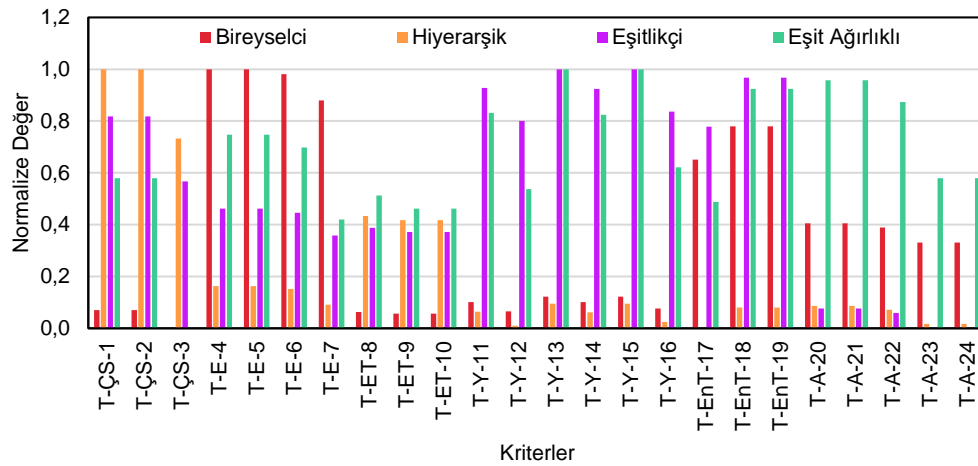
Şekil 22. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Zayıf Yönlerin Değerlendirilmesi

Fırsatlar ile ilgili farklı modelleme yaklaşımlarının değerlendirilmesi Şekil 23’te sunulmuştur. Fırsatlar kategorisinde “Temiz bir çevre (O-ÇS-1)”, “Sürdürülebilir bir gelecek (O-ÇS-2)” gibi çevresel temelli hedefler tüm perspektiflerde maksimum değere yakın puanlar almıştır. “Yenilenebilir enerji sektörü geliştirme (O-EnT-16)” ve “H₂ ihracatı (O-E-7)” gibi ekonomik fırsatlar ise bireyselci modelde oldukça yüksek skorlarla değerlendirilmiş ve eşit ağırlıklı modelde de yüksek puanlar almıştır. “İnsan kaynağının eğitilmesi (O-ET-12)” ve “İş birliktelikleri (O-Y-13)” gibi sosyal boyuttaki fırsatlar ise genellikle eşitlikçi modelde daha çok ön plana çıkmaktadır. Buna karşılık “İş imkânları” ve “Toplumsal refah” gibi daha genel sosyoekonomik göstergeler bireyselci modelde sıfıra yakın değerlere sahiptir, bu da toplumsal yönlü kazanımların bireysel çıkar eksenli bakışta önemsizleştiğini düşündürmektedir.



Şekil 23. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Fırsatların Değerlendirilmesi

Tehditler kategorisinde yer alan kriterler 24'te sunulmuştur. Tehditler kategorisinde çevresel ve yönetsel tehditler ön plana çıkmaktadır. “Dekarbonizasyonun askıya alınması (T-ÇS-1)” ve “Karbon cezalarının uygulanmaması (T-ÇS-2)” hiyerarşik ve eşitlikçi modellerde en üst değeri alırken, bireyselci bakışta bu oran 0.071 seviyesindedir. Bu da çevresel politikalarla ilgili tehditlerin bireysel çıkarılara göre daha az önceliklendirildiğini göstermektedir. “Ekonomik planlama eksikliği (T-E-4)” ve “Teşvik programlarının olmayışı (T-Y-11)” gibi kurumsal altyapı tehditleri, bireyselci ve eşit ağırlıklı modellerde yüksek değerlere sahiptir. “Araştırma eksikliği (T-EnT-19)” ve “Teknoloji yetersizliği (T-EnT-18)” ise özellikle eşitlikçi bakışta neredeyse maksimum değerlere ulaşarak, teknolojik tehditlerin sosyo-politik eşitlik perspektifinde öncelikli sorun olarak algılandığını göstermektedir. Buna karşın “Bölgelerin yeterince hazırlanmamış olması (T-A-23)” ve “Altyapı eksikliği (T-A-24)” bireyselci ve eşitlikçi modellerde düşük değerlere sahiptir.



Şekil 24. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Tehditlerin Değerlendirilmesi

4.2.4. Stratejik Hedef Önerileri

GZFT analizinden elde edilen bulgular, stratejik karar alma süreçlerinde yalnızca mevcut durumu değerlendirmez. Aynı zamanda GZFT verileri geleceğe dönük yönelimlerin belirlenmesine de temel olarak kullanılabilir. Bu kapsamda, güçlü yönlerin nasıl korunup geliştirileceği, zayıf yönlerin nasıl iyileştirileceği, fırsatlardan nasıl yararlanılacağı ve tehditlere karşı nasıl önlem alınacağına ilişkin stratejik önerilerin yapılandırılması, analiz sürecinin en kritik aşamasını oluşturmaktadır. GZFT matrisinin sağladığı dört temel boyutun birbiriyle ilişkilendirilmesi sonucunda, S-O (Güçlü yönler - Fırsatlar), W-O (Zayıf yönler - Fırsatlar), S-T (Güçlü yönler - Tehditler) ve W-T (Zayıf yönler - Tehditler) strateji türleri ortaya çıkmaktadır. Bu stratejik eşleşmeler sayesinde, içsel kapasiteler dış koşullarla uyumlu hale getirilerek rekabet sağlanabilir, riskleri minimize edilirken fırsatlar değerlendirilebilir.

Bu bölümde sunulan strateji önerileri, GZFT analizinden elde edilen öncelikli bulgular doğrultusunda yapılandırılmış olup, hem kısa vadeli müdahalelere hem de uzun vadeli dönüşüm hedeflerine hizmet edecek şekilde kurgulanmıştır. Her bir strateji, uygulanabilirlik, sürdürülebilirlik ve bölgesel/ulusal politika hedefleriyle uyum açısından değerlendirilmiş, gerektiğinde paydaş görüşleri ve sektör eğilimleriyle desteklenmiştir. Çalışma kapsamında belirlenmiş olan stratejiler Tablo 3’de sunulmuştur. Çalışma kapsamında önerilen stratejiler, ön kriterler ile değerlendirilerek ağırlıklandırılmıştır. Stratejilerin önem sırasını belirlemek için bu yöntem kullanılmıştır. Buna göre her bir stratejiyi besleyen GZFT kriterinin analizdeki ağırlık değeri kullanılarak stratejilerin ağırlıkları belirlenmiştir. Her bir stratejiyi besleyen kriterler S-O, S-T, W-O ve W-T stratejileri için sırasıyla Tablo 4, Tablo 5, ve Tablo 6, ve Tablo 7’de sunulmuştur. Buna göre her bir modelleme yaklaşımından gelen katsayılar değerlendirilerek panel ve anket çalışmaları ile bireyselci, eşitlikçi, hiyerarşik ve eşit ağırlıklı model

yaklaşımlarına göre strateji sıralamaları yapılmıştır. Önerilen stratejiler, yalnızca mevcut durumu iyileştirmeye yönelik değil; aynı zamanda Güney Marmara Bölgesi'nin uzun vadeli vizyonuna, yani bölgenin yeşil dönüşümde öncü bir merkez haline gelmesi hedefine katkı sunacak şekilde geliştirilmiştir.

Tablo 3. GZFT Analizi Sonucunda Belirlenmiş Olan Stratejik Hedefler

	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
Fırsatlar	<ul style="list-style-type: none"> • SO1: Yenilenebilir kaynaklar ve elektroliz ile yeşil H₂ üretim altyapısının kurulması • SO2: H₂ ihracatı için hedef pazar stratejilerinin geliştirilmesi • SO3: Üniversite ve teknoparklar üzerinden teknoloji üretiminin teşvik edilmesi • SO4: Yeşil hidrojen üretimi için izlenebilirlik ve sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi • SO5: Sanayi kümeleri etrafında yeşil hidrojen uygulama bölgeleri kurulması • SO6: Genç insan kaynağına yönelik istihdam ve girişimcilik destekleri • SO7: Karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemlerinin kurulması • SO8: Yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli hidrojen ürünleri geliştirilmesi • SO9: Üniversite-sanayi iş birliğiyle hidrojen teknolojileri geliştirilmesi • SO10: Girişimcilere yeşil hidrojen odaklı hızlandırıcı ve teşvik programları sunulması 	<ul style="list-style-type: none"> • WO1: Ar-Ge fonları artırılarak teknoloji geliştirme desteklenmeli • WO2: Üniversitelerde hidrojen odaklı lisans ve yüksek lisans programları açılmalı • WO3: Yerel kooperatif ve KOBİ'ler aracılığıyla mikro ölçekli hidrojen üretim projeleri desteklenmeli • WO4: Uluslararası fonlara erişim için stratejik başvuru ofisleri kurulmalı • WO5: H₂ güvenliği konusunda standart geliştirme ve kamu bilgilendirme kampanyaları yürütülmeli • WO6: Su temini ve artımı konularında sürdürülebilir çözümler geliştirilmeli • WO7: Hidrojen sektörüne özel finansal teşvik mekanizmaları geliştirilmeli • WO8: Yerel üreticilere yönelik üretim ve dolun altyapısı hibeleri sağlanmalı • WO9: Sektörel dönüşüm programları için iş dünyasıyla ortak planlama yapılmalı • WO10: Enerjide dışa bağımlılığı azaltacak hibrit sistem teşvikleri uygulanmalı
Tehditler	<ul style="list-style-type: none"> • ST1: Uluslararası standartlarla uyumlu hidrojen mevzuatı hazırlanması • ST2: Toplumsal algı ve güven için halk odaklı pilot projelerin başlatılması • ST3: Kamu-özel sektör iş birliğiyle bölgesel dönüşüm planlarının yapılması • ST4: Enerji bağımsızlığı için yerel üretim ve depolama çözümlerinin teşviki • ST5: Medya ve eğitim yoluyla hidrojen teknolojilerinin tanıtılması • ST6: Karbonsuz ekonomi hedefiyle yeni sektör odaklı kamu desteklerinin sağlanması • ST7: Bölgelerin dönüşümüne yönelik kamu rehberleri ve danışmanlık sistemleri kurulması • ST8: Girişimcilik ortamının geliştirilmesi için kurumsal yönetim altyapısının güçlendirilmesi • ST9: Üniversite altyapılarının güvenlik standartlarına göre güncellenmesi • ST10: Kritik sektörlerde hidrojen geçişi için teknoloji yol haritaları hazırlanması 	<ul style="list-style-type: none"> • WT1: Ulusal hidrojen eylem planı ve teşvik sistemleri derhal oluşturulmalı • WT2: CCUS pilot projeleriyle teknoloji transferi yapılmalı • WT3: Altyapı yatırımları için yerel yönetimlere destek verilmeli • WT4: Hidrojen bankası ve özel finans kurumları için düzenleyici çerçeve oluşturulmalı • WT5: Sektörel planlama eksikliğini aşmak için kamu ve özel sektör arasında düzenli iş birliği mekanizmaları kurulmalı • WT6: Pazar güvenliği için kamu alım garantisi ve fiyat dengeleme mekanizmaları tanımlanmalı • WT7: Bürokratik engellerin azaltılması için hızlandırılmış izin süreçleri tanımlanmalı • WT8: Kod, standart ve yönetmeliklerin oluşturulması için teknik komiteler kurulmalı • WT9: Toplumun bilinçlendirilmesi için sürekli medya kampanyaları ve eğitim modülleri geliştirilmeli • WT10: Tedarik zinciri ve piyasa dinamiklerini düzenlemek üzere ulusal hidrojen pazarı kurulmalı

Tablo 4. Güçlü Yönler ve Fırsatlar İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler

Stratejik Hedefler	Öncü Kriterler
SO1: Yenilenebilir kaynaklar ve elektroliz ile yeşil H ₂ üretim altyapısının kurulması	S-ÇS-1: Marmara ve Ege kıyıları üzerinden stratejik ihracat kanalları S-EnT-13: Yenilenebilir enerji potansiyeli ve çeşitliliği S-EnT-14: Yerel enerji üretim imkanları O-EnT-16: Yenilenebilir enerji sektörünü geliştirme O-E-7: H ₂ ihracatçısı bir ülke olmak O-A-21: Sürdürülebilir bir altyapı geliştirme
SO2: H ₂ ihracatı için hedef pazar stratejilerinin geliştirilmesi	S-ÇS-3: Coğrafi avantajlar S-E-6: Güçlü özel sektör varlığı ve yatırımcı dostu altyapı olanakları S-ET-7: Girişimci iş insanları O-E-8: Cari açığı kapatma O-Y-15: Bölgesel ve küresel ticaret ve işbirlikteği geliştirme imkanları
SO3: Üniversite ve teknoparklar üzerinden teknoloji üretiminin teşvik edilmesi	S-ET-9: Üniversiteler ve yetkin araştırma ekosistemi S-A-17: Yerel teknoparklar ve teknokentler S-A-18: Gelişmiş sektörler ve meslek odaları O-A-20: Teknoloji geliştirme imkanları O-A-22: Yurtiçi sektörleri geliştirme
SO4: Yeşil hidrojen üretimi için izlenebilirlik ve sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi	S-Y-12: Güçlü kurumsal yapılar W-Y-13: Standartlar ve kodların henüz uygulamaya geçmemesi T-Y-15: Kod, standartların ve yönetmeliklerin oluşturulmaması T-A-22: Güvenlik sistematığının kurulmaması
SO5: Sanayi kümeleri etrafında yeşil hidrojen uygulama bölgeleri kurulması	S-EnT-15: Güçlü küçük ölçekli sanayi çeşitliliği S-A-16: Yerel endüstriyel kabiliyetler O-Y-13: İşbirlikteği ve kurumsal ortaklık geliştirme imkanları O-A-22: Yurtiçi sektörleri geliştirme O-ÇS-3: 2053 karbon nötr hedeflerine ulaşma
SO6: Genç insan kaynağına yönelik istihdam ve girişimcilik destekleri	S-ET-8: Genç insan kaynağı S-Y-11: Bölgenin sürdürülebilir gelişme hedefleri O-ET-10: İş imkanları O-ET-12: İnsan kaynağını eğitime ve yetiştirme
SO7: Karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemlerinin kurulması	S-ÇS-2: Çevre ve iklim değişikliği girişimleri S-Y-10: Karbonsuzlaştırma mevzuatı O-ÇS-4: Karbonsuz bir ekonomik modeli gerçekleştirme O-E-6: Hidrojen teknolojilerinin yüksek katma değerli üretim ve gelir artışı potansiyeli O-ÇS-2: Hidrojen teknolojilerinin sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu gelecek vizyonu sunması
SO8: Yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli hidrojen ürünleri geliştirilmesi	S-Y-12: Güçlü kurumsal yapılar O-E-7: H ₂ ihracatçısı bir ülke olmak O-A-20: Teknoloji geliştirme imkanları O-ÇS-3: 2053 karbon nötr hedeflerine ulaşma
SO9: Üniversite-sanayi işbirliğiyle hidrojen teknolojileri geliştirilmesi	S-ÇS-2: Çevre ve iklim değişikliği girişimleri O-E-9: Yurtiçi ve yurtdışı fon, kredi ve destek imkanları O-ET-11: Toplumsal refah O-EnT-18: Hidrojenin depolanabilir ve taşınabilir enerji taşıyıcısı olarak arz güvenliğine katkısı O-EnT-19: Sanayide fosil bazlı girdilerin yerine hidrojenin düşük karbonlu hammadde olarak kullanımı
SO10: Girişimcilere yeşil hidrojen odaklı hızlandırıcı ve teşvik programları sunulması	S-E-5: İşgücü, arsa ve enerji maliyetlerinin düşük olması O-E-5: Hidrojen teknolojilerinin üretim, yatırım ve istihdam yoluyla ekonomik büyümeyi desteklemesi O-EnT-17: Hidrojenin ulaşım ve sanayide temiz yakıt alternatifi olarak kullanılma potansiyeli O-ET-11: Toplumsal refah

Tablo 5. Güçlü Yönler ve Tehditler İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler

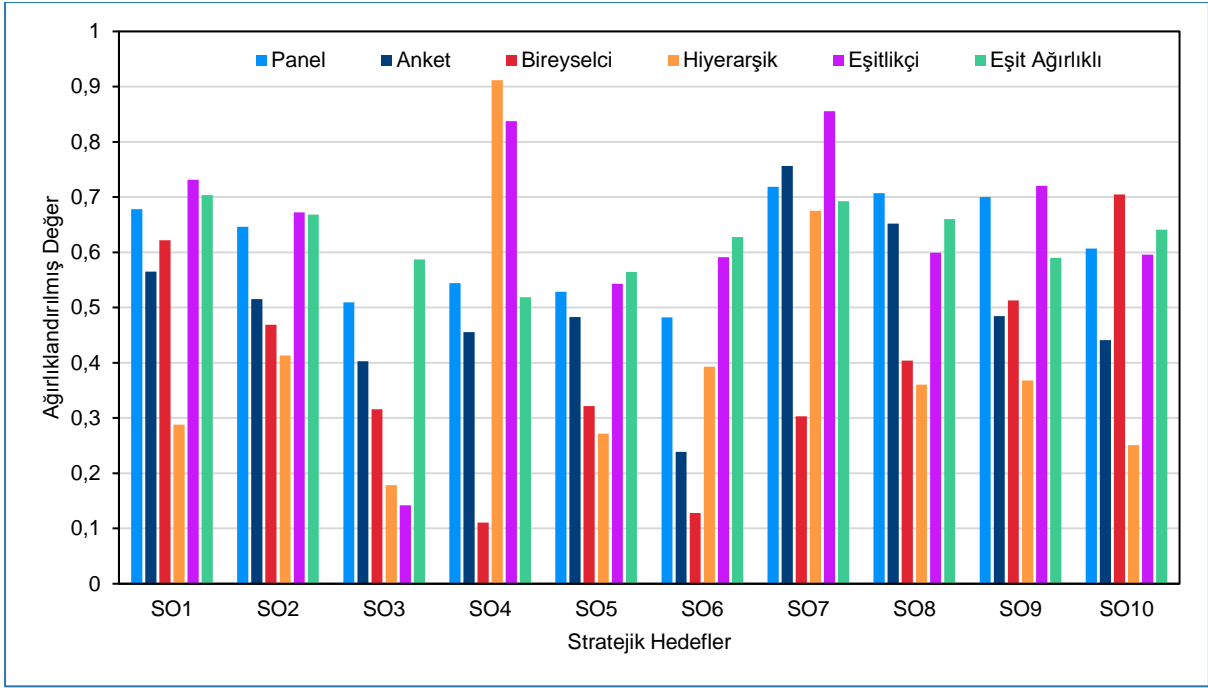
Stratejik Hedefler	Öncü Kriterler
ST1: Uluslararası standartlarla uyumlu hidrojen mevzuatı hazırlanması	S-Y-10: Karbonsuzlaştırma mevzuatı S-Y-12: Güçlü kurumsal yapılar S-A-18: Gelişmiş sektörler ve meslek odaları T-Y-15: Kod, standartların ve yönetmeliklerin oluşturulmaması T-Y-13: Değişim stratejileri ve politikalarının oluşmaması T-ÇS-2: Özel sektörün karbon düzenlemelerine yeterince hızlı uyum sağlayamaması
ST2: Toplumsal algı ve güven için halk odaklı pilot projelerin başlatılması	S-ÇS-2: Çevre ve iklim değişikliği girişimleri S-ET-8: Genç insan kaynağı S-ET-9: Üniversiteler ve yetkin araştırma ekosistemi T-ET-9: Toplum aydınlatmada başarılı olunmaması T-ET-10: Medyanın halkı eğitip yönlendirmede başarısız olması T-A-22: Güvenlik sistematığının kurulmaması
ST3: Kamu-özel sektör işbirliğiyle bölgesel dönüşüm planlarının yapılması	S-E-4: Bölgenin yeşil enerji ve sanayi odaklı kalkınma vizyonu S-Y-11: Bölgenin sürdürülebilir gelişme hedefleri S-Y-12: Güçlü kurumsal yapılar T-E-4: Hidrojen yatırımlarına yönelik uzun vadeli ekonomik yol haritası eksikliği T-E-5: Fon ve kredilerin oluşturulmaması T-Y-11: Destek ve teşvik programlarının oluşmaması T-Y-14: Üniversiteler ve özel sektörün yeterince desteklenmemesi
ST4: Enerji bağımsızlığı için yerel üretim ve depolama çözümlerinin teşviki	S-EnT-13: Yenilenebilir enerji potansiyeli ve çeşitliliği S-EnT-14: Yerel enerji üretim imkanları T-A-24: Hidrojen üretim altyapısının yetersiz kalması T-ÇS-3: Sektörlerin fosil kaynak kullanımına devam etmesi
ST5: Medya ve eğitim yoluyla hidrojen teknolojilerinin tanıtılması	S-ET-8: Genç insan kaynağı S-ET-9: Üniversiteler ve yetkin araştırma ekosistemi T-ET-10: Medyanın halkı eğitip yönlendirmede başarısız olması T-ET-8: Yeterli insan kaynağı yetiştirilmemesi T-ET-9: Toplum aydınlatmada başarılı olunmaması
ST6: Karbonsuz ekonomi hedefiyle yeni sektör odaklı kamu desteklerinin sağlanması	S-Y-10: Karbonsuzlaştırma mevzuatı S-E-4: Bölgenin yeşil enerji ve sanayi odaklı kalkınma vizyonu S-Y-11: Bölgenin sürdürülebilir gelişme hedefleri T-ÇS-1: Dekarbonizasyon hedeflerine yönelik uygulama ve yatırım yetersizliği T-Y-13: Değişim stratejileri ve politikalarının oluşmaması
ST7: Bölgelerin dönüşümüne yönelik kamu rehberleri ve danışmanlık sistemleri kurulması	S-Y-12: Güçlü kurumsal yapılar S-A-18: Gelişmiş sektörler ve meslek odaları T-A-23: Hidrojen dönüşümüne yönelik bölgesel hazırlık eksiklikleri T-Y-14: Üniversiteler ve özel sektörün yeterince desteklenmemesi
ST8: Girişimcilik ortamının geliştirilmesi için kurumsal yönetim altyapısının güçlendirilmesi	S-E-6: Güçlü özel sektör varlığı ve yatırımcı dostu altyapı olanakları S-ET-7: Girişimci iş insanları S-Y-12: Güçlü kurumsal yapılar T-Y-16: Bürokratik engellerin oluşması
ST9: Üniversite altyapılarının güvenlik standartlarına göre güncellenmesi	S-ET-9: Üniversiteler ve yetkin araştırma ekosistemi T-A-22: Güvenlik sistematığının kurulmaması T-Y-15: Kod, standartların ve yönetmeliklerin oluşturulmaması
ST10: Kritik sektörlerde hidrojen geçişi için teknoloji yol haritaları hazırlanması	S-EnT-15: Güçlü küçük ölçekli sanayi çeşitliliği S-A-16: Yerel endüstriyel kabiliyetler T-EnT-18: Teknolojilerin kazanılıp geliştirilmemesi T-EnT-19: Araştırma, geliştirme ve inovasyon çalışmalarının yetersiz kalması

Tablo 6. Zayıf Yönler ve Fırsatlar İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler

Stratejik Hedefler	Öncü Kriterler
WO1: Ar-Ge fonları artırılarak teknoloji geliştirme desteklenmeli	W-E-7: Araştırma fonlarının yetersiz olması W-EnT-17: Teknolojik yetkinlik eksikliği W-A-24: Ekosistemin kurulması ve işletilmesine yönelik çalışmaların yetersiz kalması O-A-20: Teknoloji geliştirme imkanları O-E-9: Yurtiçi ve yurtdışı fon, kredi ve destek imkanları O-A-21: Sürdürülebilir bir altyapı geliştirme
WO2: Üniversitelerde hidrojen odaklı lisans ve yüksek lisans programları açılmalı	W-ET-8: Yeterli eleman ve insan kaynağının olmaması O-ET-12: İnsan kaynağını eğitime ve yetiştirme O-A-22: Yurtiçi sektörleri geliştirme
WO3: Yerel kooperatif ve KOBİ'ler aracılığıyla mikro ölçekli hidrojen üretim projeleri desteklenmeli	W-Y-14: Özel sektörde hidrojen teknolojilerine yönelik bilgi ve teknolojik uyum eksikliği W-Y-16: Hidrojen ekosistemine yönelik dönüşüm planlarının hazırlanmaması W-A-21: Altyapı eksikliği ve gereksinimi O-Y-13: İşbirlikliliği ve kurumsal ortaklık geliştirme imkanları O-A-22: Yurtiçi sektörleri geliştirme
WO4: Uluslararası fonlara erişim için stratejik başvuru ofisleri kurulmalı	W-E-5: Teşvik ve destek programlarının eksikliği W-Y-12: H ₂ ile ilgili kurum ve bankaların yetersiz olması O-E-9: Yurtiçi ve yurtdışı fon, kredi ve destek imkanları O-Y-14: Avrupa topluluğu ile entegrasyon
WO5: H ₂ güvenliği konusunda standart geliştirme ve kamu bilgilendirme kampanyaları yürütülmeli	W-ET-9: Hidrojen güvenliğine dair çekinceler W-Y-13: Standartlar ve kodların henüz uygulamaya geçmemesi
WO6: Su temini ve arıtımı konularında sürdürülebilir çözümler geliştirilmeli	W-ÇS-3: Ülkenin artan emisyonları W-ET-10: Temiz hidrojen üretiminde su tüketimine dair çekinceler O-A-21: Sürdürülebilir bir altyapı geliştirme
WO7: Hidrojen sektörüne özel finansal teşvik mekanizmaları geliştirilmeli	W-E-4: Hidrojen teknolojilerinde yüksek yatırım ve işletme maliyetlerinin özel sektör için caydırıcı olması W-E-6: Ticaret ve pazarlama sisteminin eksik olması O-E-9: Yurtiçi ve yurtdışı fon, kredi ve destek imkanları O-E-6: Hidrojen teknolojilerinin yüksek katma değerli üretim ve gelir artışı potansiyeli
WO8: Yerel üreticilere yönelik üretim ve dolum altyapısı hibeleri sağlanmalı	W-EnT-18: Hidrojen teknolojilerinin imalat imkanlarının oluşturulamaması W-A-21: Altyapı eksikliği ve gereksinimi W-A-23: Ölçek büyütme zorlukları O-A-22: Yurtiçi sektörleri geliştirme O-Y-13: İşbirlikliliği ve kurumsal ortaklık geliştirme imkanları
WO9: Sektörel dönüşüm programları için iş dünyasıyla ortak planlama yapılmalı	W-Y-14: Özel sektörde hidrojen teknolojilerine yönelik bilgi ve teknolojik uyum eksikliği W-Y-15: Kurumsal stratejik yapılanmanın eksikliği W-A-24: Ekosistemin kurulması ve işletilmesine yönelik çalışmaların yetersiz kalması O-A-22: Yurtiçi sektörleri geliştirme
WO10: Enerjide dışa bağımlılığı azaltacak hibrit sistem teşvikleri uygulanmalı	W-EnT-20: Enerjide dışa bağımlılık W-ÇS-2: Sektörlerde yoğun fosil kaynak kullanımı O-ÇS-4: Karbonsuz bir ekonomik modeli gerçekleştirme O-EnT-16: Yenilenebilir enerji sektörünü geliştirme

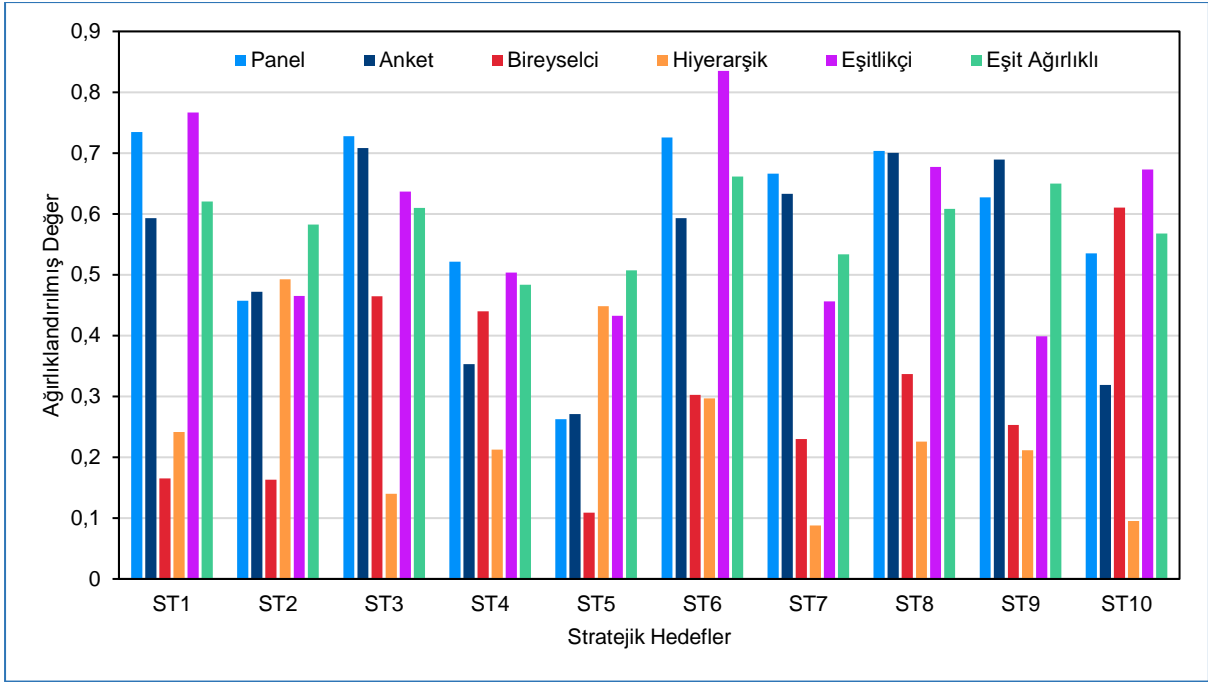
Tablo 7. Zayıf Yönler ve Tehditler İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler

Stratejik Hedefler	Öncü Kriterler
WT1: Ulusal hidrojen eylem planı ve teşvik sistemleri derhal oluşturulmalı	W-E-5: Teşvik ve destek programlarının eksikliği W-Y-15: Kurumsal stratejik yapılanmanın eksikliği T-E-4: Hidrojen yatırımlarına yönelik uzun vadeli ekonomik yol haritası eksikliği T-Y-11: Destek ve teşvik programlarının oluşmaması T-Y-13: Değişim stratejileri ve politikalarının oluşmaması
WT2: CCUS pilot projeleriyle teknoloji transferi yapılmalı	W-ÇS-1: Karbon yakalama ve depolama teknoloji yetersizliği W-ÇS-2: Sektörlerde yoğun fosil kaynak kullanımı W-EnT-18: Hidrojen teknolojilerinin imalat imkanlarının oluşturulamaması T-ÇS-1: Dekarbonizasyon hedeflerine yönelik uygulama ve yatırım yetersizliği T-EnT-18: Teknolojilerin kazanılıp geliştirilmemesi T-EnT-19: Araştırma, geliştirme ve inovasyon çalışmalarının yetersiz kalması
WT3: Altyapı yatırımları için yerel yönetimlere destek verilmeli	W-A-21: Altyapı eksikliği ve gereksinimi W-A-22: Üretim, depolama, taşıma ve dolum ihtiyaçları planlarının yerelde yapılmaması W-Y-16: Hidrojen ekosistemine yönelik dönüşüm planlarının hazırlanmaması T-EnT-17: Dönüşümde gecikme T-A-23: Hidrojen dönüşümüne yönelik bölgesel hazırlık eksiklikleri
WT4: Hidrojen bankası ve özel finans kurumları için düzenleyici çerçeve oluşturulmalı	W-Y-12: H ₂ ile ilgili kurum ve bankaların yetersiz olması W-E-6: Ticaret ve pazarlama sisteminin eksik olması T-E-5: Fon ve kredilerin oluşturulmaması T-Y-12: H ₂ bankalarının ve finans kurumlarının kurulmaması T-A-21: Pazarın ve piyasa şartlarının oluşmaması
WT5: Sektörel planlama eksikliğini aşmak için kamu ve özel sektör arasında düzenli iş birliği mekanizmaları kurulmalı	W-Y-15: Kurumsal stratejik yapılanmanın eksikliği W-EnT-19: Aktif projelerin yetersiz olması T-Y-13: Değişim stratejileri ve politikalarının oluşmaması T-Y-14: Üniversiteler ve özel sektörün yeterince desteklenmemesi T-A-24: Hidrojen üretim altyapısının yetersiz kalması
WT6: Pazar güvenliği için kamu alım garantisi ve fiyat dengeleme mekanizmaları tanımlanmalı	W-E-4: Hidrojen teknolojilerinde yüksek yatırım ve işletme maliyetlerinin özel sektör için caydırıcı olması W-E-6: Ticaret ve pazarlama sisteminin eksik olması T-E-6: Küresel fiyat dalgalanmaları ve dışa bağımlı teknoloji ithalatı T-E-7: Ticaretle ve tarifelerde yükselmeler ve kotalar oluşması T-A-21: Pazarın ve piyasa şartlarının oluşmaması
WT7: Bürokratik engellerin azaltılması için hızlandırılmış izin süreçleri tanımlanmalı	W-Y-15: Kurumsal stratejik yapılanmanın eksikliği W-E-5: Teşvik ve destek programlarının eksikliği T-Y-16: Bürokratik engellerin oluşması T-Y-14: Üniversiteler ve özel sektörün yeterince desteklenmemesi
WT8: Kod, standart ve yönetmeliklerin oluşturulması için teknik komiteler kurulmalı	W-Y-13: Standartlar ve kodların henüz uygulamaya geçmemesi W-EnT-17: Teknolojik yetkinlik eksikliği T-Y-15: Kod, standartların ve yönetmeliklerin oluşturulmaması T-A-22: Güvenlik sistematığının kurulmaması
WT9: Toplumun bilinçlendirilmesi için sürekli medya kampanyaları ve eğitim modülleri geliştirilmeli	W-ET-9: Hidrojen güvenliğine dair çekinceler W-ET-10: Temiz hidrojen üretiminde su tüketimine dair çekinceler W-ET-11: Sosyal etkileşim eksikliği T-ET-9: Toplumun aydınlatmada başarılı olunmaması T-ET-10: Medyanın halkı eğitip yönlendirmede başarısız olması
WT10: Tedarik zinciri ve piyasa dinamiklerini düzenlemek üzere ulusal hidrojen pazarı kurulmalı	W-E-6: Ticaret ve pazarlama sisteminin eksik olması W-EnT-20: Enerjide dışa bağımlılık T-A-20: Tedarik zincirinin oluşturulmaması T-A-21: Pazarın ve piyasa şartlarının oluşmaması



Şekil 25. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Edilmiş Güçlü Yönler Ve Fırsat Stratejileri

Güçlü yönlerin bölgesel ve küresel fırsatlar ile desteklenmesi için üretilmiş olan stratejiler Şekil 255'te sunulmaktadır. En yüksek puanlara sahip stratejiler arasında, karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemlerinin kurulması (SO7) öne çıkmaktadır. Bu strateji, özellikle panel ve anket sonuçlarının yanı sıra, eşitlikçi modelde de oldukça yüksek bir değer almıştır. Bu durum, regülasyon uyumu ve ekosistem bütünlüğünün karar vericiler açısından stratejik önem taşıdığını göstermektedir. Benzer şekilde, yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli hidrojen ürünleri geliştirilmesi (SO8) stratejisi de tüm değerlendirme türlerinde yüksek skorlar almış ve özellikle panel, anket ve eşit ağırlıklı modelde dikkate değer bulunmuştur. Bu, ihracat odaklılık ve yerlilik vurgusunun güçlü bir biçimde desteklendiğine işaret etmektedir. Offshore rüzgar + elektroliz ile yeşil hidrojen üretim altyapısının kurulması (SO1) stratejisi de eşitlikçi ve eşit ağırlıklı modellerde sırasıyla 0.7313 ve 0.7037 puan almıştır. Bu durum altyapı yatırımlarının uzun vadeli stratejik potansiyeline işaret etmektedir. Öte yandan, bazı stratejiler model türüne bağlı olarak daha düşük önceliklendirilmiştir. Örneğin, üniversite ve teknoparklar üzerinden teknoloji üretiminin teşvik edilmesi (SO3) özellikle hiyerarşik ve eşitlikçi modellerde düşük puanlar almıştır. Benzer şekilde, genç insan kaynağına yönelik istihdam ve girişimcilik destekleri (SO6) stratejisi, bireyselci modelde oldukça düşük bir değerde kalmıştır. Bu durum, bu stratejilerin uzun vadeli etkilerinin fark edilmesine karşın, kısa vadede daha az öncelik verilmesi gerektiğini ya da stratejinin uzun vadede sonuç vereceğini düşündürmektedir. Karadeniz H₂S potansiyelinin değerlendirilmesi için saha projeleri (SO4) stratejisi hiyerarşik modelde en yüksek değeri almıştır, bununla birlikte bireyselci modelde oldukça düşük bir puana sahiptir. Bireyselci modelin kısa vadeli, hiyerarşik modelin ise uzun vadeli bir yaklaşım olduğu düşünüldüğünde, Karadeniz'deki hidrojen potansiyelinin değerlendirilmesinin orta-uzun ölçekte gerçekleştirilebileceği öngörülmektedir. Diğer yandan, SO3 ve SO6 gibi stratejiler kısa vadede daha düşük öncelikli görülmeyle birlikte, uzun vadeli kapasite oluşturma ve insan kaynağının geliştirilmesi açısından stratejik önem taşımaktadır. Bu stratejilerin görünürlüğü artırılmalı, etkileri daha iyi anlatılmalı ve destek mekanizmalarıyla güçlendirilmelidir.



Şekil 26. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Güçlü Yönler Ve Tehdit Stratejileri

Şekil 26’da güçlü yönleri kullanarak tehditleri önlemek için kullanılacak stratejilerin farklı yaklaşımlarla ağırlıklandırılmış değerleri görülmektedir. En yüksek genel önceliğe sahip stratejiler arasında, uluslararası standartlarla uyumlu hidrojen mevzuatı hazırlanması (ST1), kamu-özel sektör işbirliğiyle bölgesel dönüşüm planlarının yapılması (ST3) ve karbonsuz ekonomi hedefiyle yeni sektör odaklı kamu desteklerinin sağlanması (ST6) öne çıkmaktadır. Bu stratejiler özellikle panel değerlendirmesinde yüksek değerler almış, eşitlikçi ve eşit ağırlıklı modellerde de güçlü bulunmuştur. Bu durum, hem teknik uzmanlar hem de farklı sosyal öncelikler açısından bu stratejilerin ortak biçimde önemli görüldüğünü ortaya koymaktadır.

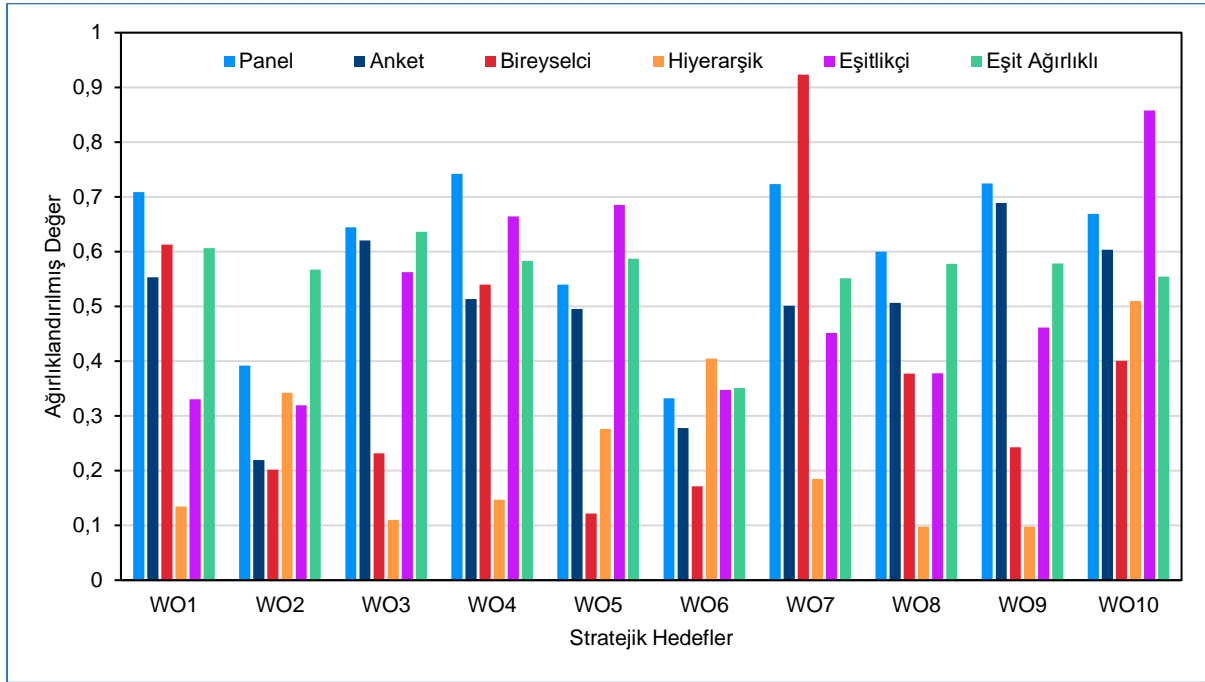
ST6 stratejisi, eşitlikçi modelde 0.84 gibi oldukça yüksek bir skorla ön plana çıkmış; bu, kamu desteklerinin adil dağılımı ve yeni sektörlerin desteklenmesinin sosyal fayda açısından öncelikli olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, ST3 stratejisi hem panel hem de anket skorlarıyla kamu-özel iş birliğinin güçlü bir yönetim unsuru olarak öne çıktığını göstermektedir. Girişimcilik ortamının geliştirilmesi için kurumsal yönetim altyapısının güçlendirilmesi (ST8) stratejisi de tüm model türlerinde dengeli ve yüksek değerlere ulaşarak uygulama açısından güçlü bir potansiyel taşımaktadır.

Diğer yandan, medya ve eğitim yoluyla hidrojen teknolojilerinin tanıtılması (ST5) ve toplumsal algı ve güven için halk odaklı pilot projelerin başlatılması (ST2) stratejileri panel ve anket skorlarında göreceli olarak daha düşük puanlar almıştır. Özellikle ST5, panelde 0.26, ankette 0.27 ile en düşük değerlere sahip strateji olmuştur. Bu durum, tanıtım ve farkındalık stratejilerinin teknik uzmanlar veya paydaşlar tarafından daha az öncelikli görüldüğüne işaret etmektedir.

Bazı stratejiler farklı model yaklaşımlarında ciddi puan farkları göstermiştir. Örneğin, kritik sektörlerde hidrojen geçişi için teknoloji yol haritaları hazırlanması (ST10) stratejisi, bireyselci modelde 0.61 gibi yüksek bir skor alırken hiyerarşik modelde yalnızca 0.10 puanla en düşük değerlerden birini almıştır. Bu durum, birey düzeyinde “kritik sektörler için yol haritaları” stratejisinin faydalı görülmesine rağmen üst düzey karar vericilerin bu stratejiyi daha az önceliklendirebileceğine işaret etmektedir.

Bölgelerin dönüşümüne yönelik kamu rehberleri ve danışmanlık sistemleri kurulması (ST7) stratejisi de anket skorlarında yüksek puanlanmıştır. Bu durum, yerel dönüşümün özel sektör özelinde önemli görüldüğünün göstergesidir. Genel olarak değerlendirildiğinde, ST1, ST3, ST6 ve ST8 stratejileri, model türleri arasında dengeli ve yüksek puanlar alarak kısa ve orta vadeli uygulamalarda öncelikli olarak değerlendirilebilecek stratejiler arasında yer almaktadır. ST10

ve ST7 gibi stratejiler bazı modellerde öne çıkmasına rağmen, yönetsel ya da teknik uzmanlar tarafından daha düşük öncelikli bulunmuştur. ST5 ve ST2 ise stratejik iletişim ve farkındalık çalışmaları olarak değerlendirilmelerine rağmen, genel sıralamada daha geride kalmışlardır.



Şekil 27. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Zayıf Yönler Ve Fırsat Stratejileri

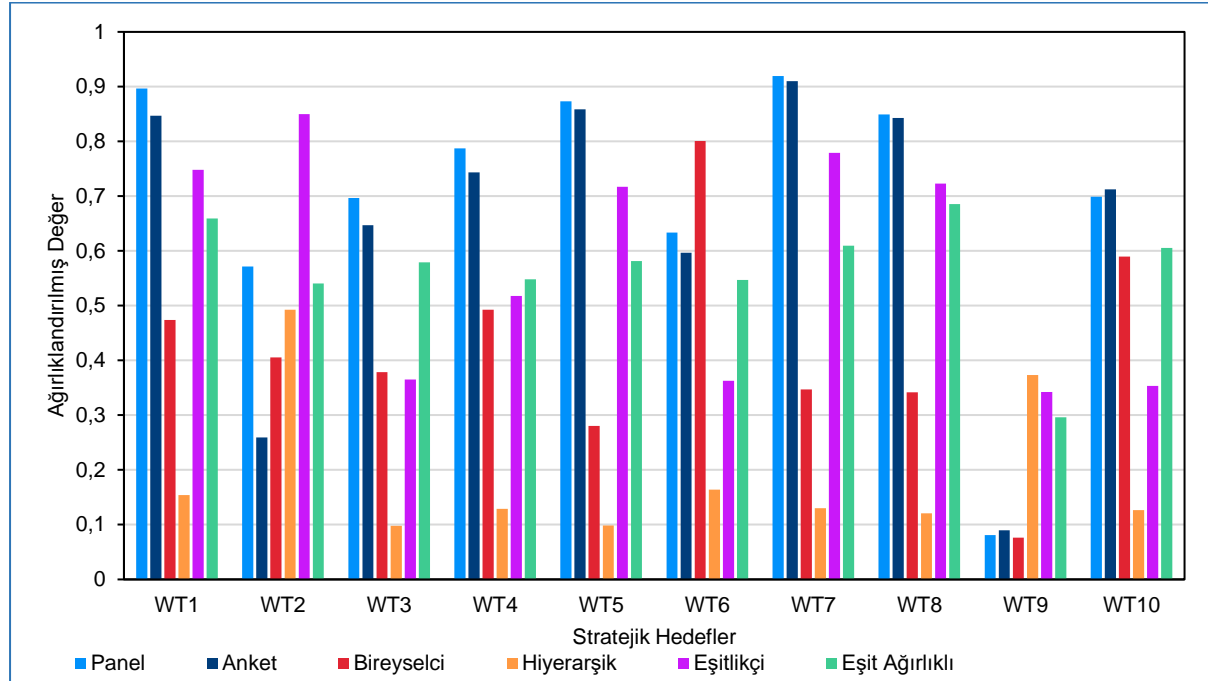
Fırsatları kullanarak zayıf yönleri güçlendirmek için kullanılacak strateji önerilerinin farklı modelleme yaklaşımlarına göre ağırlıklandırılmış değerleri Şekil 27’de sunulmuştur. En yüksek genel değerlendirme puanlarına sahip stratejilerden biri uluslararası fonlara erişim için stratejik başvuru ofisleri kurulmalı (WO4) stratejisidir. Bu strateji, kaynak erişiminin kolaylaştırılması ve dış finansman imkânlarının artırılması açısından öncelikli görülmektedir. Benzer şekilde, hidrojen sektörüne özel finansal teşvik mekanizmaları geliştirilmeli (WO7) stratejisi, panel değerlendirmesinde yüksek bir değer almıştır. Ar-Ge fonları artırılarak teknoloji geliştirme desteklenmeli (WO1) stratejisi de panelde ve ankette gibi yüksek değerlerle yer almıştır. Bu durum teknoloji geliştirme önceliğinin hem karar vericiler hem de uygulayıcılar açısından ön planda olması gerektiğini göstermektedir. Enerjide dışa bağımlılığı azaltacak hibrit sistem teşvikleri uygulanmalı (WO10) stratejisi de tüm modellerde dengeli biçimde yüksek değerlere sahiptir. Bu sonuç, enerji bağımsızlığının en önemli hedeflerden biri olarak algılanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Buna karşılık, bazı stratejiler çeşitli modellerde oldukça düşük önceliklendirilmiştir. Üniversitelerde hidrojen odaklı lisans ve yüksek lisans programları açılmalı (WO2) stratejisi genel olarak modellerde düşük puanlar almıştır. Bu, eğitim temelli stratejilerin kısa vadede daha az etkili görüldüğünü, ancak uzun vadeli kapasite gelişimi açısından ihmal edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Su temini ve arıtımı konularında sürdürülebilir çözümler geliştirilmeli” (WO6) stratejisi ise neredeyse tüm modellerde düşük puanlarla değerlendirilmiştir. Elde edilen değerler bu stratejinin diğerlerine kıyasla daha az öncelikli bulunduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, su yönetimi gibi daha dolaylı etkilerin hidrojen ekosistemi içindeki görünürlüğünün düşük olması olabilir.

Stratejiler arasında öne çıkan bir diğer başlık ise sektörel dönüşüm programları için iş dünyasıyla ortak planlama yapılmalı (WO9) stratejisidir. Panel ve anket skorları oldukça yüksek olmasına rağmen, bireyselci ve hiyerarşik modellerde düşük değerler elde edilmiştir. Bu durum, özel sektör temelli stratejilerin kamu otoriteleri tarafından daha düşük öncelikli görülebileceğini, ancak uygulayıcı çevrelerde önemli bulunduğunu göstermektedir. Yerel kooperatif ve KOBİ’ler aracılığıyla mikro ölçekli hidrojen üretim projeleri desteklenmeli (WO3)

stratejisi de yüksek panel ve anket skorlarıyla dikkat çekmektedir. Özellikle yerel kalkınma odaklı çözümler sahada karşılık bulmaktadır.

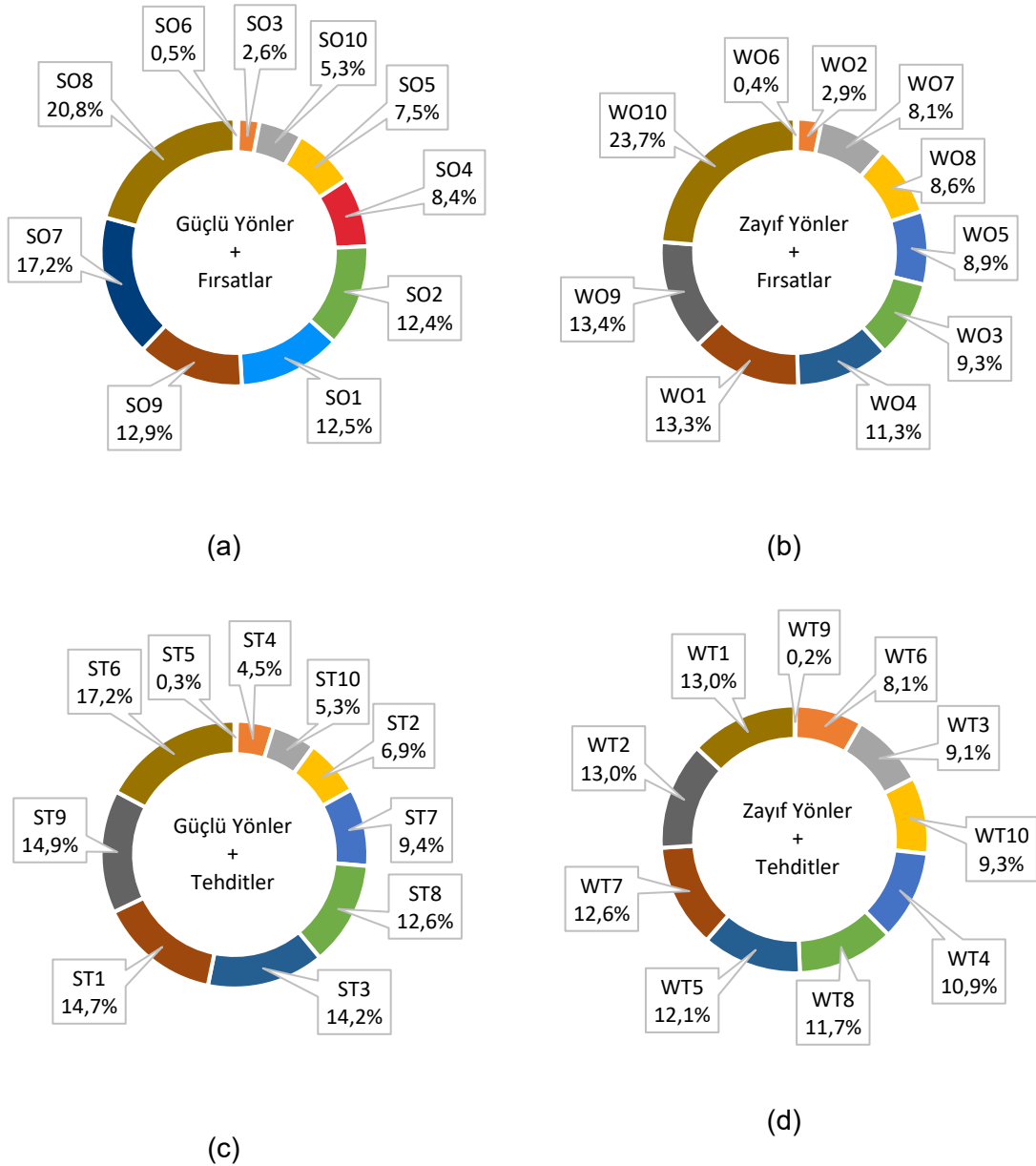
Sonuç olarak, WO1, WO4, WO7, WO9 ve WO10 stratejileri genel olarak hem teknik uzmanlar hem de farklı karar modelleri tarafından öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Buna karşın, eğitim (WO2) ve su yönetimi (WO6) odaklı stratejiler daha düşük puanlar almış, bu durum bu alanların kısa vadeli etki beklentisinin düşük olduğu şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 28. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Zayıf Yönler Ve Tehdit Stratejileri

Panel sonuçlarının değerlendirilmesi

Hidrojen teknolojileri, sürdürülebilir enerji dönüşümünün merkezinde yer alan kritik bir bileşendir. Türkiye'nin bu dönüşüm sürecine entegre olabilmesi için sadece teknolojik yeterlilik değil; aynı zamanda stratejik planlama, mevzuat düzenlemeleri, toplumsal farkındalık, kamu-özel işbirlikleri ve finansal teşvik mekanizmaları gibi çok boyutlu politikaların bütünleşik bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Bu bağlamda, GZFT (Güçlü Yönler, Zayıf Yönler, Fırsatlar ve Tehditler) analizine dayalı olarak geliştirilen stratejik çözüm önerileri, ülkenin hidrojen ekosistemine yönelik bütüncül bir yol haritası sunmaktadır. Şekil 29 panel verilerine dayalı olarak geliştirilen stratejik hedeflerin önem düzeylerine göre değerlendirilmesini sunmaktadır.



Şekil 29. Panel Sonuçlarından Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Önem Sıralaması

Panel sonuçlarına göre en yüksek puanlı stratejik çözüm önerileri zayıf yönler + tehditler kategorisinde yer almaktadır. Ulusal hidrojen eylem planı ve teşvik sistemlerinin derhal oluşturulması (WT1, 0.99) en yüksek oyu alırken, bunu CCUS pilot projeleriyle teknoloji transferi yapılması (WT2, 0.98), bürokratik engelleri azaltmaya yönelik hızlandırılmış izin süreçlerinin tanımlanması (WT7, 0.95) ve kamu-özel sektör arasında düzenli iş birliği mekanizmalarının kurulması (WT5, 0.91) takip etmektedir. Ayrıca kod, standart ve yönetmeliklerin oluşturulması için teknik komitelerin kurulması (WT8, 0.89) ve hidrojen bankası ile özel finans kurumları için düzenleyici çerçeve oluşturulması (WT4, 0.83) gibi sistemsel düzenlemeler de yüksek öncelikli kabul edilmiştir. Bu stratejiler, kurumsal yetersizlikler ve dışsal tehditlerin yönetilmesi için merkezi otoritelerin liderliğinde kapsamlı bir mevzuat, teşvik ve uygulama yapısının kurulması gerektiğini açıkça göstermektedir. Güçlü yönler + tehditler kategorisinde öne çıkan çözüm önerileri, güçlü yönlerin koruyucu etkisini kullanarak tehditleri bertaraf etmeye yöneliktir. Karbonsuz ekonomi hedefiyle yeni

sektör odaklı kamu desteklerinin sağlanması (ST6, 0.98) ve üniversite altyapılarının güvenlik standartlarına göre güncellenmesi (ST9, 0.85) gibi öneriler, hidrojen dönüşümünün altyapı güvenliği ve sürdürülebilir sektörel açılım yönüyle ele alınmasını önermektedir. Uluslararası standartlarla uyumlu hidrojen mevzuatı hazırlanması (ST1, 0.84) ve kamu-özel sektör iş birliğiyle bölgesel dönüşüm planlarının yapılması (ST3, 0.81) önerileri ise hem hukuki çerçeve hem de uygulama planlamasında çok aktörlü yaklaşımları vurgulamaktadır. Katılımcılar, özellikle yerel ve ulusal düzeyde bütüncül stratejiler geliştirilmesini tehditlerle mücadelede etkili araçlar olarak görmektedir.

Zayıf yönler + fırsatlar kategorisinde enerjide dışa bağımlılığı azaltacak hibrit sistem teşvikleri (WO10, 0.98), Ar-Ge fonlarının artırılması ve teknoloji geliştirme desteği (WO1, 0.55) ve iş dünyasıyla ortak planlama ile sektörel dönüşüm programlarının yapılması (WO9, 0.55) olmuştur. Uluslararası fonlara erişim için başvuru ofislerinin kurulması (WO4, 0.47) ve mikro ölçekli yerel projelerin kooperatifler aracılığıyla desteklenmesi (WO3, 0.39) gibi stratejiler, finansman ve tabana yayılma açısından fırsatlar sunmaktadır. Ayrıca H₂ güvenliği konusunda kamu bilgilendirme ve standart geliştirme (WO5, 0.37) ve yerel altyapı hibeleri sağlanması (WO8, 0.36) da eksiklikleri azaltmaya dönük fırsat tabanlı önerilerdir. Bu stratejiler, teknik ve finansal zayıflıkları doğrudan fırsatlarla eşleştiren müdahale alanlarını temsil eder.

Güçlü Yönler+Fırsatlar stratejik hedefleri, Güney Marmara Bölgesi'nin sahip olduğu avantajları fırsatlara dönüştürerek aktif adımlar atmasını amaçlamaktadır. Bu kategoride yüksek puanlı öneriler arasında yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli hidrojen ürünleri geliştirilmesi (SO8, 0.98) ve karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemlerinin kurulması (SO7, 0.81) öne çıkmaktadır. Bunları üniversite-sanayi iş birliğiyle hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi (SO9, 0.61) ve yeşil H₂ üretim altyapısının kurulması (SO1, 0.59) takip etmektedir. Ayrıca H₂ ihracatı için pazar stratejilerinin geliştirilmesi (SO2, 0.58) ve sertifikasyon ve izlenebilirlik sistemlerinin oluşturulması (SO4, 0.40) önerileri de uluslararası rekabetçiliği artırma yönünde değerlidir. Daha düşük puanlı olmakla birlikte girişimcilere teşvik sunulması (SO10, 0.25) ve üniversite-teknopark temelli teknoloji üretimi (SO3, 0.12) gibi insan kaynağı ve bilgi temelli çözümler de potansiyel taşıyan stratejilerdir. Bu grup, bölgenin mevcut güçlü yönlerini küresel yeşil dönüşüm trendleriyle hizalayarak ekonomik sıçrama yaratabilecek öncelikli fırsatlara odaklanmaktadır.

Anket sonuçlarının değerlendirilmesi

Şekil 30 anket sonuçlarından elde edilmiş olan stratejik hedef önerilerine ait önem sıralamasını sunmaktadır. Anket sonuçlarına göre, en öncelikli stratejiler zayıf yönler ve tehditler kategorisinde yer almaktadır. Bürokratik engellerin azaltılması için hızlandırılmış izin süreçlerinin tanımlanması (WT7 – 0.2056) en yüksek puanı almıştır. Bunu sektörel planlama eksikliğini gidermeye yönelik kamu-özel iş birliği mekanizmaları kurulması (WT5 – 0.1971) ve ulusal hidrojen eylem planı ile teşvik sistemlerinin oluşturulması (WT1 – 0.1951) izlemektedir. Kod ve standartların oluşturulması için teknik komiteler kurulması (WT8 – 0.1944) ve hidrojen bankası ile özel finans kurumları için düzenleyici çerçeve (WT4 – 0.1779) gibi yapısal düzenlemeler yine yüksek puanlarla öne çıkmaktadır. Bu grup, kamu katılımcıları için stratejik müdahalenin en fazla gerekli olduğu alanlardır.



Şekil 30. Anket Sonuçlarından Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Önem Sıralaması

İkinci sırada önem verilen stratejiler güçlü yön ve tehditlerde yer almaktadır. En dikkat çeken çözüm önerileri şunlardır: Kamu-özel sektör işbirliğiyle bölgesel dönüşüm planlarının yapılması (ST3 – 0.3449) ve üniversite altyapılarının güvenlik standartlarına göre güncellenmesi (ST9 – 0.2058). Ayrıca girişimcilik ortamının güçlendirilmesi (ST8 – 0.1830) ve karbonsuz ekonomi için kamu desteklerinin sağlanması (ST6 – 0.1622) de öncelikli bulunmuştur. Uluslararası mevzuata uyum (ST1 – 0.1450) ve bölgesel rehber sistemlerinin kurulması (ST7 – 0.1451) gibi öneriler de kurumsal ve düzenleyici tehditlerin giderilmesine yönelik stratejik öncelikler arasında yer almaktadır. Bu tablo, bölgede yapısal dönüşüm için güçlü altyapıların riskleri bertaraf etme gücüne sahip olduğunu göstermektedir.

Zayıf yönler ve fırsatlar kategorisindeki hedefler çok orta düzeyde puanlarla temsil edilmiştir. Enerjide dışa bağımlılığı azaltacak hibrit sistem teşvikleri (WO10 – 0.1545) en çok öne çıkan çözüm olurken, iş dünyasıyla sektörel dönüşüm programları (WO9 – 0.1687) ve mikro KOBİ projelerinin desteklenmesi (WO3 – 0.1574) gibi ölçeklenebilir öneriler önemsenmiştir. Ar-Ge desteklerinin artırılması (WO1 – 0.1461), yerel dolmuş altyapısı hibeleri (WO8 – 0.1383) ve

finansal teşvik mekanizmalarının oluşturulması (WO7 – 0.1374) gibi teknik kapasiteleri iyileştirici öneriler de öne çıkmıştır. Ancak lisans programları (WO2 – 0.0904) ve su temini çözümleri (WO6 – 0.1001) gibi öneriler görece daha düşük puan almıştır. Bu, anket katılımcılarının somut yatırım ve teknoloji desteklerini daha öncelikli gördüğünü ortaya koyar. Güçlü yönler ve fırsatlar kategorisinde verilen puanlar genellikle dengeli dağılmıştır. En öne çıkan öneri, yeşil hidrojen için izlenebilirlik ve sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi (SO4 – 0.1999) olmuştur. Bunu karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemlerinin kurulması (SO7 – 0.1871), yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli ürünler (SO8 – 0.1653) ve H₂ ihracat stratejilerinin geliştirilmesi (SO2 – 0.1527) gibi ekonomik ve dış ticaret odaklı stratejiler takip etmektedir. Üniversite-sanayi iş birliği (SO9 – 0.1396) ve girişimcilere teşvik programları (SO10 – 0.1339) da yüksek öncelikli olarak algılanmıştır. En düşük puanlar ise üniversite ve teknoparklar üzerinden teknoloji üretimi (SO3 – 0.0968) ve genç insan kaynağına girişimcilik desteği (SO6 – 0.0999) gibi sosyal/insani yönlü stratejilere verilmiştir.

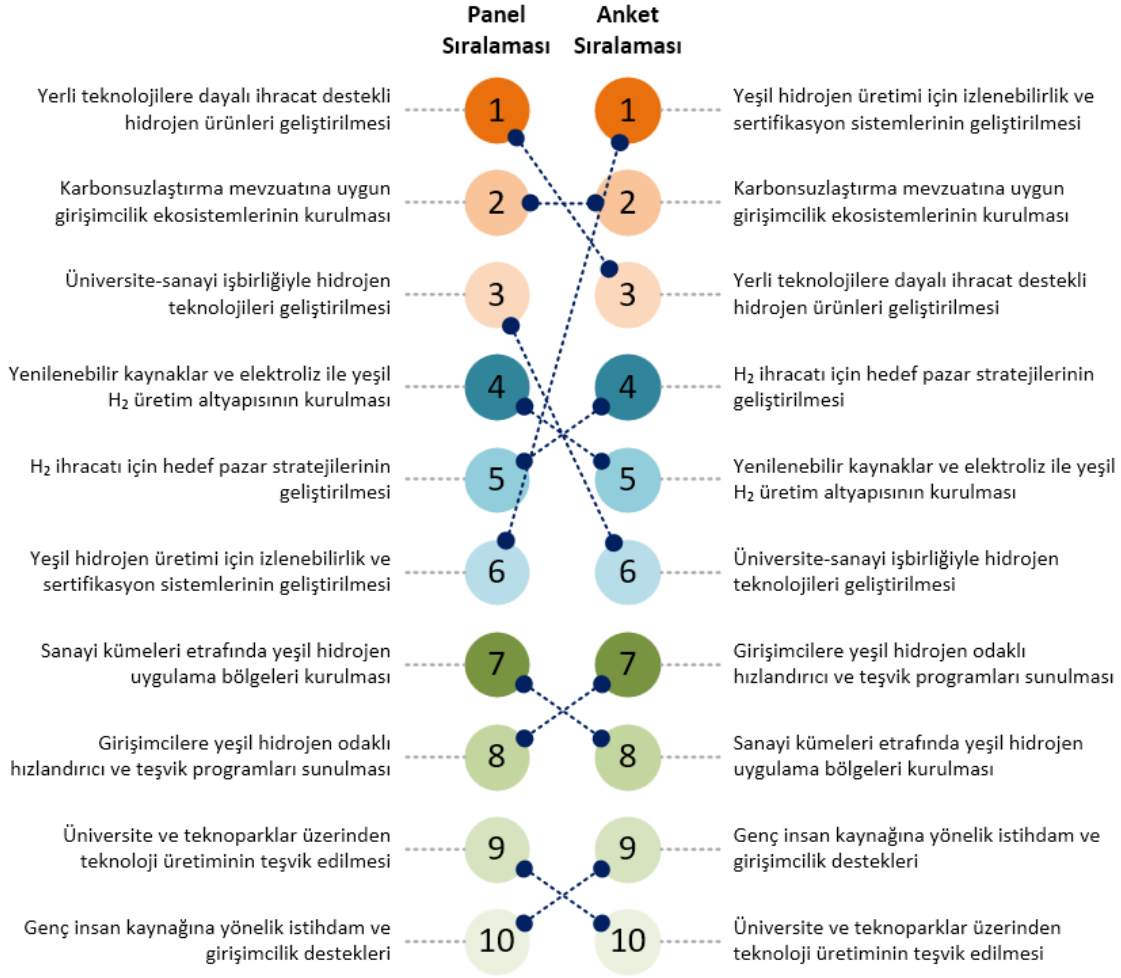
Panel ve anket sonuçlarının karşılaştırmalı değerlendirilmesi

Panel ve anket sıralamalarının anlaşılabilirliği ve yorumlanabilirliği için her bir stratejik hedef türü sıralanarak, sıralama karşılaştırması yapılmıştır. Güçlü yanlar ve fırsatlardan elde edilen stratejik hedeflerin karşılaştırılması Şekil 31’de sunulmuştur. Her iki grup da "Karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemlerinin kurulması" çözüm önerisini yüksek öncelikli kabul etmiştir. Bu uyum, sürdürülebilir dönüşümün yalnızca teknik değil aynı zamanda düzenleyici altyapı ile de desteklenmesi gerektiği konusunda ortak bir anlayış olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, "Yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli hidrojen ürünlerinin geliştirilmesi" önerisi de panelde 1., ankette 3. sırada yer alarak her iki grup açısından stratejik önemde görülmüştür.

Ancak en dikkat çeken farklılık, "Yeşil hidrojen üretimi için izlenebilirlik ve sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi" çözüm önerisinde ortaya çıkmaktadır. Panel katılımcıları bu başlığı 6. sırada değerlendirirken, anket katılımcıları 1. sıraya yerleştirmiştir. Bu fark, geniş katılımcı kitlesinin, piyasa güveni ve uluslararası ticaret açısından izlenebilirliğe verdiği önemin uzman paneline göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, "Üniversite-sanayi işbirliğiyle hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi" önerisi panelde 3. sıradayken ankette 6. sıraya gerilemiştir; bu da teknik uzmanların üniversite tabanlı inovasyonu daha kritik gördüklerini düşündürmektedir.

İki grup arasındaki sıralama farklılıkları, uygulayıcıların (panel) teknik yeterlilik, inovasyon ekosistemi ve kümelenme dinamiklerine daha fazla odaklandığını, halk veya geniş katılımcı kitlenin (anket) ise uygulamaya dönük güvenlik, doğrulama ve ticari sürdürülebilirlik boyutlarına daha fazla önem verdiğini göstermektedir. Özellikle "Sanayi kümeleri etrafında yeşil hidrojen uygulama bölgeleri kurulması" önerisinin panelde 7. sıradayken ankette 8. sıraya gerilemesi; "Girişimcilere yönelik teşvik programları" başlığının ise anket sıralamasında daha yukarıda yer alması, uygulayıcı-oylayıcı farklarının pratik ve ekonomik beklentilere göre şekillendiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu karşılaştırma, karar vericilerin hem teknik uzmanların hem de kamuoyunun önceliklerini dikkate alarak bütüncül stratejiler geliştirmesi gerektiğine işaret etmektedir. İzlenebilirlik, girişimcilik destekleri ve dış ticaret olanakları kamuoyu açısından öne çıkarken; üniversite-sanayi işbirliği, kümelenme ve mevzuata uyum panel katılımcıları tarafından daha teknik öncelikler olarak konumlandırılmıştır. Bu çok katmanlı bakış, bölgenin hidrojen vizyonuna stratejik derinlik kazandırmaktadır.



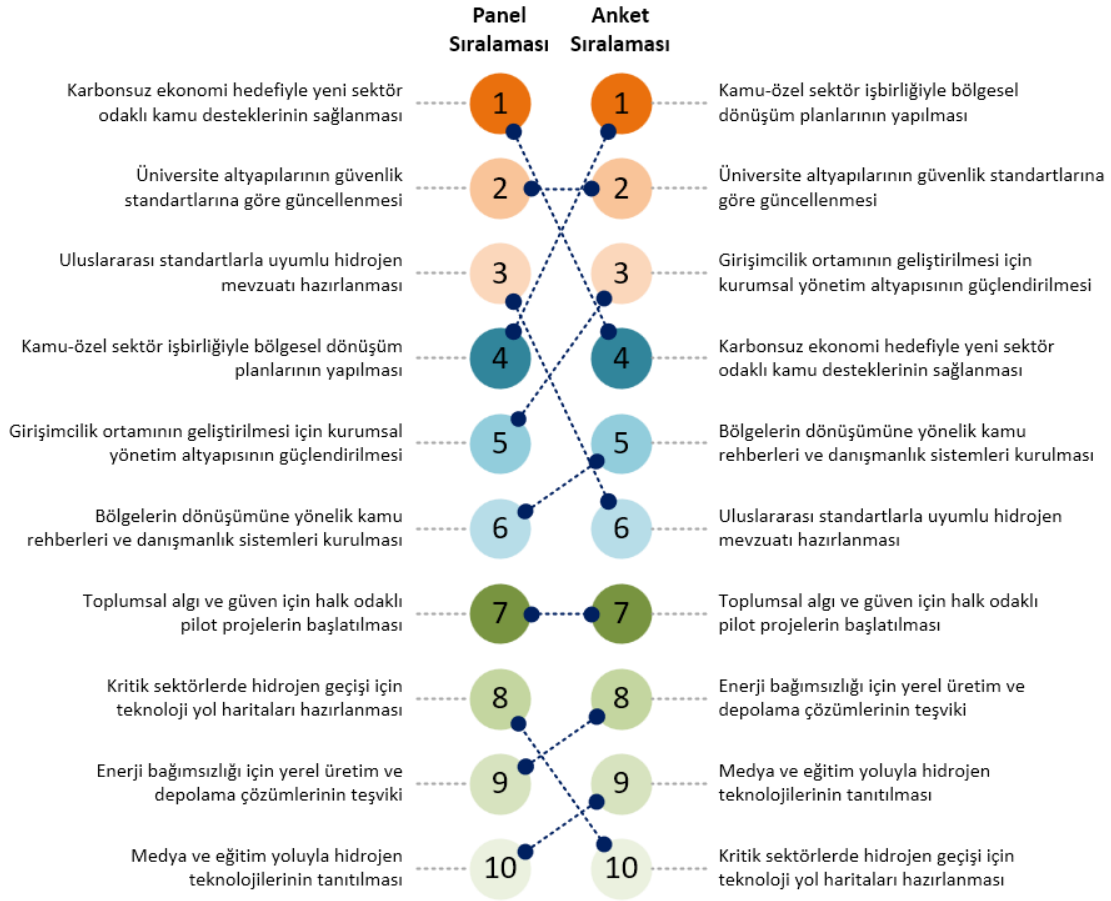
Şekil 31. Güçlü Yanlar Ve Fırsatlardan Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel ve Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması

Güney Marmara'nın hidrojen ekonomisine geçiş sürecinde güçlü yönlerden yararlanarak tehditleri dengelemeyi hedefleyen stratejik çözüm önerileri, hem uzman paneli hem de geniş katımlı anket sonuçları üzerinden değerlendirilerek sıralamalar Şekil 32'de sunulmuştur. Görselde yer alan on stratejik hedefin sıralamaları incelendiğinde bazı başlıklarda yüksek uyum, bazılarında ise dikkat çekici farklılıklar gözlemlenmektedir.

Panel ve anket sonuçları arasında genel bir uyum bulunsa da bazı stratejilerde dikkat çekici öncelik farklılıkları öne çıkmaktadır. Bu farklar, uzmanlar ile saha katılımcılarının tehdit algıları ve güçlü yönleri harekete geçirme yöntemleri açısından farklı yaklaşımlar benimsediklerini göstermektedir.

"Kamu-özel sektör işbirliğiyle bölgesel dönüşüm planlarının yapılması" çözüm önerisi, anket katılımcıları tarafından en yüksek öncelikli strateji olarak belirlenmiştir (ankette 1. sıra), panelde ise 4. sırada yer almıştır. Bu durum, katılımcıların bölgesel dönüşüm süreçlerinde işbirliği temelli, uygulamaya dönük yaklaşımlara yüksek önem verdiğini, buna karşılık uzmanların bu başlığı daha orta düzeyde konumlandığını ortaya koyar.

Her iki grup da "Üniversite altyapılarının güvenlik standartlarına göre güncellenmesi" önerisini üst sıralarda değerlendirmiştir (panelde 2., ankette 2.). Bu uyum, akademik araştırma altyapılarının güçlendirilmesinin ortak bir stratejik ihtiyaç olarak görüldüğünü gösterir. Benzer şekilde "Toplumsal algı ve güven için halk odaklı pilot projelerin başlatılması" başlığı da her iki grupta 7. sırada yer alarak toplumsal kabule yönelik stratejilerin ortak önem taşıdığını göstermektedir.



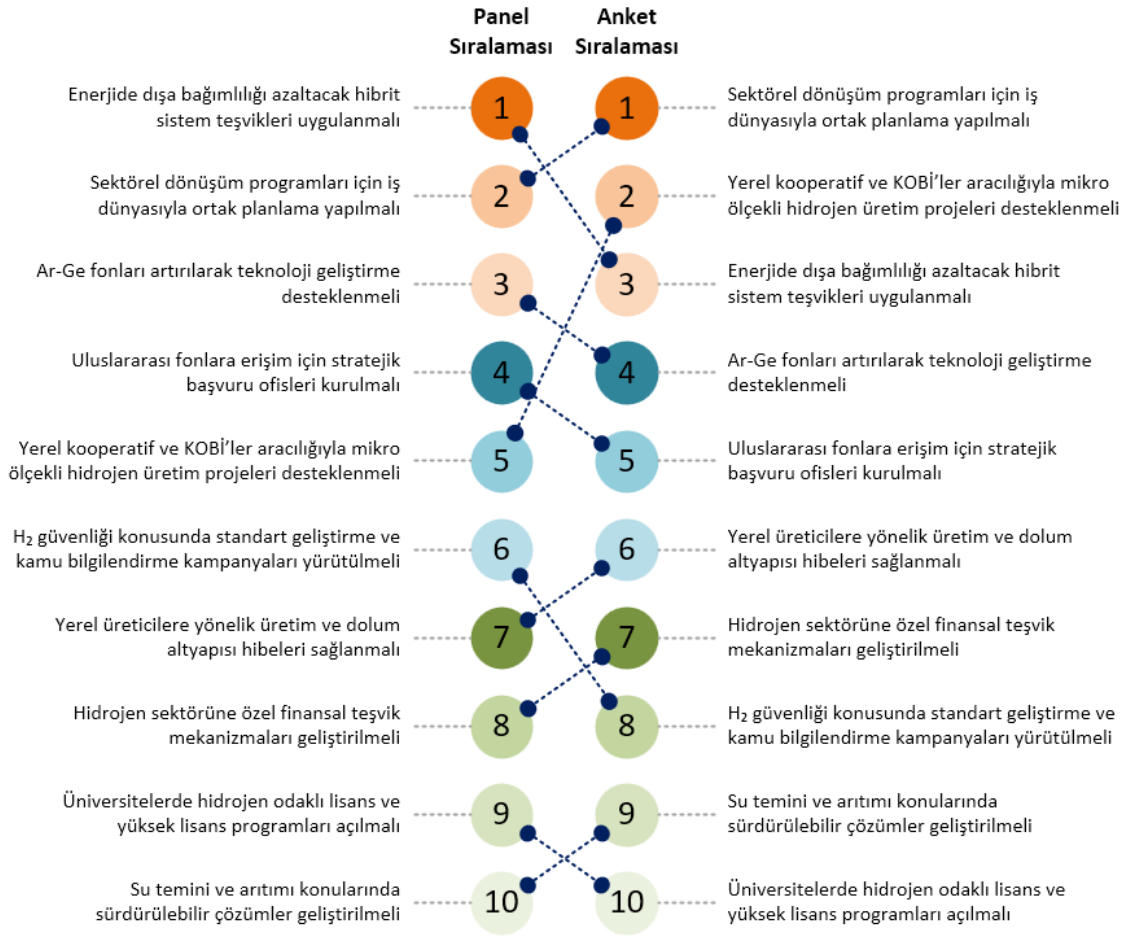
Şekil 32. Güçlü Yanlar Ve Tehditlerden Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel Ve Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması

Ancak bir sıralama farkı, “Karbonsuz ekonomi hedefiyle yeni sektör odaklı kamu desteklerinin sağlanması” başlığında görülmektedir. Panel katılımcıları bu çözümü en öncelikli strateji olarak belirlerken (1. sıra), anket katılımcıları 4. sıraya yerleştirmiştir. Bu farklılık, uzmanların politika desteğine ve teşvik sistemine sistematik biçimde odaklandığını; anket katılımcılarının ise daha çok bölgesel uygulamalara ve yönetişime önem verdiğini yansıtmaktadır.

Benzer şekilde “Uluslararası standartlarla uyumlu hidrojen mevzuatı hazırlanması” çözüm önerisi panelde 3. sırada iken, anket sıralamasında 6. sıraya gerilemiştir. Bu fark, mevzuat ve uluslararası uyum gibi yapısal temaların halk düzeyinde daha geri planda algılandığını göstermektedir. Buna karşın, “Girişimcilik ortamının güçlendirilmesi için kurumsal yönetim altyapısının iyileştirilmesi” önerisi panelde 5. sıradayken, ankette 3. sıraya yükselmiştir. Bu durum, kurumsal yetkinliklerin sahada daha belirgin bir ihtiyaç olarak değerlendirildiğini işaret eder.

Son sıralarda ise “Kritik sektörlerde hidrojen geçişi için teknoloji yol haritaları hazırlanması” başlığı panelde 8., ankette 10. sırada yer alarak genel olarak düşük öncelikli bulunmuştur. “Medya ve eğitim yoluyla hidrojen teknolojilerinin tanıtılması” önerisi ise ankette 9., panelde 10. sıradadır. Bu durum, farkındalık oluşturma ve uzun vadeli planlamaya dair stratejilerin, daha acil altyapı ve yönetim başlıklarının gerisinde kaldığını göstermektedir.

Genel değerlendirme olarak, panel katılımcıları daha çok sistematik, yapısal ve regülasyon temelli tehditleri güçlü yönlerle aşmaya odaklanırken; anket katılımcıları yönetişim, yerel uygulama ve kurumsal işbirliği ekseninde daha uygulamalı ve sahaya dönük stratejileri öncelmiştir. Bu farklılıklar, politika yapıcıların stratejik öncelikleri belirlerken hem teknik uzmanlığın hem de paydaş beklentilerinin bütüncül şekilde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 33. Zayıf Yanlar Ve Fırsatlardan Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel Ve Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması

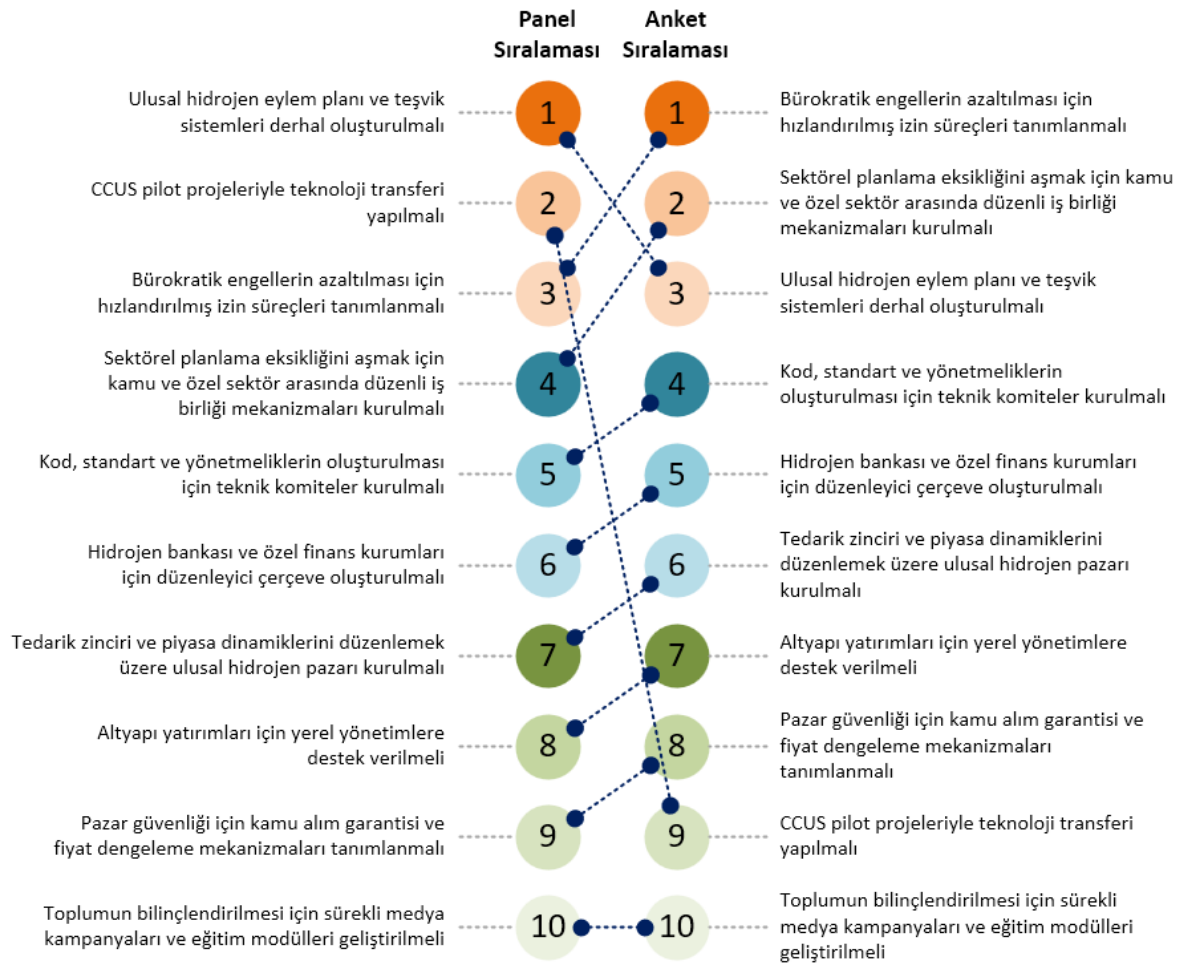
Zayıf yönler ve fırsatların birlikte ele alındığı stratejik çözüm önerilerinin panel ve anket sıralamaları Şekil 33'de karşılaştırılmıştır. Uygulayıcı uzmanlar ile geniş katılımcı grubunun önceliklendirme eğilimlerinde hem ortaklaşan hem de ayrışan eğilimler görülmektedir. Bu farklar, paydaş gruplarının mevcut yapısal sorunlara karşı hangi fırsatları öncelikli olarak harekete geçirme eğiliminde olduklarını göstermektedir.

En dikkat çekici uyum, "Sektörel dönüşüm programları için iş dünyasıyla ortak planlama yapılmalı" çözüm önerisinde gözlemlenmektedir. Panelde 2., ankette ise 1. sırada yer alan bu başlık, özellikle hidrojen geçiş sürecinde sektörlerin aktif katılımı ve yönetim temelli planlama süreçlerinin her iki grup tarafından da stratejik önemde görüldüğünü ortaya koymaktadır. Ayrıca "Ar-Ge fonlarının artırılarak teknoloji geliştirme süreçlerinin desteklenmesi" çözüm önerisi de her iki sıralamada üst sıralarda (panelde 3., ankette 4.) yer almakta; teknoloji odaklı gelişim ihtiyacının ortak kabul gördüğünü yansıtmaktadır.

Ancak bazı başlıklarda belirgin farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Örneğin, "Enerjide dışa bağımlılığı azaltacak hibrit sistem teşvikleri" panel katılımcıları tarafından en öncelikli çözüm olarak sıralanmışken (1. sıra), anket katılımcıları tarafından 3. sırada değerlendirilmiştir. Bu fark, uzmanların teknik riskler ve enerji güvenliği tehdidine daha yüksek hassasiyet gösterdiğini, anket katılımcılarının ise bu başlığı diğer ekonomik fırsatların gölgesinde bıraktığını göstermektedir. Buna karşılık "Yerel kooperatif ve KOBİ'ler aracılığıyla mikro ölçekli hidrojen üretim projeleri desteklenmeli" önerisi anket katılımcıları tarafından 2. sıraya yerleştirilmişken panelde 5. sırada kalmıştır; bu durum anket grubunun yerel kalkınma ve topluluk temelli çözümlere verdiği önemi ortaya koymaktadır.

Benzer şekilde “Hidrojen sektörüne özel finansal teşvik mekanizmalarının geliştirilmesi” başlığı panelde 8. sıradayken, ankette 7. sıraya yükselmiştir. Bu da piyasa teşvikleri ve ekonomik sürdürülebilirlik konularının geniş katılımcı kitlesi açısından daha öncelikli olduğunu göstermektedir. “H₂ güvenliği konusunda standart geliştirme ve kamu bilgilendirme kampanyaları yürütülmeli” önerisi ise panelde 6. ankette 8. sırada yer almış; yani iki grup tarafından da orta derecede öncelikli bulunmuştur.

Her iki grupta da son sıralarda yer alan öneriler ise benzerlik göstermektedir. “Üniversitelerde hidrojen odaklı lisans ve yüksek lisans programları açılması” çözüm önerisi, her iki grupta da 9. veya 10. sırada konumlanarak, orta ve uzun vadeli kapasite geliştirme hedeflerinin kısa vadeli zayıflıkları aşmak açısından daha az öncelikli görüldüğünü göstermektedir. Aynı şekilde, “Su temini ve arıtımı konularında sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi” de hem panel hem de anket grubunda son sıralarda yer almıştır.



Şekil 34. Zayıf Yanlar Ve Tehditlerden Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel Ve Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması

Genel olarak değerlendirildiğinde; uzman paneli daha teknik, yapısal ve enerji güvenliği odaklı stratejilere öncelik verirken; anket katılımcıları daha yerel, ekonomik ve katılımcı çözümleri önceliklendirmektedir. Bu durum, karar vericilerin hem ulusal enerji güvenliği hem de bölgesel kalkınma ve katılım hedeflerini dengeli biçimde ele alarak zayıf yönleri fırsata çevirecek stratejik hamleler geliştirmesini gerekli kılmaktadır. Zayıf yönler ile tehditlerin bileşiminden türetilen stratejik hedeflerin yer aldığı Şekil 34, panel ve anket katılımcılarının stratejik hedef önceliklerini ortaya koymaktadır. Genel olarak panel ve anket değerlendirmeleri bu stratejik hedefler özelinde oldukça yüksek bir uyum göstermektedir. Her iki grup da öncelikle bürokrasinin azaltılması, koordinasyon mekanizmalarının kurulması, düzenleyici çerçevelerin

oluşturulması ve piyasaların yapılandırılması gibi sistemik çözümleri önceliklendirmiştir. Toplum bilinci, fiyat garantileri veya belirli teknoloji alanları gibi özel stratejiler ise yapısal sorunların çözümünden sonra ele alınacak hedefler olarak sıralamada geri plana düşmüştür. Panelin birinci sırasında yer alan "Ulusal hidrojen eylem planı ve teşvik sistemleri derhal oluşturulmalı" çözüm önerisi, anket sıralamasında 3. sıraya gerilemiştir. Bu farklılık, uzmanların ulusal ölçekte politika yapımına ve bütüncül strateji oluşturmaya daha fazla önem verdiğini; anket katılımcılarının ise uygulama düzeyindeki idari engellerin öncelikle çözülmesi gerektiğini düşündüğünü ortaya koymaktadır. Benzer şekilde "CCUS pilot projeleriyle teknoloji transferi yapılmalı" önerisi panelde 2. sıradayken, ankette 9. sıradadır; bu da panelin teknolojik hazırlık seviyesine odaklandığını, anket grubunun ise bu konuyu görece daha düşük öncelikli gördüğünü göstermektedir.

GZFT Analizinin Genel Değerlendirmesi

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen Güney Marmara Bölgesi Hidrojen Vadisi GZFT analizi, bölgenin hidrojen teknolojileri ekseninde sahip olduğu mevcut kapasiteyi, yapısal eksiklikleri, stratejik fırsatları ve karşı karşıya kalılabilecek tehditleri çok boyutlu olarak incelemiştir. Gerek panel çalışmaları gerekse anket uygulamaları ile elde edilen veriler; çevresel, ekonomik, toplumsal, yönetsel, teknolojik ve altyapısal boyutları kapsayan bütüncül bir değerlendirme çerçevesi sunmuştur. Bu bağlamda, hidrojen ekonomisine geçişte bölgenin sahip olduğu avantajların sürdürülebilir ve rekabetçi bir yapı oluşturmak adına stratejik bir kaldıraç etkisi yaratabileceği anlaşılmaktadır.

Çalışma bulguları, çevre ve sürdürülebilirlik başta olmak üzere, enerji çeşitliliği, coğrafi konum ve mevzuat altyapısının bölgenin en güçlü yönlerini oluşturduğunu ortaya koymuştur. Buna karşılık altyapı eksiklikleri, teknolojik üretim kapasitesinin sınırlılığı, finansman olanaklarının azlığı ve yönetsel belirsizlikler bölgenin hidrojen dönüşüm sürecini tehdit eden zayıf yönler olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, yalnızca teknik değil aynı zamanda kurumsal düzeyde de çok yönlü bir dönüşüm ihtiyacını işaret etmektedir.

Panel çalışmasına göre en yüksek puan alan hedef WT7 kodlu "Bürokratik engellerin azaltılması için hızlandırılmış izin süreçleri tanımlanmalı" stratejisidir ve 0.919 puan alarak panelin en acil çözüm bekleyen sorununun idari engeller olduğunu düşündürmektedir. Aynı strateji, anket çalışmasında da en yüksek puanı (0.910) almıştır. Benzer şekilde sektörel planlama eksikliğini aşmak için kamu-özel stratejik planlama birlikleri kurulmalı (WT5) hedefi (0.873 panel, 0.859 anket) ve kod, standart ve yönetmeliklerin oluşturulması için teknik komiteler kurulmalı (WT8) hedefi (0.849 panel, 0.843 anket) kodlu hedefler de her iki veride de üst sıralarda yer almaktadır. Bu durum, stratejik planlama ve teknik komitelerin kurulmasının, sistemin bütüncül olarak yönetilmesi için kritik görüldüğünü ortaya koymaktadır. Aynı zamanda uluslararası fonlara erişim için stratejik başvuru ofisleri kurulmalı stratejik hedefi 0.742 puan ile panel tarafından önceliklendirilmiştir. Ancak anket sonucunda bu hedefin daha düşük öneme sahip olduğu (0.513) görülmektedir. Bu fark, panel uzmanlarının dış fon kaynaklarına erişimi daha kritik bir unsur olarak görürken, anket katılımcıların daha yerel ve mikro çözümlere odaklandığını ortaya koymaktadır. Bununla birlikte dış fon kaynaklarının çeşitliliği düşünüldüğünde, özel sektörün bu konuda bilgilendirilmesinin çok önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Sektörel dönüşüm programları için iş dünyasıyla ortak planlama yapılmalı (WO9) (0.725 panel, 0.689 anket) ve Yerel kooperatif ve KOBİ'ler aracılığıyla mikro ölçekli hidrojen üretim projeleri desteklenmeli (WO3) (0.644 panel, 0.621 anket) stratejik hedefleri her iki listede de ilk sıralarda yer almakta ve iş dünyasıyla ortak planlama ile yerel kooperatif desteklerinin önemini vurgulamaktadır.

Güçlü yanlar ve fırsatlar için önerilen stratejik hedefler içinde panelde en yüksek puanı alan hedef 0,719 puan ile Karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemlerinin kurulması (SO7) stratejik hedefi, anket verisinde de benzer şekilde önceliklendirilmiştir. Bu, hukuki altyapının oluşmasının sadece kamu tarafında değil, özel girişimciler tarafından da kritik olarak algılandığını göstermektedir. Onu takip eden hedefler yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli hidrojen ürünleri geliştirilmesi (0.707 panel, 0.652 anket) ve üniversite-sanayi

iş birliğiyle hidrojen teknolojileri geliştirilmesi (0.7 panel, 0.484 anket) ile yerli teknolojilerin geliştirilmesi ve üniversite-sanayi iş birliğinin desteklenmesi öncelikli hedeflerdir.

Fırsatlar boyutunda, yeşil hidrojenin ihracat potansiyeli, uluslararası finansman imkanları, sürdürülebilir kalkınma hedefleri ve 2053 karbon nötr vizyonu bölge açısından son derece önemli imkânlar sunmaktadır. Ancak bu fırsatların hayata geçirilebilmesi, bölgesel farkındalık, politika uyumu, yatırım koordinasyonu ve teknoloji transfer mekanizmalarının güçlü bir şekilde inşa edilmesine bağlıdır. Tehdit unsurlarında ise özellikle dekarbonizasyon sürecinin sekteye uğraması, destek mekanizmalarının kurulamaması ve teknoloji geliştirme alanında yaşanabilecek gerilemeler, bölgenin uzun vadeli enerji dönüşüm hedeflerini zora sokabilecek kritik riskler olarak tanımlanmıştır.

GZFT analizinin stratejik faydası yalnızca mevcut durumu analiz etmekle sınırlı değildir. Aynı zamanda güçlü yön-fırsat, zayıf yön-fırsat, güçlü yön-tehdit ve zayıf yön-tehdit eşleşmeleri üzerinden geliştirilen stratejiler aracılığıyla geleceğe dönük yönelimlerin belirlenmesine de katkı sağlamaktadır. Öne çıkan stratejik öneriler arasında yeşil hidrojen üretimine yönelik altyapı yatırımları, üniversite-sanayi iş birliklerinin artırılması, standart ve mevzuat sisteminin güçlendirilmesi, kamu-özel sektör koordinasyonunun sağlanması ve toplumsal farkındalık çalışmalarının yaygınlaştırılması yer almaktadır.

Sonuç olarak, Güney Marmara Bölgesi hidrojen temelli bir enerji ekosisteminin inşasında öncü rol üstlenebilecek potansiyele sahiptir. Bu potansiyelin etkin şekilde değerlendirilmesi, yalnızca bölgesel kalkınmaya değil, aynı zamanda Türkiye'nin enerji bağımsızlığı, iklim taahhütleri ve teknolojik rekabetçiliğine katkı sağlayacak bütüncül bir vizyonun hayata geçirilmesini mümkün kılacaktır. GZFT analizinden elde edilen veriler, bu vizyonun stratejik temelini oluşturmakta ve karar vericilere yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

4.3. Çanakkale ve Balıkesir İçin Yeşil Hidrojen Odaklı Mekânsal Gelişim Stratejisi

2030, 2035 ve 2053 Yıllarına İlişkin Hidrojen Arz ve Talebine Ait Projeksiyonlar ve İlgili Bulguların Mekansal Gelişim Şeması

Güney Marmara Bölgesi, sahip olduğu endüstriyel altyapı, liman erişimi, rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeli ile Türkiye'nin yeşil hidrojen üretiminde öncü rol üstlenebilecek bölgeleri arasındadır. Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefiyle uyumlu olarak Balıkesir ve Çanakkale'de yeşil hidrojenin üretimi, depolanması, dağıtımı ve kullanımına yönelik stratejik planlamanın yapılması, sürdürülebilir kalkınmanın itici gücü olacaktır. Bu çalışmada yeşil hidrojen odaklı bir mekânsal gelişim stratejisi hazırlanmıştır.

4.3.1. Giriş

Balıkesir ve Çanakkale, Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan ve TR22 Düzey 2 istatistiki bölgesini oluşturan iki ildir. Şehirlerin coğrafi konumları Şekil 35'te sunulmuştur. Coğrafi olarak stratejik bir konumda bulunan bu iller, hem Marmara Denizi'ne hem de Ege Denizi'ne kıyısı olan nadir bölgelerden biridir. Balıkesir, doğuda Bursa ve Kütahya, güneyde Manisa ve İzmir, batıda Çanakkale ile komşudur. Çanakkale ise kuzeyde Tekirdağ ve Edirne'ye, doğuda Balıkesir'e komşudur. Aynı zamanda Asya ile Avrupa arasında geçiş sağlayan Çanakkale Boğazı üzerinde yer almaktadır. Bu boğaz, Türkiye'nin Karadeniz'i Akdeniz'e bağlayan stratejik ulaşım yollarından biridir.



Şekil 35. Çanakkale Ve Balıkesir'in Coğrafi Konumu Ve Stratejik Noktalar

Balıkesir ve Çanakkale'nin doğu komşusu olan Bursa, Türkiye'nin en büyük sanayi merkezlerinden biridir. Özellikle enerji, lojistik ve hammadde tedariki açısından Balıkesir ve Çanakkale ile yakın ilişki içindedir. Bursa'nın otomotiv, tekstil ve makine sektörlerindeki üretim kapasitesi, çevre illerle olan entegrasyonunu önemli bir hale getirmektedir. Bu bağlamda, Çanakkale ve Balıkesir, Bursa sanayisine yönelik olarak metal, kimyasal hammaddeler, gıda işleme ürünleri ve enerji desteği sağlayabilecek konumdadır. Ayrıca Bursa'nın artan yeşil dönüşüm ihtiyacı doğrultusunda, Balıkesir ve Çanakkale'nin yeşil hidrojen üretim potansiyeli, Bursa sanayisinin karbonsuzlaşmasında stratejik bir tamamlayıcı potansiyele sahiptir. Karayolu bağlantılarının gelişmişliği, bu üç şehir arasında düşük karbonlu lojistik ağlarının kurulmasına da olanak tanımaktadır. Dolayısıyla Güney Marmara bölgesi, yalnızca kendi içinde değil, Marmara'nın iç kesimlerine uzanan sanayi alanı ile birlikte yeşil sanayi dönüşümünün bölgesel merkezi olma potansiyeline sahiptir.

Enerji altyapısı açısından, Balıkesir ve Çanakkale yüksek rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Özellikle Balıkesir, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi gücünde yüksek kapasiteye sahip olan illerindedir. Her iki ilde de faaliyet gösteren organize sanayi bölgeleri (OSB), kimya, gıda, metal işleme ve seramik sektörlerinde güçlüdür. Bandırma OSB,

Balıkesir'in en önemli sanayi merkezlerinden biri olup liman bağlantısı sayesinde dış ticaret potansiyeline sahiptir.

Bölgede önemli enerji iletim hatları ve doğalgaz boru hatları bulunmaktadır. Örneğin, BOTAŞ'ın doğalgaz iletim hatları Balıkesir ve Çanakkale üzerinden geçerek Marmara Bölgesi'nin diğer kısımlarına ulaşmaktadır. Bölgenin ulaşım, enerji ve liman altyapısı, Balıkesir ve Çanakkale'yi yeşil hidrojen üretimi, dağıtımı ve tüketimi için son derece uygun hale getirmektedir. Özellikle Bandırma Limanı ve Çanakkale Boğazı, hidrojenin iç ve dış pazarlara taşınmasında büyük lojistik avantajlar sunmaktadır.

4.3.2. Üretim

Balıkesir'in batısı ve Bandırma hattı; rüzgâr enerjisi üretiminde yüksek potansiyele sahiptir. Bu bölgede açık denizlerde 8-9 m/s, tepe ve bayırlarda ise 10-11,5 m/s rüzgâr hızı vardır [95]. Bu nedenle, bu bölgede su elektrolizine dayalı yeşil hidrojen üretim tesislerinin kurulması mümkündür. Ayrıca henüz düşük teknolojik hazırlık seviyesine sahip olan deniz suyundan elektroliz ile hidrojen elde edilmesi ilerleyen süreçte araştırılması gereken konulardan biridir. Çanakkale'nin güney kıyıları ve Ezine çevresi, güneşlenme süresi ve tarımsal biyokütle kaynakları açısından elverişlidir. Güneş enerjisine dayalı sistemlerle desteklenen elektrolizörlerin bu bölgelerde konumlandırılması, özellikle tarımsal atıkların entegre edildiği hibrit sistemlerle üretim kapasitesini artırabilir.

4.3.3. Dağıtım

Yeşil hidrojenin dağıtımı, hem sanayi bölgelerine hem de ulaşım sektörüne yönelik olarak planlanmalıdır. Balıkesir OSB, Gönen, Bandırma ve Edremit gibi merkezler, hidrojenin taşınması için lojistik olarak avantajlıdır. Boru hattı altyapısının henüz yetersiz olduğu dikkate alındığında, başlangıçta hidrojenin sıkıştırılmış formda (CGH₂) tankerlerle taşınması önerilmektedir.

Lojistik merkezi olarak Bandırma Limanı; deniz yolu üzerinden hidrojen ihracatı için uygun bir altyapı sağlar. Çanakkale Boğazı'nın stratejik konumu sayesinde dış pazarlara erişim açısından avantajlıdır [96-99].

4.3.4. Depolama

Hidrojenin kısa ve orta vadeli depolaması için sıkıştırılmış gaz siloları ve metal hidrür teknolojileri düşünülebilir. Balıkesir'de yer altı doğal gaz depolama alanlarının hidrojen için uyarlanabilirliği araştırılmalı; ayrıca Manyas ve Gönen civarındaki jeolojik yapılar depolama için değerlendirilebilir.

Çanakkale'de ise küçük ölçekli modüler depolama çözümleri, sanayi bölgelerine yakın şekilde kurgulanmalıdır. Bu, mikro şebekelere (microgrid) entegre sistemlerin kurulmasını kolaylaştırır.

4.3.5. Tüketim

Yeşil hidrojenin tüketimi dört ana alanda planlanabilir:

Sanayi Sektörü: Çanakkale OSB, Balıkesir OSB ve Bandırma'da faaliyet gösteren kimya, seramik ve metal işleme tesislerinde hidrojenin doğrudan yakıt veya proses gazı olarak kullanılması hedeflenebilir.

Çimento sektörü, proses kaynaklı yüksek CO₂ emisyonları nedeniyle net sıfır hedeflerinde özel müdahale gerektiren bir alandır. Güney Marmara'da Balıkesir (özellikle Bandırma ve Merkez) ile Çanakkale'de çimento üretim tesisleri faaliyet göstermektedir. Bu tesislerde fırınlarda fosil yakıt yerine yeşil hidrojenin kullanılması, doğrudan emisyon azaltımı sağlar. Bu nedenle pilot yakma testleri, dönüşüm fizibilite analizleri ve AB Sınırdaki Karbon uygulaması kapsamında karbon maliyetlerini içeren ekonomik modellemelerle bölgeye özel bir yol haritası hazırlanması gerekmektedir.

Cam endüstrisi ise yüksek sıcaklıklı eritme fırınları nedeniyle ciddi miktarda doğal gaz tüketmektedir. Bölgede faaliyet gösteren cam üretim tesislerinde hidrojenin doğal gazla birlikte kullanımı mümkündür. Bu hem karbonsuzlaştırma sürecine katkı sağlayabilir hem de hidrojenin yüksek alev sıcaklığı sayesinde ürün kalitesinde iyileşmeler getirebilir. Bu kapsamda fırın modifikasyonlarının teknik fizibilitesi ve kalite kontrol süreçleriyle birlikte pilot denemelerin başlatılması gerekmektedir.

Demir-çelik sektörü, bölgenin Biga, Bandırma ve Gönen gibi merkezlerinde faaliyet gösteren fabrikalar ve bazı entegre tesislerle temsil edilmektedir. Bu sektörde yeşil hidrojen, doğrudan indirgeme süreçlerinde doğal gazın yerine kullanılabilir. Bu, sektörün derin dekarbonizasyonu açısından stratejik bir seçenektir. Elektrik ark fırını dönüşümleri veya yeni tesis kurulumları için yatırım rehberlerinin oluşturulması ve Avrupa'daki hidrojen bazlı çelik üreticileriyle işbirliği potansiyelinin değerlendirilmesi önerilmektedir.

Seramik ve refrakter sanayi Çanakkale Çan ilçesinde öne çıkmaktadır. Seramik üretiminde kurutma ve pişirme fırınlarında hidrojen destekli ısıtma çözümleri uygulanabilir. Bu noktada fırın verimliliği, NOx emisyonları ve ürün kalitesi üzerine etkilerin laboratuvar ve pilot ölçekli çalışmalarda detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Gıda sanayisi, özellikle enerji yoğun ısıtma işlemleri, soğutma zinciri kullanımı ve kimyasal modifikasyon süreçleri nedeniyle doğrudan ve dolaylı karbon emisyonlarına sahip bir sektördür. Güney Marmara'da Çanakkale ve Balıkesir illeri, zeytin ve zeytinyağı, süt ve süt ürünleri, balık işleme, et ürünleri ve unlu mamuller gibi alt sektörlerde güçlü bir üretim altyapısına sahiptir. Bu tesislerde proses ısısı için kullanılan fosil kaynakların yeşil hidrojen ile ikame edilmesi, üretimin hem çevresel ayak izini azaltacak hem de sürdürülebilir ihracat zincirlerinde rekabet gücünü artıracaktır. Ayrıca, bitkisel yağların doymuş hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılan hidrojenasyon süreçlerinde fosil bazlı hidrojen yerine yeşil hidrojenin kullanılması, ürünün karbon ayak izini düşürerek çevresel sertifikasyon süreçlerinde avantaj sağlayacaktır. Bu kapsamda, gıda sanayine özel hidrojen entegrasyon fizibiliteleri, düşük sıcaklıklı yakma sistemlerinin dönüşümü, hidrojenasyon proseslerinde yeşil hidrojenin kullanımı ve temiz enerji sertifikasyonlarının değerlendirilmesiyle bölgesel bir dönüşüm planı hazırlanması önem arz etmektedir.

Ulaşım ve Taşımacılık Sektörü: Fosil yakıt tüketiminin azaltılması ve hava kalitesinin iyileştirilmesi hedefiyle hidrojen temelli çözümler ulaşım sektöründe stratejik bir rol oynayabilir. Güney Marmara'da bu dönüşüm için öne çıkan uygulama alanları şunlardır:

Toplu Taşıma Araçları (Otobüsler)

- Şehir içi dizel otobüslerin yakıt hücreli hidrojen otobüsleriyle kademeli olarak değiştirilmesi

Kırsal ve Ada Ulaşımı için Hafif Taşımacılık Çözümleri

- Gökçeada, Bozcaada ve Marmara gibi adalarda hidrojenli hafif ticari araçlar, servis minibüsleri ve küçük ölçekli deniz araçları

Deniz Yolu Ulaşımı

- Çanakkale Boğazı geçişleri ve adalara (Gökçeada, Bozcaada, Marmara) yapılan düzenli feribot seferlerinde hidrojenli deniz araçlarının pilot uygulamaları

Ağır Taşımacılık ve Lojistik Filoları

- Bandırma, Biga, Ayvacık ve Ezine gibi liman ve sanayi yoğun bölgelerde faaliyet gösteren TIR ve kamyonlar için hidrojenli ağır vasıta projeleri
- Lojistik merkezlerine yakın hidrojen ikmal istasyonları kurulması
- Yeşil lojistik uygulamalarına geçiş ve sınırda karbon düzenlemelerine hazırlık

Sanayi Tesislerinde Kullanılan İş Makineleri ve İç Lojistik Araçları

- Fabrika içi forkliftler, transpaletler, yükleyiciler gibi araçların elektrikli yerine yakıt hücreli modellerle değiştirilmesi

Limn ve Raylı Sistem Araçları

- Çanakkale Kepez Limanı ve Bandırma Limanı'nda hidrojenle çalışan liman içi çekici araçlar ve yük platformları
- Bölgesel demiryolu yük taşımacılığında hidrojenli lokomotiflerin test edilmesi
- Özellikle elektrik hattı olmayan hatlarda dizel yerine hidrojenle çalışan hibrit çözümler

Tarım: Çanakkale ve Balıkesir tarımcılığın yoğun yapıldığı şehirlerdir. Tarım faaliyetlerinde kullanılan traktör, jeneratör, sulama sistemleri ve diğer mekanik ekipmanlar genellikle dizel yakıtla çalışmaktadır. Bu nedenle, tarım makinelerinin hidrojen yakıt hücreli versiyonlara dönüştürülmesi veya yenilerinin bu teknolojilere göre tasarlanması, hem karbon salımını azaltmak hem de enerji maliyetlerini sürdürülebilir kaynaklara dayandırmak açısından önemlidir.

Ayrıca, yeşil hidrojen kullanılarak elde edilen amonyak, tarım sektöründe gübre olarak kullanılabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan azotlu gübrelerin üretiminde doğal gaz kaynaklı (gri) hidrojen kullanılmakta ve bu durum önemli miktarda emisyonla yol açmaktadır. Bölge içinde üretilen yeşil amonyak, yerli ve çevreci bir gübre kaynağı sağlayarak tarımın karbon ayak izini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda çiftçilerin sürdürülebilir ürün belgelerine erişimini de kolaylaştırır. Özellikle ihracata dönük tarımsal ürünler için yeşil gübre kullanımı, dış pazarda çevre etiketleri ve sürdürülebilirlik kriterleri açısından rekabet avantajı yaratacaktır.

Konut ve Ticari Alanlar: Özellikle yeni yerleşim alanlarında yakıt hücreli ısıtma sistemleri ile mikro ölçekli hidrojen uygulamaları geliştirilebilir.

4.3.6. Mekânsal Gelişim Aşamaları

Mekânsal gelişim stratejileri kısa, orta ve uzun vadeli olmak üzere üç ana fazda planlanmıştır.

Kısa Vadeli Dönem (2025–2030)

Kısa vadeli mekânsal gelişim haritası Şekil 36'da sunulmuştur. Kısa vadeli mekânsal gelişim stratejisi kapsamında, Bandırma merkezli bir pilot yeşil hidrojen üretim tesisi kurulması öngörülmektedir. Bandırma, rüzgar enerjisi potansiyeli, mevcut sanayi altyapısı ve Bandırma Limanı'na yakınlığı ile bölgenin en uygun yeşil hidrojen üretim noktalarından biridir. Bu tesis, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak elektroliz ile yeşil hidrojen üretecek şekilde yapılandırılacaktır. Üretim kapasitesi başlangıçta sanayi ölçekli pilot uygulamaları destekleyecek seviyede olacaktır. Ayrıca bu sistemler ilerleyen aşamalarda modüler sistemlerle büyütülebilecek potansiyele sahiptir.

Üretilen hidrojenin kısa vadede kara yolu tanker taşımacılığı ile bölgedeki sanayi kullanıcılarına ulaştırılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda üç ana tüketici belirlenmiştir:

- Çan ilçesinde faaliyet gösteren Kale Seramik fabrikası, hidrojenin yüksek sıcaklık gerektiren proseslerde fosil yakıt yerine kullanılmasıyla karbon emisyonunu azaltmak üzere pilot uygulama sahası olacaktır.
- Bandırma'da yer alan Eti Maden tesisleri, özellikle çeşitli kimyasalların üretimi süreçlerinde enerji kaynağı ya da hammadde olarak hidrojenin kullanılabilirliğini değerlendirmek üzere bu pilot projeye entegre edilecektir.
- Yine Bandırma'da faaliyet gösteren Hidrojen Peroksit A.Ş., doğrudan hidrojen girdisi kullanan bir üretim yapısına sahip olduğundan, yeşil hidrojenin endüstriyel kimyasal üretiminde doğrudan kullanımı açısından önemli bir uygulama noktası olacaktır.

Bu taşıma ve tüketim zinciri, hidrojenin sanayideki ilk uygulama örneklerinin oluşturulması, lojistik modellemenin test edilmesi ve üretim-tüketim geri bildirim döngüsünün oluşturulması açısından kritik öneme sahiptir. Aynı zamanda bölgesel hidrojen ekonomisinin temelini atacak olan bu girişim, uzun vadede boru hattı altyapısı ve geniş ölçekli üretim planlamalarına da yön verecektir. Bu faaliyetlere ek olarak belediye düzeyinde hidrojen destekli ulaşım projelerinin başlatılması, sanayiye hidrojen tedariki için ön fizibilite çalışmaları ve hibrit üretim

senaryolarının oluşturulması ve Güney Marmara Kalkınma Ajansı ve diğer devlet kurumları tarafından teknik destek programlarının sağlanması büyük bir önem taşımaktadır. Bununla birlikte merkezi ve dağıtılmış hidrojen taşıma ve depolama sistemlerinin fizibilite çalışmaları yapılmalı ve seviyelendirilmiş hidrojen maliyetinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Orta Vadeli Dönem (2030–2035)

Haritası Şekil 37’de sunulan orta vadeli dönemde, hidrojen altyapısının yaygınlaştırılması ve yeşil hidrojenin sanayi dışında da kullanım alanlarının genişletilmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, Bandırma merkezli mevcut pilot üretim ve dağıtım sistemi, Bandırma Organize Sanayi Bölgesi (OSB), Balıkesir OSB, Gönen OSB ile Çanakkale OSB’lerini kapsayacak şekilde genişletilecektir. Bu sanayi bölgeleri, enerji yoğun sektörlerin (gıda işleme, makine imalatı, kimya, seramik vb.) yoğunlaştığı merkezler olup, hidrojenin proses enerjisi veya yakıt olarak entegrasyonu ile karbon ayak izlerinin düşürülmesi sağlanacaktır.

Artan hidrojen talebine karşılık taşıma maliyetlerinin sürdürülebilirliği için, bu dönemde hidrojen boru hatları için fizibilite çalışmaları başlatılacaktır. Planlamaya esas olmak üzere jeolojik altyapı, güvenlik, maliyet, teknik fizibilite ve yatırım geri dönüş süresi gibi kriterlerin detaylı analizleri yapılacaktır. Balıkesir OSB-Bandırma, Çanakkale OSB-Biga hattı ve Bandırma-Çan hattı gibi öncelikli güzergâhlar ön incelemeye tabi tutulmalıdır.

Bununla birlikte, hidrojenin sadece sanayi değil, ulaşım sektörü için de bir çözüm sunması hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, Balıkesir ve Çanakkale şehir merkezlerinde hidrojenli araç uygulamaları başlatılmalıdır. İlk aşamada belediyelerle iş birliği yapılarak hidrojenle çalışan toplu taşıma otobüsleri devreye alınmalı, ardından sanayi servis araçları, çöp toplama kamyonları gibi araç gruplarında da denemeler yapılmalıdır. Belirli bir başarı eşiği yakalandıktan sonra, şahsi araçlar için hidrojen dolum istasyonları kurulması gündeme alınabilir. Bu istasyonlar, öncelikle sanayi bölgeleri çevresinde ve ana ulaşım koridorlarında planlanmalıdır.

Toplamda bu strateji, hidrojenin bölgesel bir enerji taşıyıcısı haline gelmesini, sanayi ve ulaşımın dönüşümünde eş zamanlı rol oynamasını ve bölgenin Türkiye genelinde örnek bir hidrojen ekosistemine evrilmesini hedeflemektedir. Orta vadede kurulacak bu altyapı, uzun vadede hidrojen ihracatı ve ulusal entegrasyon açısından kritik bir zemin oluşturacaktır.

Uzun Vadeli Dönem (2035–2053)

Uzun vadeli dönem için muhtemel boru hattı Şekil 38’de sunulmuştur. Uzun vadede Güney Marmara Bölgesi’nin yeşil hidrojen stratejisi, pilot uygulamalardan olgun bir hidrojen ekonomisine geçişi hedeflemektedir. Bu dönemde bölge, yalnızca yerelde değil, aynı zamanda ihracat yapabilen ve sanayisinde fosil yakıt kullanımını büyük ölçüde azaltmış bir hidrojen vadisi haline gelmeyi amaçlamaktadır.

Bu kapsamda, ilk aşamalarda karayolu ile taşınan hidrojenin yerine, hidrojen boru hatlarının fiziki olarak kurulması ve devreye alınması planlanmalıdır. Bandırma-Balıkesir OSB hattı ve Balıkesir-Biga-Çan-Çanakkale OSB hattı bölgesel dağıtım omurgasını oluşturacaktır. Bu ağ, ilerleyen yıllarda ulusal hidrojen şebekesine bağlanarak hidrojenin iç piyasada serbestçe dolaşımına ve ihtiyaç noktalarına düşük maliyetle ulaşmasına olanak tanıyacak potansiyele sahiptir.

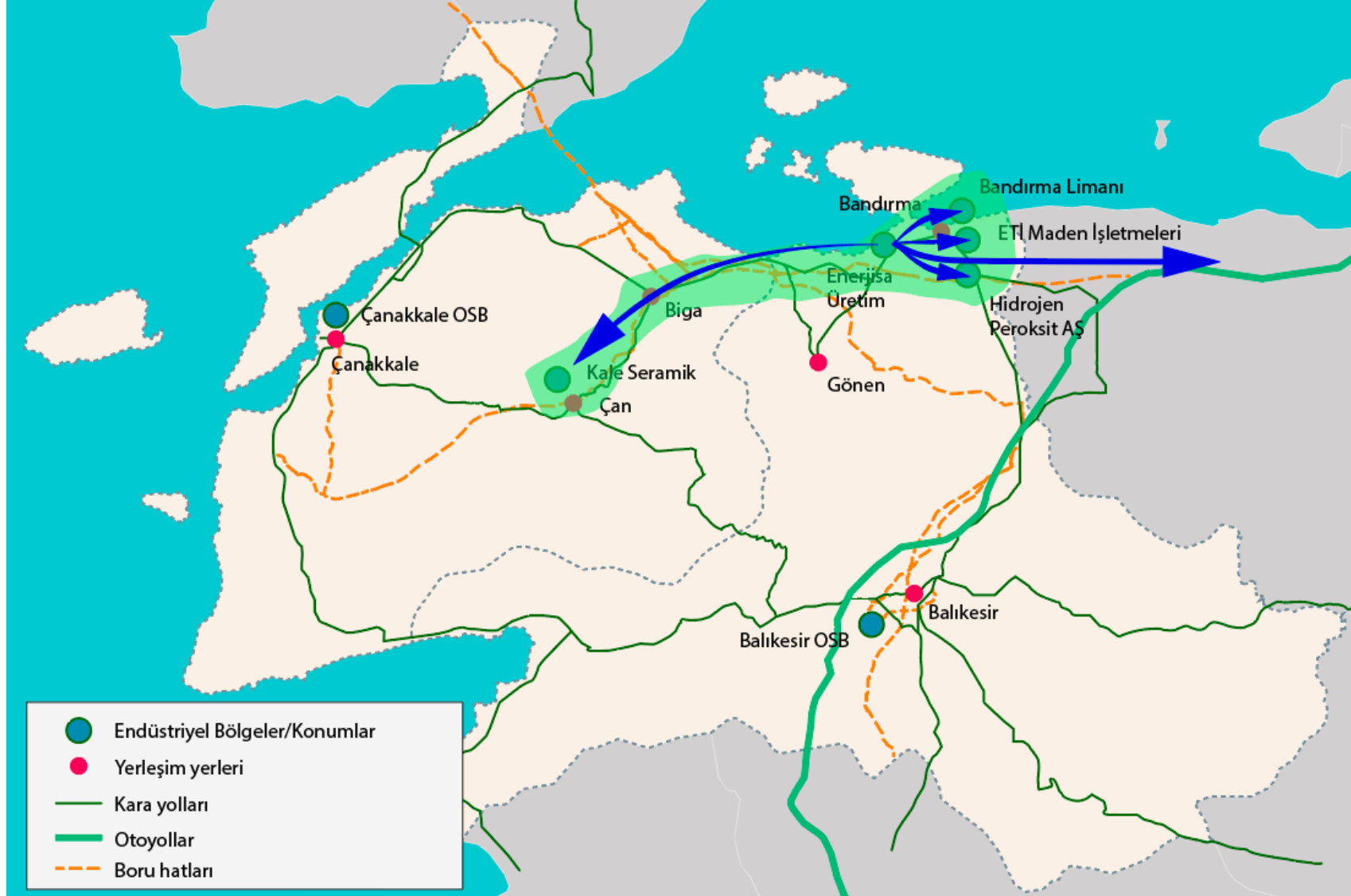
Sanayi kullanımında ise, yeşil hidrojenin yüksek sıcaklık proseslerinde, metanol ve amonyak üretiminde, demir-çelik ve çimento sektörlerinde fosil yakıtların yerini alması beklenmektedir. Özellikle Bandırma’daki kimya sanayi kümelenmesi ve Balıkesir’deki makine-imalat sektörü, hidrojenin verimli kullanımında öncü sanayi kolları olacaktır.

Ulaşımında ise, hidrojenli araçlar bireysel kullanımda da yaygınlaşacaktır. Bu amaçla, hidrojenli binek araçlar için şehir içi dolum istasyonları tüm büyük ilçe merkezlerinde hizmete alınacak; bu istasyonlar aynı zamanda hidrojenli lojistik araçlar için de hizmet verecektir. Ayrıca Balıkesir ve Çanakkale havalimanlarında hidrojenli yer hizmetleri ekipmanları devreye alınarak, ulaşımın her katmanında hidrojenin kullanımına geçilecektir.

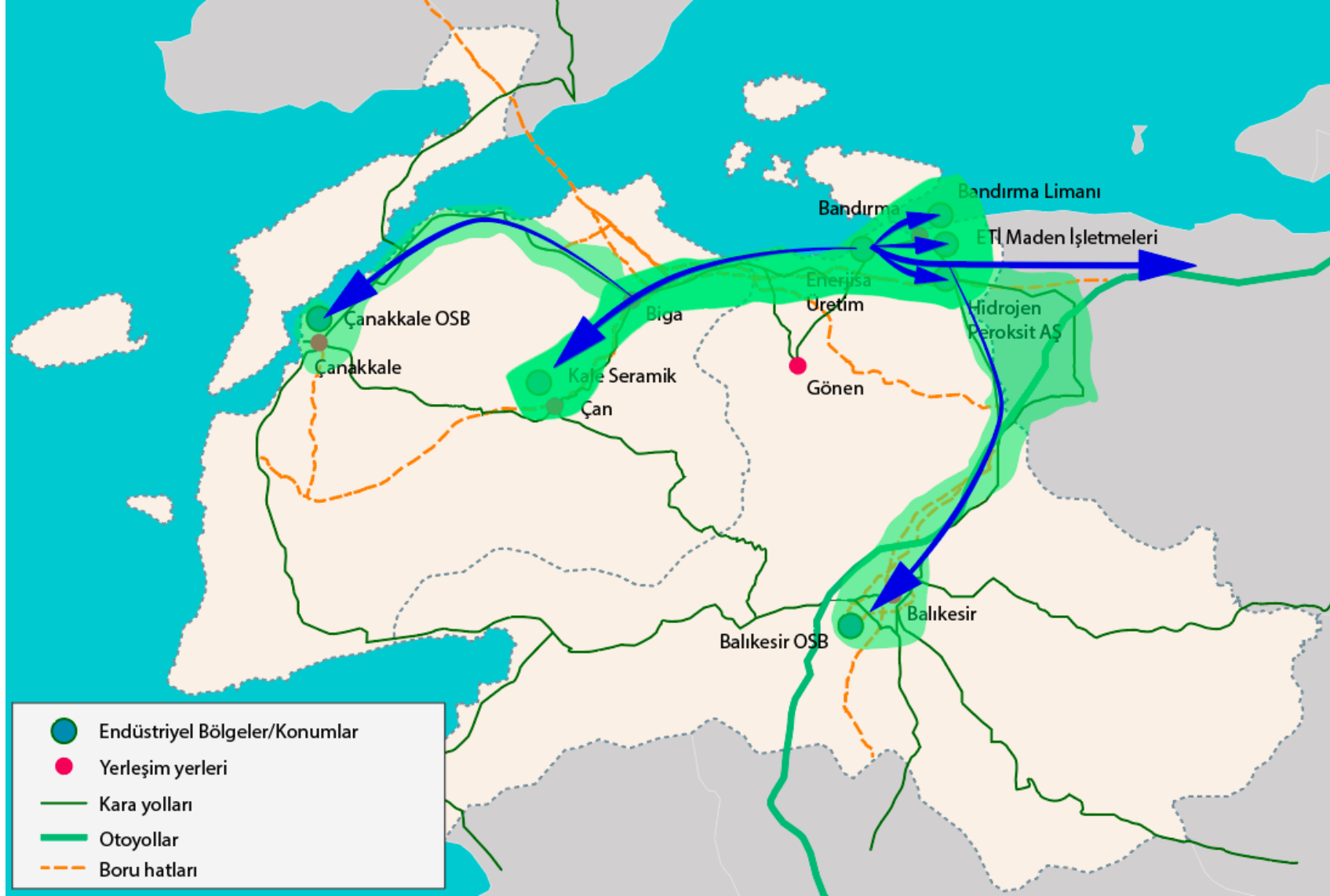
Enerji sektöründe ise yeşil hidrojenin yenilenebilir enerjiyle entegrasyonu ön planda olacaktır. Rüzgâr ve güneşten üretilen fazla elektriğin elektrolizle hidrojen üretiminde kullanılmasıyla enerji depolama sorununa çözüm getirilecektir. Bu kapsamda, Balıkesir'in Manyas ve Gönen çevresinde yer altı hidrojen depolama tesislerinin kurulması için fizibilite çalışmaları yapılmalıdır.

Son olarak, uluslararası hidrojen ihracatı stratejik bir hedef haline gelmelidir. Bandırma Limanı ve Çanakkale Boğazı, sıkıştırılmış ya da sıvı hidrojen ve amonyak bazlı türevlerinin Avrupa pazarlarına gönderimi için lojistik merkezler haline gelme potansiyeline sahiptir. Bu hedefe yönelik olarak liman altyapısında dönüşümler, özel dolum-tank sistemleri ve LNG terminal adaptasyonları yapılmalıdır.

Genel olarak, 2053 hedeflerine yönelik bu uzun vadeli yaklaşım, bölgenin yalnızca hidrojeni kullanan değil, üreten, yöneten ve ihraç eden bir bölgeye dönüştürmeyi hedeflemektedir. Bu dönüşüm, bölgenin yeşil ekonomi, sanayi rekabetçiliği, enerji güvenliği ve sürdürülebilir yaşam kalitesi açısından öncü olmasını sağlayacaktır.



Şekil 36. Kısa Vadeli Dönem İçin Mekansal Gelişim Planı



Şekil 37. Orta Vadeli Dönem İçin Mekansal Gelişim Planı



Şekil 38.Uzun Vadeli Dönem Ve Sonrası İçin Mekansal Gelişim Planı

4.3.7. Paydaş Katılımı ve Yönetim

Stratejinin hayata geçirilmesinde rol oynayacak paydaşlar aşağıdaki gibidir:

- **Kamu Kurumları:** Enerji, çevre, sanayi, ulaştırma ve tarım gibi ilgili sektörlerde yetkili bakanlıklar, kurumlar ve yerel idareler; hidrojen ekonomisine geçişi destekleyecek ulusal mevzuat düzenlemelerini, teşvik mekanizmalarını ve standartları oluşturmalıdır. Kamu kurumları ayrıca bölgesel yol haritalarının ulusal stratejilerle uyumlu hale getirilmesi, kamu yatırımlarının yönlendirilmesi ve yeşil kamu alımları yoluyla hidrojenli ürün ve hizmetlere talep oluşturulması gibi işlevler üstlenmelidir. İller düzeyinde valilikler ve kalkınma ajansları da bölgesel koordinasyonun sağlanmasında kritik rol oynamaktadır.
- **Yerel Yönetimler:** Hidrojen altyapısının mekânsal planlamaya entegre edilmesi, şehir içi ulaşım filolarının hidrojenli modellere geçişinde öncülük edilmesi ve dolum altyapısının uygun alanlarda konumlandırılması gibi görevler üstlenmelidir. Ayrıca, belediye hizmet araçlarında hidrojenli uygulamaların pilot olarak devreye alınması ve halkla ilişkili farkındalık kampanyalarının yürütülmesi de yerel yönetim sorumluluğundadır.
- **Üniversiteler ve Ar-Ge Merkezleri:** Üniversiteler yalnızca teknoloji geliştirme süreçlerinde değil, aynı zamanda hidrojen odaklı eğitim programlarının ve müfredatlarının oluşturulmasında da aktif rol almalıdır. Laboratuvar ve test altyapılarının güçlendirilmesi, prototipleme merkezlerinin kurulması ve sektörle iş birliği içinde saha doğrulama çalışmalarının yapılması stratejik öneme sahiptir. Ayrıca, insan kaynağı gelişimi için yüksek lisans, doktora ve sertifika programları gibi yapılar devreye alınmalıdır.
- **Sanayi Kuruluşları:** Hidrojenin üretim süreçlerine entegrasyonu için kullanım senaryoları geliştirilmeli, pilot tesisler kurularak dönüşüm modelleri test edilmelidir. OSB yönetimleri öncülüğünde hidrojen altyapısına uygun dönüşüm planları hazırlanmalı ve sektör bazlı talep projeksiyonları yapılmalıdır. Sanayicilerin özellikle enerji yoğun sektörlerde hidrojenin alternatif yakıt olarak kullanılmasına yönelik yatırımlara yönlendirilmesi beklenmektedir.
- **Yatırımcılar:** Hidrojen projeleri için geliştirilmiş yatırım teşviklerinden ve proje desteklerinden yararlanarak bölgeye teknoloji odaklı sermaye aktarımı yapılmalıdır. Yatırımcıların bölgesel hidrojen altyapısına katılımını teşvik edecek finansal araçların geliştirilmesi (yeşil finansman modelleri, karbon kredileri, kamu-özel ortaklıkları) stratejik öncelik olmalıdır.

4.3.8. Politika Önerileri ve Teşvik Mekanizmaları

Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen ekosistemine geçişini hızlandırmak, yatırım ortamını güçlendirmek ve stratejik projeleri hayata geçirmek için çok boyutlu politika araçlarının devreye alınması gerekmektedir. Aşağıda, bu kapsamda önerilen politika ve teşvik mekanizmaları sıralanmıştır:

- **Mevzuat ve Regülasyon Geliştirme:** Hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve kullanımına yönelik açık ve yatırımcı dostu bir mevzuat altyapısı oluşturulmalıdır. Enerji piyasası, çevre ve sanayi mevzuatıyla uyumlu özel düzenlemeler yapılmalı; ruhsatlandırma, güvenlik ve izin süreçleri sadeleştirilmelidir.
- **Hidrojen Altyapısının Geliştirilmesi:** Bölge genelinde hidrojen dolum istasyonları, boru hatları, yerinde üretim (on-site) sistemleri ve geçici/kalıcı depolama altyapıları için kamu destekli projeler başlatılmalıdır. OSB'ler içinde hidrojen altyapısına uygun alanlar belirlenmeli ve pilot uygulamalar planlanmalıdır.
- **OSB'lerde Teşvik Mekanizmaları:** Organize Sanayi Bölgelerinde hidrojen kullanımını teşvik edecek şekilde elektrik, su ve doğal gaz tarifelerine entegre hidrojen uyumlu indirimli tarifeler tanımlanmalı, gelir ve kurumlar vergisi avantajları, emlak vergisi muafiyetleri gibi bölgesel teşvikler devreye alınmalıdır.

- **Hidrojenle Çalışan Araçlar İçin Sübvansiyonlar:**
Yerel yönetimler ve kamu kurumları öncülüğünde, hidrojenli otobüs, servis aracı, iş makinesi ve hafif ticari araç alımlarına yönelik doğrudan satın alma teşvikleri ve sübvansiyon programları başlatılmalıdır. Ayrıca hidrojenli araçlara ilişkin yeşil plaka, otopark, bakım ve işletme maliyeti teşvikleri gibi destek unsurları da kurgulanmalıdır.
- **Hidrojen Alım Garantisi ve Talep Güvencesi:**
Pilot üretim tesisleri için kamu eliyle hidrojen alım garantileri sağlanmalı; bu sayede yatırım riskleri azaltılarak ilk kullanıcı pazarı oluşturulmalıdır. Uzun vadeli sabit fiyatlı alım anlaşmaları modeli bölgeye uyarlanarak devreye alınmalıdır.
- **Ulusal Strateji ile Uyumlu Bölgesel Konumlandırma:**
Güney Marmara Bölgesi için yatırım planı ve teknoloji geliştirme hedefleri tanımlanmalıdır.
- **Finansal Destek ve Yeşil Finansman Araçları:**
Hidrojen projeleri için yeşil tahvil, karbon kredisi, hibe ve teşvik programları, kredi garanti fonları gibi finansal araçlar aktif biçimde kurgulanmalı; KOSGEB, TÜBİTAK, yatırım bankası ve kalkınma ajansları bu konuda yönlendirici rol üstlenmelidir.
- **Hidrojen Güvenliği ve Standartları:**
Hidrojenin üretim ve kullanımında ulusal ve uluslararası güvenlik standartlarına uyum sağlanmalı; bölgesel bazda hidrojen güvenliği protokolleri, acil durum eylem planları ve personel eğitimi modülleri geliştirilmelidir.
- **İnsan Kaynağı ve Eğitim Altyapısının Geliştirilmesi:**
Üniversiteler, meslek liseleri ve meslek yüksekokulları ile iş birliği içinde hidrojen teknolojilerine özel nitelikli iş gücü geliştirme programları başlatılmalıdır. Bu kapsamda sertifika programları, teknik eğitimler için kurslar düzenlenmelidir.

Balıkesir ve Çanakkale illeri, mevcut yenilenebilir enerji altyapısı, güçlü sanayi yapısı, liman potansiyeli ve stratejik konumlarıyla Türkiye'nin yeşil hidrojen ekonomisine geçişinde öncü rol üstlenebilir. Bu stratejiyle üretim, dağıtım, depolama ve tüketim eksenlerinde mekânsal planlamaya dayalı, yerel aktörlerin aktif katılımıyla desteklenen bütüncül bir kalkınma modeli sunulmaktadır. GMKA'nın mevcut plan ve hedefleriyle uyumlu olan bu yaklaşım, Güney Marmara Bölgesi'ni hidrojen çağının güçlü oyuncularından biri haline getirme potansiyeline sahiptir.

4.4. Hidrojen Projeksiyonları

2030, 2035 ve 2053 Projeksiyon Dönemleri İçin Hidrojen Arz ve Talebi Açısından 3 (Üç) Ayrı Senaryo (Düşük, Orta, Yüksek)

Bu bölüm, belirlenen bölge özelinde hidrojen arz ve talep dinamiklerini analiz ederek 2030, 2035 ve 2053 yılları için düşük, orta ve yüksek senaryolara dayalı projeksiyonlar sunmayı amaçlamaktadır. Bölgenin mevcut altyapısı, potansiyel büyüme aksları ve sınırlayıcı faktörleri dikkate alınarak hazırlanan bu senaryolar hem iç talep hem de ihracat odaklı bir hidrojen ekosisteminin geliştirilmesine yönelik iş modeli kurgularına temel teşkil edecektir.

4.4.1. Giriş

Dünya nüfusu yaklaşık 8 milyarı aşmıştır [100]. Birleşmiş Milletler'in orta senaryo projeksiyonuna göre bu sayı 2030'da yaklaşık 8,54 milyara yükselirken, 2050'de yaklaşık 9,62 milyar düzeyine ulaşacaktır [101]. Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) yapmış olduğu standart durum senaryosuna göre enerji tüketimi 2050 yılında 195.000 TWh seviyesine ulaşacaktır, net sıfır senaryosunda ise bu değer 159.000 TWh seviyesindedir [102]. 2050 yılında toplam enerji ihtiyacı artarken, kişi başına düşen tüketimin %23-48 oranında düşmesi beklenmektedir. Karbon emisyonlarının düşürülebilmesi adına yenilenebilir teknolojilerin ve hammaddelerin enerji ekosistemine dahil edilmesi gerekmektedir. Hidrojen de bu ekosistemin önemli aktörlerinden biridir. 2023 yılında toplam küresel hidrojen ihtiyacı yıllık 97 Mt seviyesindedir [103].

4.4.2. Metodoloji

Gelecekteki hidrojen talebinin belirlenebilmesi için üç temel senaryo belirlenmiştir:

- Düşük Senaryo: Politikaların ve yatırımların yetersiz kaldığı durum
- Orta Senaryo: Bugünkü eğilimlerin sürdüğü durum
- Yüksek Senaryo: Hızlı teknolojik ilerleme, güçlü kamu politikaları ve dış pazarlara entegrasyonun öne çıktığı durum

Projeksiyon çalışmasında mevcut durum incelenirken Uluslararası Enerji Ajansı, Avrupa Birliği, Hidrojen Council gibi kurumların verilerinden faydalanılmıştır. Güney Marmara bölgesi özelinde mevcut doğalgaz ve elektrik tüketimleri üzerinden üretilmiş olan hidrojen kullanım senaryoları ise Tablo 8’de sunulmuştur.

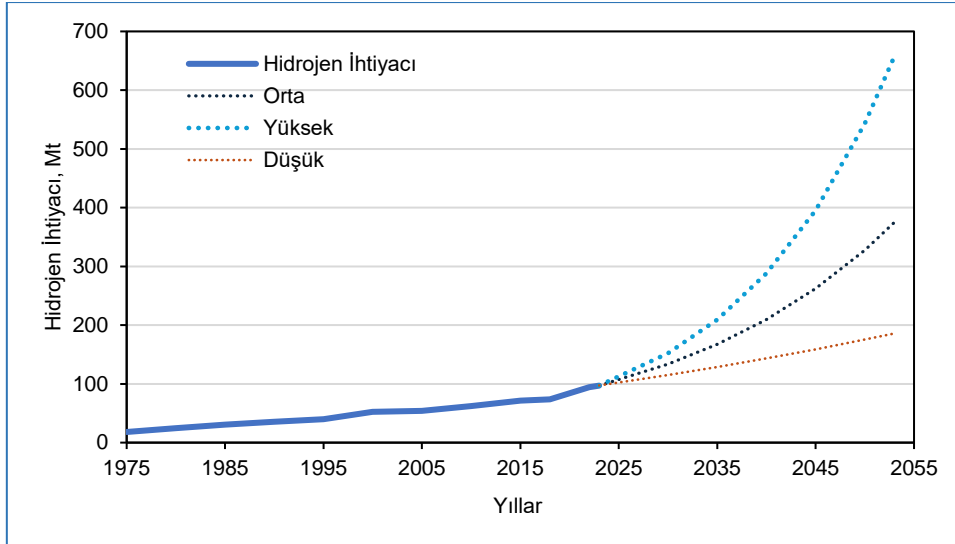
Tablo 8. Güney Marmara Bölgesi için Belirlenen Hidrojen Kullanım Senaryoları

Sektör	2030			2040			2053		
	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek	Düşük	Orta	Yüksek
Sanayi	5%	20%	40%	10%	35%	60%	20%	50%	80%
Enerji Üretimi	2%	10%	30%	5%	20%	50%	10%	40%	70%
Ulaşım	2%	15%	35%	5%	30%	60%	10%	50%	80%
Tarım	1%	5%	15%	2%	10%	25%	5%	20%	40%
Konut & Hizmet	0%	2%	5%	1%	5%	15%	2%	10%	25%

4.4.3. Projeksiyon sonuçları ve değerlendirmeler

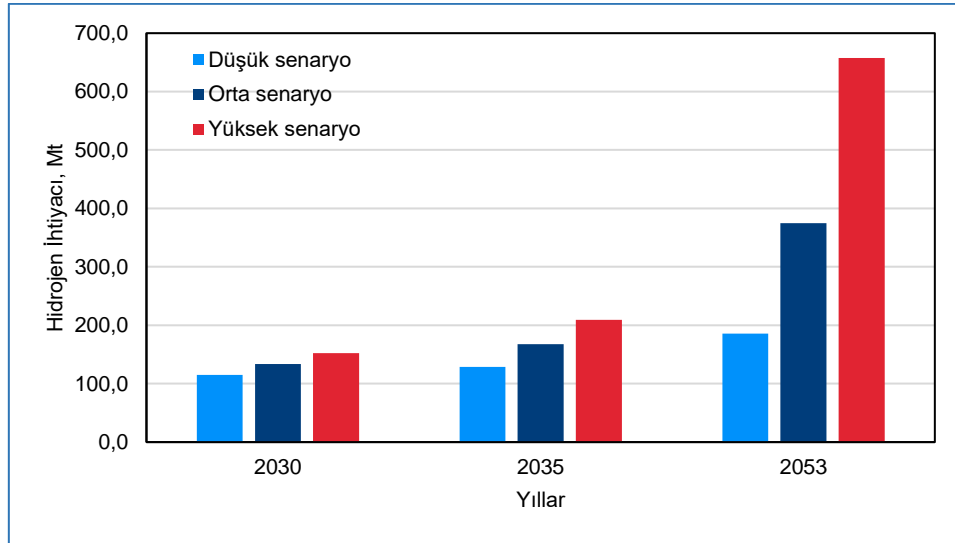
Şekil 39 hidrojen talebinin mevcut durumunu ve senaryolara göre oluşabilecek hidrojen ihtiyacını göstermektedir. Mevcut duruma bakıldığında hidrojen kullanımı, üç ana sektörde (rafineriler, amonyak üretimi ve diğer kullanım alanları) sürekli artış göstermiştir. Zamanla tüm sektörlerde hidrojen talebinde artış yaşanmış, ancak özellikle rafineri sektöründe bu artış çok daha hızlı olmuştur [104]. Amonyak üretiminde kullanılan hidrojen miktarı ise istikrarlı bir şekilde artmıştır. 1975’te 10,9 milyon ton olan hidrojen tüketimi, 2000 yılına gelindiğinde 28,6 milyon tona çıkmıştır. Sonrasında bazı yıllarda dalgalansa da 2018 yılında 31,5 milyon ton olmuştur. Bu artış, özellikle gübre sektöründeki büyüme ve tarımsal üretimdeki artışla ilişkilidir. Diğer kullanım alanlarında ise hidrojen tüketimi görece düşük seviyelerde kalmakla birlikte zaman içinde artış göstermiştir. 1975’te 1,1 milyon ton olan bu tüketim, 2018’de 4,2 milyon tona ulaşmıştır. Bu artış, hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak yeni alanlarda kullanım potansiyelini göstermektedir. Özellikle metanol üretimi, metal işleme ve enerji sektörü gibi alanlarda hidrojen kullanımı artış eğilimindedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 1975 yılında toplam 18,2 milyon ton olan hidrojen kullanımı, 2018 yılında 73,9 milyon tona ulaşmıştır. Amonyak üretimi, hidrojenin başlıca kullanım alanı olmaya devam ederken, rafineri sektöründeki hızlı artış dikkat çekicidir. Öte yandan, diğer kullanım alanlarındaki büyüme ise hidrojenin gelecekte çok daha çeşitli sektörlerde önemli roller üstlenebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 39. Yıllara Göre Küresel Hidrojen Talebi Ve Düşük, Orta, Yüksek Duruma Göre Hidrojen Talep Projeksiyonları, Veri Kaynağı: [103]-[105]

Çalışmada ele alınan projeksiyonlar, “düşük”, “orta” ve “yüksek” olmak üzere üç senaryo üzerinden değerlendirilmiştir. Her bir senaryo, teknolojik gelişmelerin seyri, politika teşvik düzeyi, endüstriyel dönüşüm hızı ve küresel sürdürülebilirlik politikalarının kapsamı gibi parametrelerin farklı bileşimlerine dayanmaktadır. Her bir senaryonun 2030, 2035 ve 2053 yıllarındaki hidrojen talep sonuçları Şekil 40’ta sunulmuştur.



Şekil 40. Düşük, Orta Ve Yüksek Senaryolarda Oluşabilecek Yıllık Global Hidrojen İhtiyacı

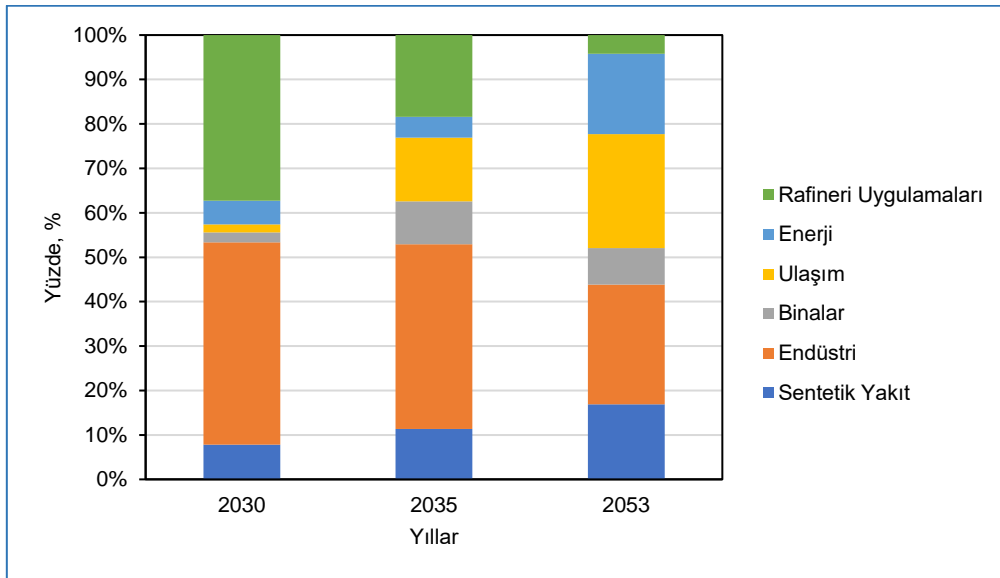
Düşük talep senaryosu, hidrojenin yaygınlaşmasında sınırlı bir ivmelenmenin öngörüldüğü, mevcut ihtiyaçların büyük ölçüde devam ettiği bir referans çerçevesi sunmaktadır. Bu senaryoya göre talep, 2030 yılında 114,9 milyon ton, 2035 yılında 128,6 milyon ton ve 2053 yılında 185,8 milyon ton düzeyine ulaşmaktadır. Bu artış, esas olarak amonyak ve rafineri sektörü gibi geleneksel uygulamalarda süregelen kullanıma ve yeni kullanım alanlarının düşük entegrasyonuna dayanmaktadır.

Orta talep senaryosu, daha etkin politika müdahaleleri, teknolojik yetkinliğin ve özel sektör yatırımlarının artması ile oluşmaktadır. Bu bağlamda hidrojen talebi 2030 yılında 133,9 milyon ton, 2035 yılında 167,5 milyon ton ve 2053 yılında 374,9 milyon ton seviyelerine ulaşmaktadır. Bu eğilim, özellikle demir-çelik üretimi, yüksek sıcaklık prosesleri ve ağır taşımacılık sektörlerinde hidrojenin alternatif yakıt olarak daha yaygın kullanımını değerlendirmektedir.

Yüksek talep senaryosu ise hidrojenin enerji sistemlerinde sistematik ve bütünleşik bir rol üstlendiği, ileri düzey teknolojik yaygınlaşma ile birlikte politika ve piyasa teşviklerinin maksimum seviyede uygulandığı durumu modellemektedir. Bu senaryoya göre 2030 yılında talep 152,4 milyon ton, 2035 yılında 209,7 milyon ton ve 2053 yılında 657,3 milyon ton gibi oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu senaryo, hidrojenin yeşil çelik üretimi, sentetik yakıtlar, enerji depolama ve enerji sistemlerinde büyük oranda kullanıldığı kapsamlı bir dönüşüm perspektifini temsil etmektedir.

Tüm senaryolar birlikte değerlendirildiğinde, 2053 yılına gelindiğinde hidrojen talebinde düşük senaryoda %91'lik, orta senaryoda %287'lik ve yüksek senaryoda ise %577'lik bir artış öngörülmektedir. Bu talep artışı, büyük ölçüde politika yapımcıların yönlendirmeleri, Ar-Ge yatırımları ve sektörel adaptasyon kabiliyetine bağlı olarak şekillenecektir. Özellikle hidrojen altyapısının geliştirilmesi, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve uluslararası standartların oluşturulması, yüksek talep senaryosuna geçişin ön koşulları arasında yer almaktadır.

2030, 2035 ve 2053 yıllarında oluşacak hidrojen talebinin potansiyel sektörlere göre dağılımı Şekil 41'de sunulmuştur. 2030, 2035 ve 2053 yıllarına ilişkin sektörel kullanım oranları değerlendirildiğinde, hidrojen uygulamalardan karbonsuzlaştırma odaklı alanlara doğru yönleneceği düşünülmektedir.



Şekil 41. Hidrojen Kullanım Alanlarının Yıllara Göre Dağılımındaki Değişim, Veri Kaynağı: [103] Ve [105]

2030 yılında hidrojenin %46'sı özellikle demir-çelik, kimya ve yüksek sıcaklık gerektiren proseslerde fosil yakıtların yerini alma potansiyeline sahiptir. Ancak 2053'e gelindiğinde bu oranın %27'ye düşmesi, hidrojenin diğer sektörlerde de yaygınlaşacağına ve endüstrideki talebin göreceli olarak azalacağına işaret etmektedir. Bu, endüstride hidrojen kullanımının doygunluğa ulaşabileceği ve diğer sektörlerin hızla büyüyerek toplamdan daha büyük paylar alabileceği olasılığını göstermektedir.

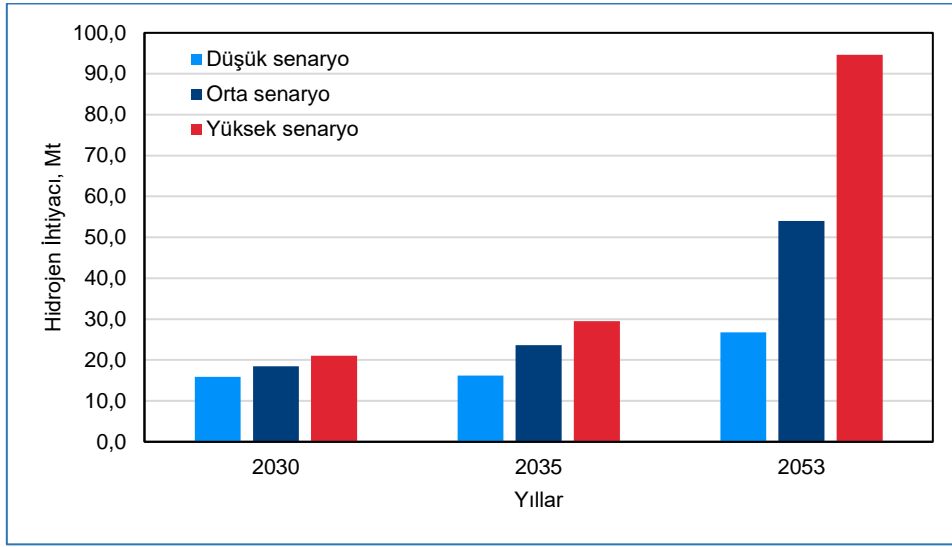
2030'da %2 olan hidrojenin ulaşım sektöründeki payı, 2053 yılında %26'ya yükselme potansiyeli göstermektedir. Bu, özellikle ağır taşıtlar, demiryolları, denizcilik ve uzun menzilli hava taşımacılığı gibi elektrikli araçların teknik olarak yetersiz kaldığı alanlarda hidrojenin bir çözüm adayı olduğunu göstermektedir. Söz konusu atılımın gerçekleşmesi, yakıt hücreli araç teknolojisinin ticarileşmesi, hidrojen dolun altyapısının yaygınlaşması ve taşıma maliyetlerinin düşmesi gibi faktörlere bağlıdır.

Sentetik yakıt üretiminde hidrojenin payının 2030'da %8 iken 2053'te %17'ye çıkabileceği öngörülmektedir. Bu durum, e-yakıtlar aracılığıyla karbonsuzlaştırılması zor sektörlerin (havacılık, denizcilik vs.) dönüşümünde hidrojenin dolaylı bir rol oynayabileceğini ortaya koymaktadır. Bu potansiyelin gerçekleşme olasılığı, CO₂ yakalama teknolojilerinin maliyetleri,

karbon fiyatlaması sistemlerinin kapsamı ve sentetik yakıtların uluslararası regülasyonlarda tanınmasına bağlı olarak artabilir.

Enerji sektöründe hidrojenin 2030'daki %5'lik payının 2053'te %18'e ulaşması, özellikle enerji depolama, şebeke esnekliği ve yenilenebilir enerji entegrasyonunda hidrojenin potansiyelini göstermektedir. Hidrojenin elektrik üretiminde yedek güç olarak kullanılması ya da amonyak üzerinden ithalat yoluyla enerji güvenliğini sağlaması, bu olasılığı desteklemektedir.

Avrupa özelinde hidrojen ihtiyacı Şekil 42'de sunulmuştur. Avrupa'nın enerji dönüşüm sürecinde hidrojen, giderek daha stratejik bir konuma yükselmektedir. 2030, 2035 ve 2053 yılları için öngörülen senaryolara göre hidrojen talebinde üç farklı gelişim yolu ortaya çıkmaktadır. Düşük senaryoya göre Avrupa'da hidrojen talebi 2030 yılında yaklaşık 15,85 milyon ton düzeyinde kalacaktır. Bu miktar 2035'te 16,2 milyon tona çıkarken, 2053 yılına gelindiğinde 26,75 milyon ton seviyesine ulaşacaktır. Bu senaryo, mevcut eğilimlerin büyük ölçüde devam edeceği ve hidrojen teknolojilerinin yaygınlaşmasında sınırlı bir ivme alacağı bir durumu temsil etmektedir.



Şekil 42. Düşük, Orta Ve Yüksek Senaryolarda Oluşabilecek Yıllık Avrupa Bazında Hidrojen İhtiyacı

Orta senaryo ise hidrojenin enerji sistemlerine entegrasyonu daha kapsamlı ve kararlı bir biçimde gerçekleştiği durumu değerlendirmektedir. 2030'da 18,46 milyon ton olan hidrojen talebinin, 2035'te 23,6 milyon tona ve 2053'te 53,97 milyon tona ulaşması öngörülmektedir. Bu büyüme, Avrupa Birliği'nin yeşil mutabakat çerçevesinde uygulamaya koyduğu politikalar, altyapı yatırımları ve sanayi dönüşüm programları ile desteklenmektedir.

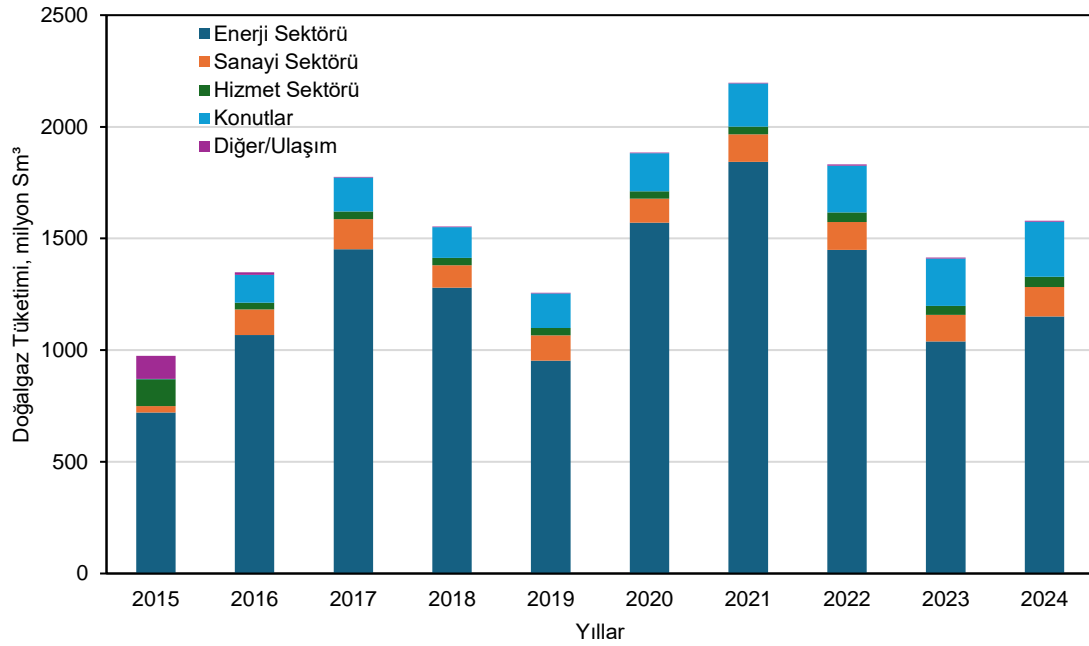
Yüksek senaryo ise Avrupa'nın hidrojen kullanımında sistemik bir dönüşüm yaşadığı ve hidrojenin enerji, ulaşım ve sanayi sektörlerinde merkezi bir rol üstlendiği bir gelecek öngörmektedir. Bu senaryoya göre talep 2030 yılında 21,01 milyon tona, 2035'te 29,5 milyon tona ve 2053 yılında 94,61 milyon tona kadar çıkabilir.

Bu senaryolar, sadece teknolojik gelişmelere ve iklim hedeflerine değil, aynı zamanda jeopolitik gelişmelere de doğrudan bağlıdır. Özellikle 2022 yılında şiddetlenen Rusya-Ukrayna Savaşı, Avrupa'nın enerji güvenliği açısından bir dönüm noktası olmuştur. Doğal gaz arzının büyük oranda Rusya'ya bağımlı olması, savaşla birlikte Avrupa'nın enerji sistemini tehlikeye atmıştır. Bu durum, hidrojenin bir enerji güvenliği aracı olarak önemini artırmıştır. Bu nedenle Avrupa Komisyonu'nun REPowerEU planı çerçevesinde hidrojen stratejileri revize edilmiştir. Avrupa Birliği, 2030 yılına kadar 10 milyon ton yerli ve 10 milyon ton ithal hidrojen hedefi belirleyerek bu alandaki kararlılığını ortaya koymuştur [106]. Aynı zamanda hidrojen, enerji depolama, mevsimsel esneklik ve yenilenebilir üretimin dengelemesi gibi işlevlerle enerji sisteminin dayanıklılığını artırabilecek çok yönlü bir çözüm aracı olarak görülmektedir.

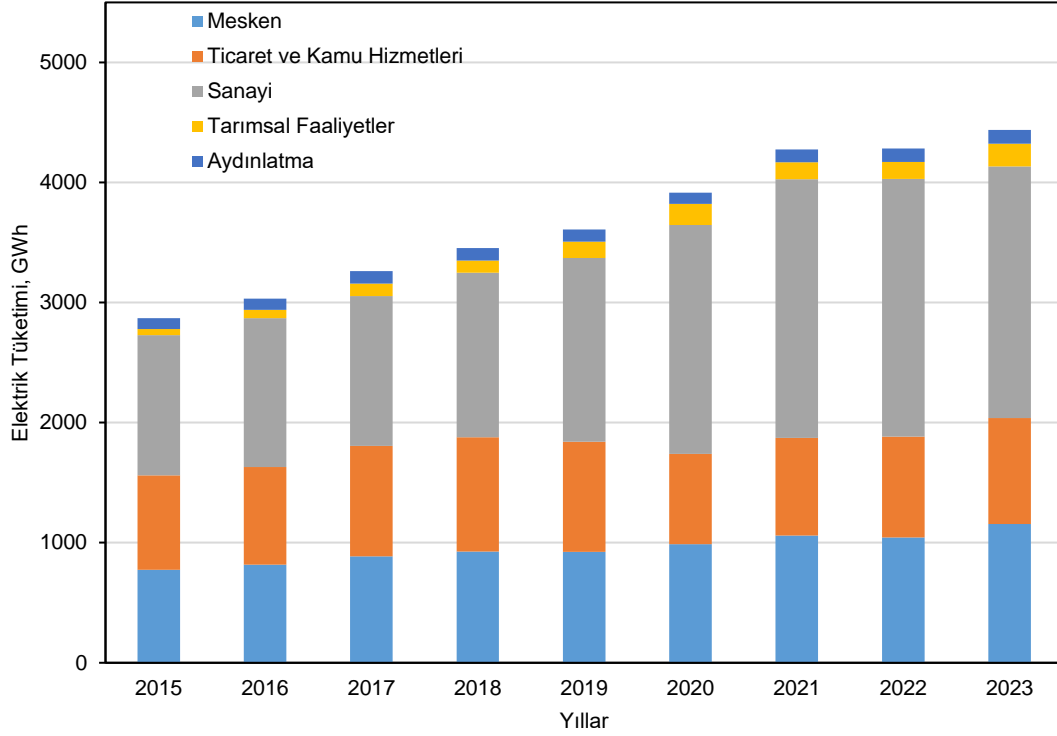
Sonuç olarak, Avrupa'nın hidrojen geleceği farklı senaryolara göre şekillenebilir. Ancak hangi senaryo gerçekleşirse gerçekleşsin, hidrojenin sadece düşük karbonlu bir enerji taşıyıcısı

olarak görülmemelidir. Hidrojen aynı zamanda enerji güvenliğini destekleyen bir unsur olarak görülmektedir.

Güney Marmara Bölgesi'nin doğalgaz ve enerji tüketimleri incelenmiştir. 2015-2024 dönemi Balıkesir ili doğalgaz tüketim verileri Şekil 43'te sunulmuştur. Balıkesir doğalgaz tüketim verileri incelendiğinde, enerji sektörü tüketiminin yıllar içinde dalgalı bir seyir izlediği ancak genel eğilim itibarıyla artış gösterdiği görülmektedir. 2015 yılında 721 milyon Sm³ düzeyinde olan enerji sektörü tüketimi, 2021'de 1843 milyon Sm³ ile pik yapmıştır. Yakın dönemde ise 2023'te ciddi bir düşüşle 1039 milyon Sm³'e gerilemiş, 2024'te ise 1150 milyon Sm³'e ulaşmıştır. Bu dalgalanma, özellikle enerji üretim altyapısındaki değişiklikler, ikincil yakıt tercihleri veya büyük sanayi tüketicilerinin geçici olarak kapanması gibi yapısal nedenlerle ilişkilendirilebilir. Sanayi sektörü tüketimi ise daha istikrarlı bir artış trendi sergilemektedir. 2015'te yalnızca 28 milyon Sm³ olan tüketim, 2024 itibarıyla 133 milyon Sm³'e yükselmiştir. Bu artış, Balıkesir'de OSB'ler ve enerji yoğun üretim yapan sanayi tesislerinin (özellikle çimento, cam, seramik, demir-çelik gibi sektörler) zamanla yaygınlaşmasıyla ilişkilendirilebilir. Aynı şekilde hizmet sektörü tüketimi de 2016'da yaşanan kısa süreli düşüş dışında düzenli biçimde artarak 2024 yılında 45 milyon Sm³'e ulaşmıştır. Bu durum, şehirleşme, turizm faaliyetleri ve ticari yapılarındaki büyümeyle paralellik göstermektedir.



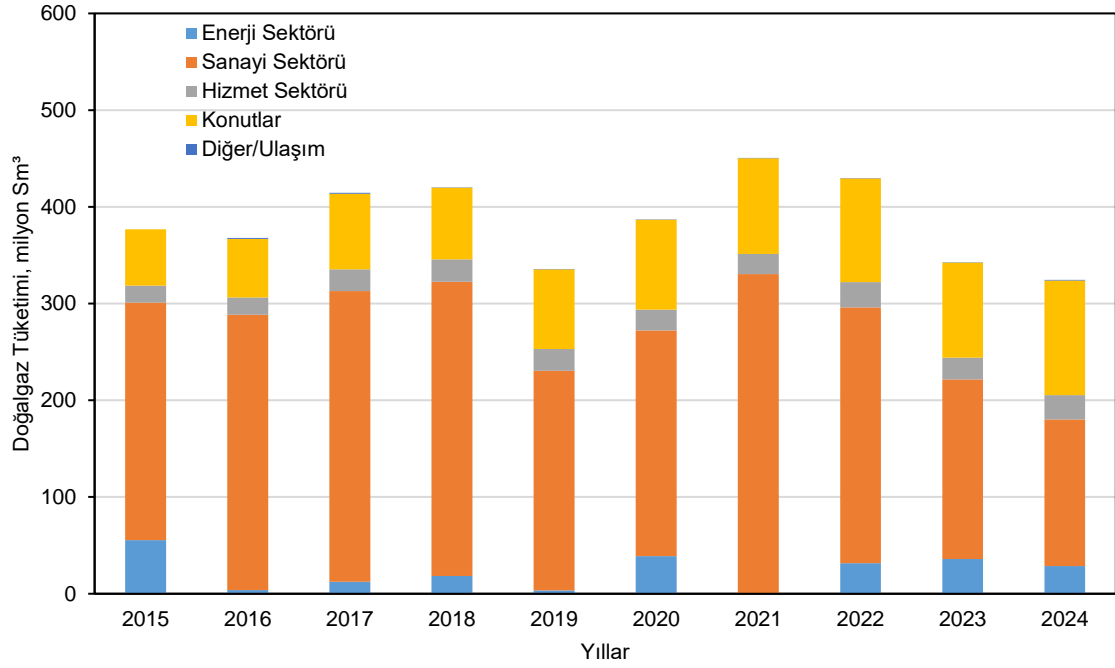
Şekil 43. Yıllara Bağlı Olarak Farklı Sektörler için Balıkesir İli Doğalgaz Tüketim İstatistikleri



Şekil 44. Balıkesir İlindeki Farklı Sektörler için Enerji Tüketim İstatistikleri

Balıkesir ili için enerji tüketimi istatistikleri Şekil 44'te sunulmuştur. 2015–2023 yılları arasında enerji tüketim verileri incelendiğinde, en büyük tüketim kaleminin sanayi sektörü olduğu görülmektedir. 2015 yılında 1168,8 GWh olan sanayi tüketimi, 2023 yılına gelindiğinde 2095 GWh düzeyine ulaşarak neredeyse iki katına çıkmıştır. Bu artış, bölgedeki sanayi üretim kapasitesinin zamanla geliştiğini ve enerji yoğun sektörlerin ağırlığının arttığını göstermektedir. Mesken tüketimi de istikrarlı bir şekilde artış göstermiş, 2015'te 773,5 GWh olan değer 2023'te 1155,9 GWh'ye yükselmiştir. Bu durum, nüfus artışı, konut sayısındaki büyüme ve yaşam standartlarındaki yükseliş ile ilişkilendirilebilir.

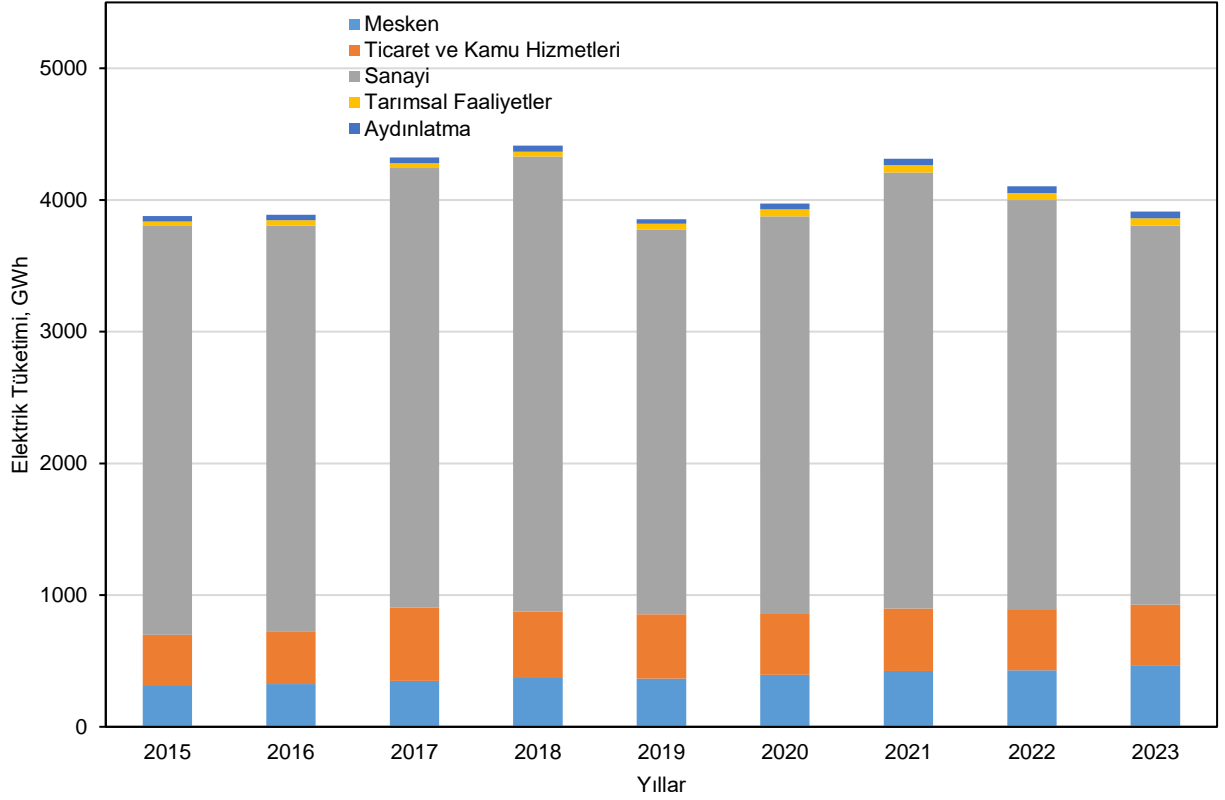
Ticaret ve kamu hizmetleri ile tarımsal faaliyetlerin enerji tüketimi ise dalgalı bir seyir izlemiştir. Ticari ve kamusal tüketim 2018'de 951,9 GWh ile zirveye ulaştıktan sonra 2020'de düşmüş, 2023'te 883,7 GWh'ye ulaşarak yükselme eğilimi göstermiştir. Tarımsal faaliyetlerdeki enerji tüketimi özellikle 2020 sonrası belirgin bir artış göstermiş ve 2023 itibarıyla 190 GWh'ye ulaşmıştır; bu da sulama sistemleri, sera faaliyetleri ve kırsal altyapıdaki dönüşümlerle açıklanabilir. Aydınlatma kategorisi ise toplam tüketim içinde görece küçük bir paya sahip olmakla birlikte, yıllar içinde 92 GWh'den 112,8 GWh'ye yükselmiştir. Bu artış, özellikle kentleşme ve altyapı yatırımlarıyla ilişkili olarak değerlendirilebilir. Genel olarak, Balıkesir'in artan enerji talebi, hem konutlaşma hem de üretim kapasitesindeki büyümeyi yansıtmaktadır.



Şekil 45. Çanakkale İli için Doğalgaz Tüketimi İstatistikleri

Çanakkale ilindeki doğalgaz ve elektrik tüketimleri Balıkesir'e kıyasla daha düşüktür. Çanakkale ilinin doğalgaz tüketimi istatistikleri Şekil 45'te sunulmuştur. 2015–2024 döneminde Çanakkale'deki doğalgaz tüketim verileri incelendiğinde, en yüksek tüketimin sanayi sektörü tarafından gerçekleştirildiği görülmektedir. 2015 yılında 246 milyon Sm^3 olan sanayi sektörü tüketimi, 2021'de 330 milyon Sm^3 ile pik yapmıştır. 2021 sonrasında kademeli bir düşüşle 2024'te 151 milyon Sm^3 'e gerilemiştir. Bu azalma, sanayi üretiminde küçülme, yakıt türü değişimi veya bazı tesislerin kapatılması gibi nedenlerle açıklanabilir. Buna karşın enerji sektörü tüketimi düşük seviyelerde kalmakla birlikte, 2020 sonrası dönemde belirli bir artış göstermiş ve 2024'te 29 milyon Sm^3 'e ulaşmıştır. Bu durum, enerji üretimi için doğalgaz kullanımının zaman zaman devreye alındığını göstermektedir.

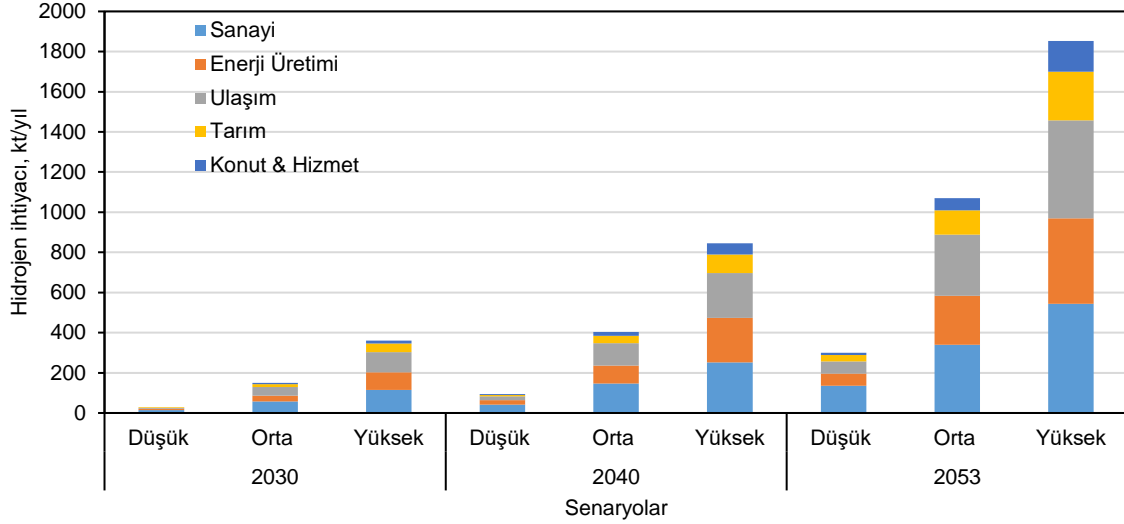
Konutlardaki doğalgaz tüketimi ise düzenli bir artış eğilimi göstermektedir. 2015 yılında 58 milyon Sm^3 olan tüketim, 2024 yılında 118 milyon Sm^3 'e ulaşarak iki katına çıkmıştır. Bu artış, konut sayısındaki artış, doğalgaz altyapısının yaygınlaşması ve kentsel dönüşüm faaliyetleriyle ilişkilendirilebilir. Hizmet sektörü tüketimi ise görece sabit seyretmiş, 17–26 milyon Sm^3 arasında değişmiştir. Çanakkale'de doğalgaz kullanımının konut ve sanayi odaklı olduğunu, ulaşımda henüz yaygınlaşmadığını görülmektedir. Genel olarak, sanayideki düşüşe karşın konutlardaki düzenli artış, enerji dönüşüm politikaları ve altyapı yatırımlarının konut odaklı geliştiğine işaret etmektedir.



Şekil 46. Çanakkale İli için Farklı Sektörlerde Enerji Tüketim İstatistikleri

Şekil 46'da sunulan 2015–2023 yılları arasında Çanakkale'nin elektrik tüketim verileri değerlendirildiğinde, en büyük payın sanayi sektörüne ait olduğu görülmektedir. 2015 yılında sanayi sektörü 3102 GWh elektrik tüketimiyle açık ara önde yer alırken, bu rakam 2018'de 3453 GWh ile pik yapmıştır. Ancak bu tarihten sonra sanayi tüketiminde dalgalı ve genel olarak azalan bir eğilim gözlemlenmiştir. 2023'te ise 2876 GWh seviyesine gerilemiştir. Bu düşüş, üretim kapasitesinde daralma, enerji verimliliği önlemleri ya da enerji yoğun sektörlerdeki yapısal dönüşümle ilişkilendirilebilir. Buna karşın konut tüketimi her yıl artış göstermiştir. 2015'te 309 GWh olan tüketim, 2023'te 467 GWh'ye ulaşarak istikrarlı bir büyüme sergilemiştir. Bu durum, nüfus artışı, kentleşme ve yaşam standartlarındaki iyileşmenin göstergesi olarak değerlendirilebilir.

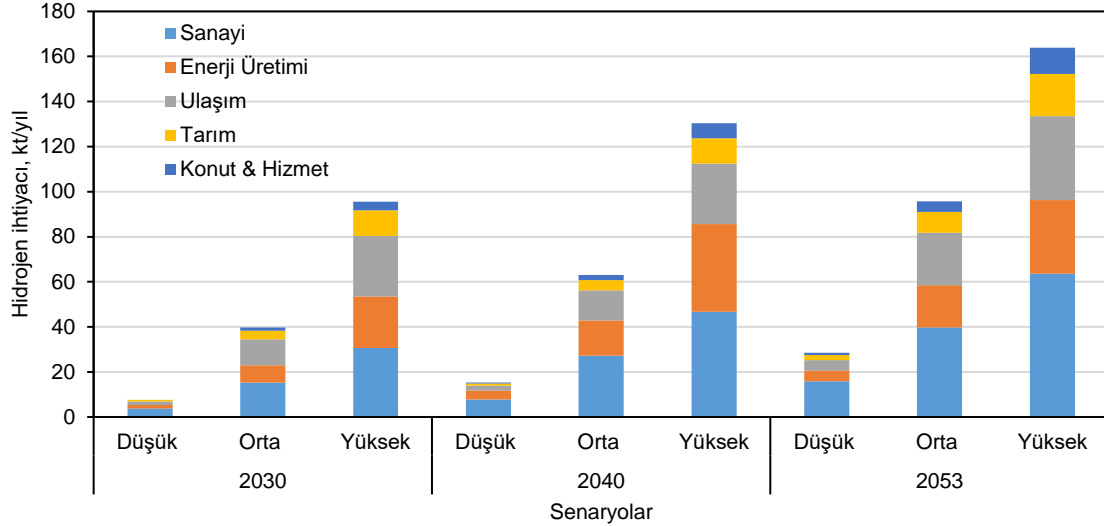
Tarımsal faaliyetlerdeki elektrik tüketimi de belirgin bir artış eğilimi sergilemiştir; 2015'te 35 GWh olan tüketim 2023'te yaklaşık 56 GWh'ye ulaşmıştır. Bu artış, sulama sistemlerinin yaygınlaşması veya daha fazla tarımsal altyapının elektrikle çalışır hale gelmesiyle ilişkilendirilebilir. Aydınlatma kategorisi ise görece düşük tüketim seviyelerine sahip olsa da, özellikle son yıllarda sürekli artarak 2023 yılında 52 GWh'ye ulaşmıştır. Bu artış, kentsel altyapı yatırımları ve dış aydınlatma projelerinin yaygınlaşmasını yansıtmaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, Çanakkale'de elektrik talebi konut ve tarımda artarken, sanayide bir duraklama görülmektedir. Bu durum, enerji planlaması açısından sektörler arası dengeyi göz önünde bulundurarak yeni yatırımların şekillendirilmesini gerekli kılmaktadır.



Şekil 47. Balıkesir ili için Hidrojen Projeksiyonları

Balıkesir ili için projeksiyon sonuçları Şekil 47’de sunulmuştur. Projeksiyon üç farklı senaryo (düşük, orta ve yüksek dönüşüm) altında 2030, 2040 ve 2053 yıllarına yönelik öngörülerini kapsamaktadır. Elde edilen sonuçlar, hidrojen talebinin özellikle sanayi, enerji üretimi ve ulaşım sektörlerinde yoğunlaşacağını açıkça göstermektedir. 2030 yılında sanayi sektörü için düşük senaryoda 14.420 ton/yıl hidrojen ihtiyacı öngörülmüşken, yüksek senaryoda bu değer 115.359 tona kadar çıkmaktadır. Benzer şekilde enerji üretimi ve ulaşımda da 2053 yılı yüksek senaryosunda sırasıyla 426.419 ton ve 487.336 ton gibi oldukça yüksek talepler öngörülmektedir. Tarım ve konut-hizmet sektörleri daha sınırlı bir talep yaratmakla birlikte, yüksek senaryoda bu alanlarda da anlamlı büyüme dikkat çekmektedir. Bu veriler, Balıkesir’in hidrojen temelli dönüşümünde öncelikli odak alanlarının sanayi ve enerji sektörleri olacağını; 2050 sonrası dönemde ise çok sektörlü yaygın bir hidrojen ekonomisine geçişin mümkün olduğunu göstermektedir. Stratejik planlamada, bu projeksiyonlar altyapı yatırımları, üretim tesisleri kapasitesi ve politika teşvikleri açısından yol gösterici niteliktedir.

Şekil 48’de sunulan Çanakkale için oluşturulan hidrojen ihtiyacı projeksiyonu, 2030, 2040 ve 2053 yıllarına yönelik düşük, orta ve yüksek dönüşüm senaryoları çerçevesinde hidrojen talebinin yıllar içinde nasıl artabileceğini ortaya koymaktadır. Verilere göre, sanayi sektörü, tüm senaryolarda en yüksek hidrojen talebini oluşturan sektör konumundadır; 2030 yılında 3.825 ton ile başlayan talep, 2053 yüksek senaryosunda 63.638 ton/yıl seviyesine ulaşmaktadır. Enerji üretimi ve ulaşım sektörleri de zamanla önemli artışlar göstermekte olup, 2053 yılında her biri 30 bin tonun üzerinde hidrojen talebi oluşturmaktadır. Tarımsal faaliyetler ile konut ve hizmet sektörlerinin hidrojen tüketimi daha sınırlı kalmakla birlikte, 2053 yüksek senaryosunda bu sektörlerin de sırasıyla 18.644 ton ve 11.653 ton hidrojen talebine ulaşabileceği öngörülmektedir. Bu veriler, Çanakkale’nin hidrojen ekonomisine geçişte özellikle sanayi, enerji ve ulaşım sektörlerine odaklanması gerektiğini göstermekte; konut, hizmet ve tarım alanlarında ise ikinci fazda dönüşüm stratejilerinin planlanmasını önermektedir. Genel olarak bu projeksiyonlar, bölgenin hidrojen altyapı planlamasına ışık tutacak nitelikte stratejik bir yol haritası sunmaktadır.



Şekil 48. Çanakkale İli İçin Hidrojen Projeksiyonları

Hidrojen hem küresel ölçekte hem de Avrupa özelinde enerji sistemlerinin dönüşümünde önemli bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Tarihsel veriler, hidrojenin rafineri ve amonyak üretimi gibi geleneksel kullanım alanlarında uzun süre baskın biçimde kullanıldığını göstermektedir. 1975 yılında yaklaşık 18 milyon ton olan küresel hidrojen kullanımı, 2022 itibarıyla 94.5 milyon tona ulaşmıştır. Bu artışın önemli bir kısmı rafineri ve amonyak sektörlerinden kaynaklanırken, son yıllarda enerji, ulaşım ve sentetik yakıt gibi yeni nesil uygulama alanlarında hidrojenin payı artmaya başlamıştır. 2053 yılına dair yapılan sektörel projeksiyonlar, ulaşım (%26), enerji (%18) ve sentetik yakıt üretimi (%17) gibi alanların hidrojen talebinde ön plana çıkabileceğini, buna karşılık rafineri gibi geleneksel kullanım alanlarının (%4) öneminin azalacağını göstermektedir.

Avrupa özelinde yapılan senaryo analizleri, hidrojenin yalnızca iklim hedefleri için değil, aynı zamanda enerji güvenliği bağlamında da stratejik bir araç haline geldiğini ortaya koymaktadır. 2030 yılı için öngörülen hidrojen talebi düşük senaryoda 15,85 milyon ton, orta senaryoda 18,46 milyon ton ve yüksek senaryoda 21,01 milyon ton düzeyindedir. Bu talebin 2053'e kadar 26,75 milyon ton ile 94,61 milyon ton arasında bir seviyeye ulaşabileceği öngörülmektedir. Bu projeksiyonların gerçekleşmesi, büyük ölçüde Avrupa Birliği'nin politika kararlılığına, altyapı yatırımlarına ve uluslararası tedarik zincirlerinin başarısına bağlıdır. Bu bağlamda, 2022'de başlayan Rusya-Ukrayna Savaşı, Avrupa'nın enerji güvenliği yaklaşımında bir değişikliğini tetiklemiştir. AB'nin REPowerEU planı kapsamında yerli ve ithal olmak üzere 2030'a kadar toplam 20 milyon ton hidrojen hedefi, bu dönüşümün politika düzeyindeki yansımasıdır.

Tüm bu bulgular ışığında hidrojenin, sadece iklim değişikliğiyle mücadele aracı değil, aynı zamanda ekonomik rekabet gücü ve jeopolitik denge aracı olarak yeniden tanımlandığı bir döneme girilmiştir. Önümüzdeki yıllarda hidrojenin üretim teknolojilerinin olgunlaşması, talep tarafının çeşitlenmesi ve küresel iş birliklerinin güçlendirilmesi ile yüksek senaryo projeksiyonlarına yakınsamak mümkün olacaktır. Ancak bu hedefe ulaşmak için bilimsel, teknolojik, ekonomik ve diplomatik çok katmanlı bir stratejinin bütüncül biçimde hayata geçirilmesi gerekmektedir.

4.5. Doğalgaz Hatlarının Yeniden Amaçlandırılması

Güney Marmara Hidrojen Omurgası

Balıkesir ve Çanakkale illerinin mevcut doğalgaz hatlarının hidrojen taşımacılığına uygun şekilde yeniden amaçlandırılması, yeni hidrojen boru hatlarının planlanması, hidrojenin güvenli şekilde depolanması, taşınması hidrojen ekosistemi için önemlidir. Bu çalışma, bölgesel hidrojen altyapısının teknik açıdan değerlendirilmesini amaçlamaktadır.

4.5.1. Giriş

Karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji güvenliğinin sağlanması için hidrojen, temiz ve sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Hidrojenin mevcut doğalgaz altyapısıyla birlikte kullanılması, hem fosil yakıtlara bağımlılığı azaltmak hem de altyapı yatırımlarını optimize etmek açısından önemlidir. Son yıllarda dünya genelinde hidrojenin doğalgaz ile karıştırılarak mevcut altyapılarda kullanımı konusunda birçok pilot proje hayata geçirilmiştir. Bu projelere ilişkin bilgiler Tablo 9'da sunulmuştur. Avustralya'da Australian Gas Networks tarafından işletilen HyPSA projesi %5 oranında karışımla 2021 yılında devreye alınırken, Jemena ve ATCO tarafından yürütülen diğer projelerde %2 ila %5 arası oranlar test edilmiştir. Kanada'da ATCO ve Enbridge Gas gibi firmalar benzer pilot uygulamalar yürütürken, Şili'de Gasvalpo şirketi %5 ila %20 arasında değişen oranlarda hidrojen karışımı gerçekleştirmiştir. Almanya'da WindGas ve Wind2Gas Energy projeleri %4-20 arasında, Hindistan, Portekiz, Romanya ve İspanya gibi ülkeler de %20'ye varan oranlarda karışım çalışmaları yürütmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise CenterPoint Energy, Dominion Energy ve National Grid gibi firmalar %1 ile %20 arasında değişen oranlarda hidrojen-doğalgaz karışım projelerini yürütmektedir. Bu projeler, hidrojenin doğalgaz altyapılarına entegrasyonu ve karbonsuzlaştırma hedefleri doğrultusunda önemli teknik ve operasyonel veriler sağlamaktadır.

Tablo 9. İşletmede Olan Hidrojen Karışım Projeleri, Veri Kaynağı: [107]

Proje İsmi	Ülke	Firma	İşletmeye Alınma	Karışım Miktarı
HyPSA-Hydrogen Park South Australia	Avustralya	Australian Gas Networks	2021	%5
Western Sydney Green Gas	Avustralya	Jemena	2021	%2
Community Blending Project - Western Australia	Avustralya	ATCO	2022	%2-5 (2030'da %10)
Fort Saskatchewan hydrogen blending project	Kanada	ATCO	2022	Bilinmiyor
Hydrogen-blending pilot in Markham	Kanada	Enbridge Gas, Cummins	2022	Bilinmiyor
Gasvalpo Energas Coquimbo	Şili	Gasvalpo	2022	%5-20
Promigas, Surtigas-Heroica	Kolombiya	Promigas, Surtigas	2022	Bilinmiyor
WindGas Haßfurt	Almanya	WindGas Haßfurt	2016	%4-5
Freiburg Municipal Energy Network	Almanya	Freiburg Municipal Energy Network	2017	%20
Wind2Gas Energy	Almanya	Wind2Gas Energy	2019	%20
Green Hysland	İspanya	Redexis, Enagás	2024	%20
Hydrogen Blending in Indore	Hindistan	GAIL, HPCL--Avantika Gas Limited	2022	%20
NTPC-GGL in Surat	Hindistan	NTPC, Gujarat Gas	2023	%5 (%20 planlanan)
Floene Seixal	Portekiz	Floene, Seixal City Council, Bosch, Catim, Gestene, ISQ, PRF, the Higher Technical Institute and Portuguese Association for the Promotion of Hydrogen - HP2H	2023	%20
20HyGrid	Romanya	Delgaz Grid (E.ON Romania group)	2023	%20
CenterPoint Energy	ABD	CenterPoint Energy	2021	%5
Therm H2	ABD	Dominion Energy	2021	%5
Blending in New Jersey	ABD	New Jersey Resources Corp.	2021	%1
HyGrid - Long Island	ABD	National Grid, Town of Hempstead	2022	%5-20
Dominion Energy Utah	ABD	Dominion Energy	2023	%5

Türkiye’de Yeşil Hidrojenin Üretilip Doğal Gaza Karıştırılması Çalışmaları raporu kapsamında, hidrojenin doğalgaz ile karıştırılarak ya da saf hidrojen olarak taşınması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır [108]. Doğalgaz ile karıştırma ya da saf olarak taşınması için kontrol edilmesi gereken kriterler Tablo 10’da sunulmuştur. Hidrojenin doğal gaz ile karıştırılarak (blending) ya da saf olarak boru hatlarında taşınması, farklı teknik ve güvenlik kriterleri gerektirmektedir. Doğal gaz ile hidrojenin karıştırıldığı senaryoda, mevcut doğal gaz altyapısı genellikle %20’ye kadar hidrojen eklenmesine olanak tanır. Polietilen ve çelik gibi mevcut boru malzemeleri bu oranlar için uygundur ve evsel cihazlarda büyük değişikliklere ihtiyaç duyulmaz. Güvenlik açısından temel gaz kaçak sensörleri ve kontrol sistemlerinin kullanımı yeterli olabilir. Bu yöntem, düşük maliyetli ve hızlı uygulanabilirliği sayesinde hidrojen dönüşüm sürecine geçiş için pratik bir çözümdür.

Tablo 10. Hidrojenin Doğalgaz ile Karıştırılması Veya Saf Olarak Taşınması Durumunda Kontrol Edilmesi Gereken Kriterler. Veri Kaynağı: [108]

Kriter	Blending (Doğal Gaz + Hidrojen Karışımı)	Saf Hidrojen Taşınması
Boru Malzemesi Uygunluğu	Polietilen (PE80), çelik, bakır, dökme demir, elastomer contalar gibi mevcut doğal gaz şebekesinde kullanılan malzemeler %20’ye kadar hidrojen karışımına uygun olabilir.	Hidrojen kırılgenliğine dayanıklı malzemeler (örneğin, paslanmaz çelik, özel alaşımlar) tercih edilmelidir. Yüksek saflıktaki hidrojen taşınmasında embrittlement riski yüksektir.
Basınç ve Sızdırmazlık	Mevcut doğal gaz sisteminde kullanılan sızdırmazlık sistemleri genellikle yeterlidir. Ancak yüksek hidrojen kaçak riski nedeniyle sensörle izleme önerilir.	Daha yüksek basınç dayanımı ve ultra sızdırmazlık gerekir. Mikro kaçaklar için gelişmiş sensör sistemleri zorunludur.
Yanıcılık ve Güvenlik	%20’ye kadar hacimsel karışım güvenlik açısından yönetilebilir bulunmuştur. Standart gaz cihazlarında değişikliğe gerek olmayabilir.	Hidrojenin düşük tutuşma enerjisi ve yüksek yayılabilirliği özel güvenlik önlemleri gerektirir. Geniş alan sensör ağı, alev algılama sistemleri ve hızlı valf sistemleri gerekir.
Kodu ve Standartlar	Mevcut doğal gaz standartlarına bazı eklemeler yeterli olabilir.	Hidrojen özelinde uluslararası standartlar (NF M58-003, ANSI/CSA HGV 3.1-2015, ASME PTC 50 vb.) ve Türkiye için uyarlanmış yeni regülasyonlar gereklidir.
İzleme ve Kontrol Sistemleri	Gaz sayaçları, akış kontrolörleri, basınç regülatörleri ve temel otomasyon sistemleri yeterli olabilir.	Anlık izleme, ileri seviye otomasyon, yüksek hassasiyetli sensörler, dijital kontrol sistemleri ve SCADA entegrasyonu gerekir.
Ekonomik ve Teknik Uygunluk	Mevcut altyapı üzerinden yürütülebilir. Düşük maliyetli geçiş yöntemi olarak kabul edilir.	Yüksek yatırım maliyeti, ancak uzun vadede saf hidrojen piyasasına entegrasyon için gereklidir. Yeni altyapı inşası şart olabilir.

Buna karşılık, saf hidrojen taşınması çok daha yüksek teknik gereksinimler içerir. Hidrojenin neden olduğu malzeme kırılgenliği riski nedeniyle özel alaşımlı ve dayanıklı boru malzemeleri gereklidir. Ayrıca, hidrojenin düşük tutuşma enerjisi nedeniyle gelişmiş kaçak tespit sistemleri, alev sensörleri ve kontrol ekipmanlarıyla desteklenmiş bir altyapı oluşturulmalıdır. Bu senaryo, daha yüksek yatırım ve işletme maliyetleri gerektirmektedir fakat hidrojenin doğrudan ve geniş çaplı kullanımı için uzun vadede kaçınılmaz bir adımdır. Küresel ölçekte uygulamada olan bir adet boru hattı bulunmaktadır, fizibilite çalışmasında ya da planlama aşamasında ise yaklaşık 150 adet proje bulunmaktadır [107].

Gaz sobası gibi ev tipi cihazlar üzerinde yapılan deneylerde, hidrojen-doğal gaz karışımlarının (10%, 20%, 30%) yanma performansı değerlendirilmiştir [109]. %20 hidrojen karışımı kullanıldığında doğal gaz tüketiminde %7,99 oranında azalma sağlanmış; buna karşılık ısıtma süresi %15,87 artmıştır. Bu durum, enerji verimliliği açısından karışımın fayda sağladığını ancak yakma süresi ve toplam gaz hacminde artışa yol açtığını göstermektedir. Ayrıca, %30

hidrojen oranına kadar sistem kararlı çalışmakta; ancak bu değerin üzerine çıkılması durumunda mevcut cihazların malzeme sınırlarına dikkat edilmesi gerektiği belirtilmektedir. Zonguldak özelinde gerçekleştirilen sistemsel analizlerde, doğal gaz ve hidrojen karışımının ekonomik uygulanabilirliği de incelenmiştir [110]. Yeşil hidrojen üretiminin dalgalı yapısı göz önünde bulundurularak, depolama tankları ve kompresör sistemleri dâhil edilmiştir. 10 bar çıkış basıncıyla üretilen hidrojen, 5 bara regüle edilerek doğal gaz ile karıştırılmış ve 1.034 bar'a düşürülerek evsel sistemlere aktarıldığı durum değerlendirilmiştir.

4.5.2. Teknik Zorluklar

Hidrojen taşımacılığı için mevcut doğal gaz boru hattının kullanılmasında ilk konu tekniktir. Başlıca teknik sorunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Hidrojen gevrekleşmesi (Hydrogen Embrittlement)

Hidrojen gevrekleşmesi (HE), metallerin, özellikle yüksek mukavemetli çeliklerin ve alaşımların, kristal kafesleri içinde atomik hidrojenin varlığı ve difüzyonu nedeniyle süneklik ve kırılma tokluğunu kaybettiği bir olgudur [111]. Hidrojen gevrekleşmesi metallerin sünekliğini, kırılma tokluğunu ve yorulma direncini önemli ölçüde azaltarak çatlak başlangıcına ve genellikle minimum görünür deformasyonla hızlı yayılmaya yol açar. Bu, hidrojene maruz kaldıktan hemen sonra veya gecikmeli olarak meydana gelebilen lokalize gevrek kırılmalarla sonuçlanır. Bu tür etkiler boru hatları, basınçlı kaplar, bağlantı elemanları ve otomotiv parçaları gibi bileşenlerde kritik öneme sahiptir. Örneğin, boru hattı çeliğinin yüksek basınçlı hidrojen gazına maruz kalması, kırılma gerinimini yarıya indirebilir ve kırılma tokluğunu büyük ölçüde azaltabilir. Altta yatan mekanizmalar arasında iç basınç artışından kaynaklanan hidrojen kaynaklı çatlama, çatlak ilerlemesini kolaylaştıran hidrojenle geliştirilmiş lokalize plastisite ve kırılma için gereken gerilimi düşüren hidrojenle geliştirilmiş ayrılma yer alır. Yüksek mukavemetli çelikler, süneklikten gevrekliğe geçiş ve hızlandırılmış yorulma çatlak büyümesine neden olan gevrekleşme ile özellikle hassastır. Mukavemet, mikro yapı ve safsızlıklar gibi malzeme faktörleri hassasiyeti etkiler; daha yüksek mukavemet ve belirli mikro yapısal özellikler hassasiyeti artırır. Genel olarak hidrojen gevrekleşmesi, hidrojen ortamlarına maruz kalan kritik metal bileşenlerin bütünlüğü ve güvenliği için ciddi bir risk oluşturmaktadır.

Sızma

Hidrojenin doğal gaza kıyasla daha düşük yoğunluğu, verimli taşımacılığı sürdürmek için gelişmiş sıkıştırma teknolojileri gerektirmektedir. Ayrıca, mevcut izleme ekipmanları genellikle hidrojen sızıntılarını tespit etmekte yetersiz kalmakta ve hidrojen altyapısında güvenliği sağlamak için özel sensörlerin geliştirilmesine duyulan acil ihtiyacı vurgulamaktadır. Hidrojenin doğal gaz boru hatlarıyla taşınmasına ilişkin güvenlik endişeleri hidrojen gevrekleşmesi, artan sızıntı ve patlama risklerine odaklanmaktadır. Hidrojen çelik boru hatlarında çatlak büyümesini hızlandırabilir, ancak sıkı denetimler arıza olasılığını azaltır. Daha düşük yoğunluğu ve daha yüksek difüzyon hızı daha sık sızıntılara neden olur ve hidrojen doğal gazdan daha kolay tuttuğu için patlama tehlikelerini artırır. Uygun izleme ve güvenlik önlemleri ile %20-25'e kadar hidrojen karışımı genellikle güvenlidir. Düzenleyici standartlar, güvenli hidrojen nakliyesini sağlamak için sızıntı önleme, basınç kontrolü ve malzeme uyumluluğunu vurgulamaktadır [112].

4.5.3. Balıkesir ve Çanakkale'nin Mevcut Durumu

Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan bölgede mevcut doğal gaz altyapısına ait harita Şekil 49'da sunulmuştur. Haritada turuncu kesikli çizgilerle gösterilen mevcut doğal gaz boru hatları, bölgedeki yerleşim yerleri ve endüstriyel merkezler arasında enerji akışını sağlayan ana omurgayı temsil etmektedir.

Bu hatlar, özellikle Bandırma, Balıkesir, Çanakkale, Biga ve Çan gibi stratejik konumları birbirine bağlamakta ve bu merkezlerde yer alan sanayi bölgeleriyle (örneğin Bandırma Limanı, Eti Maden İşletmeleri, Hidrojen Peroksit AŞ, Kale Seramik ve ilgili organize sanayi

bölgeleri) entegre şekilde çalışmaktadır. Ana hatların, hem doğu-batı (örneğin Bursa-Bandırma-Balıkesir-Çanakkale aksı) hem de kuzey-güney (Bandırma-Balıkesir) yöneliminde olduğu görülmektedir.

Bu dağıtım altyapısı, yeşil hidrojenin doğal gazla karıştırılarak mevcut boru hatlarına entegre edilmesi açısından büyük avantaj sağlamaktadır. Özellikle Bandırma bölgesindeki enerji üretim tesisleri ve liman altyapısı, yeşil hidrojenin üretimi ve taşınması için lojistik kolaylık sunarken, Balıkesir ve Çanakkale OSB'leri gibi sanayi merkezleri potansiyel tüketim noktaları olarak öne çıkmaktadır.

Dolayısıyla bu harita, hidrojenin mevcut doğal gaz şebekesi üzerinden taşınabileceği güzergâhları tanımlamaktadır. Aynı zamanda gelecekte yalnızca hidrojen taşımaya yönelik boru hatlarının entegrasyonu için stratejik planlamalara zemin hazırlamaktadır. Mevcut altyapının bu şekilde görsel olarak ortaya konması, bölgesel hidrojen omurgasının planlanması açısından önemli bir referans teşkil etmektedir.



Şekil 49. Balıkesir Ve Çanakkale İl Sınırları İçerisinde Yer Alan Doğalgaz Boru Hatları. Veri Kaynağı: [113]

4.5.4. Hidrojenin Doğalgaz Hatları ile Karıştırılması için Opsiyonlar

Yeşil hidrojenin doğal gaz sistemine entegrasyonu sürecinde iki temel yöntem öne çıkmaktadır: hidrojenin RMS (Regülasyon ve Ölçüm İstasyonu) gibi merkezi noktada üretilerek ana hatta karıştırılması veya hidrojenin evsel ölçekte lokal olarak üretilip konut bazlı karıştırılması. Her iki yaklaşımın da teknik, ekonomik ve operasyonel avantajları ile sınırlılıkları bulunmaktadır.

RMS İstasyonlarında Hidrojen Üretimi ve Blending Uygulaması

Bu yaklaşımda, yeşil hidrojen üretimi doğrudan doğal gaz dağıtım altyapısının önemli kontrol ve dağıtım noktalarından biri olan RMS istasyonlarında gerçekleştirilir. Hidrojen burada elektrolizörler aracılığıyla, genellikle güneş veya rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilir. Elde edilen hidrojen, ölçü ve basınç kontrolünden geçirilen doğal gaz akışıyla belirli oranlarda (genellikle %10–20) karıştırılır ve doğrudan dağıtım şebekesine verilir.

Avantajları:

- Merkezi üretim sayesinde kalite kontrolü ve güvenlik izleme sistemleri daha etkili uygulanabilir.
- Mevcut altyapı üzerinde minimum değişiklikle entegrasyon mümkündür.
- Enerji yoğunluğu yüksek bölgelerde ekonomik ölçek yakalanabilir.
- Yatırım ve işletme maliyetleri sistem çapında paylaşılabilir.

Dezavantajları:

- Merkezi üretim sahasına yakın yenilenebilir enerji kaynakları gereklidir.
- Hidrojenin üretildiği noktadan tüketim alanlarına kadar taşınması sızıntı riskini artırabilir.
- Yüksek basınç ve kontrol sistemleri için yatırım maliyeti gerekebilir.

Evsel/Lokal Ölçekte Hidrojen Üretimi ve Karışım Uygulaması

Bu senaryoda, hidrojen her konut veya bina düzeyinde lokal olarak üretilir. Tipik olarak çatılara kurulan küçük ölçekli fotovoltaik sistemler, küçük elektrolizörleri besleyerek hidrojen üretir. Elde edilen hidrojen, evsel doğal gaz giriş hattında belirli oranlarda doğalgazla karıştırılır ve bu karışım doğrudan kombi, ocak gibi cihazlarda yakılır.

Avantajları:

- Hidrojenin boru hattında uzun mesafe taşınmasına gerek kalmaz, sızıntı ve güvenlik riski azalır.
- Her evin kendi hidrojen üretim potansiyelini kullanmasıyla bireysel enerji özerkliği artar.
- Yerel üretim, enerji iletim kayıplarını en aza indirir.

Dezavantajları:

- Yüksek ilk yatırım maliyeti (PV paneli, küçük elektrolizör, basınç düzenleyici vb.)
- Her hane için düzenli bakım ve güvenlik denetimi gerektirir.
- Ölçek ekonomisi sınırlıdır; büyük kentlerde uygulanabilirliği zayıflayabilir.
- Gaz cihazlarının hidrojenle uyumlu hale getirilmesi gerekir.

4.5.5. Sonuç

Türkiye’de yeşil hidrojenin doğal gaz sistemlerine entegrasyonu, hem enerji arz güvenliğini artırmak hem de karbon salımlarını azaltmak amacıyla stratejik öneme sahip bir dönüşüm sürecidir. Bu kapsamda yapılan teknik ve deneysel çalışmalar, hidrojenin %10–20 oranlarında doğal gazla karıştırılarak mevcut altyapı üzerinden güvenli ve verimli bir şekilde iletilebileceğini göstermektedir. Çanakkale ve Balıkesir illerini kapsayan bölgede mevcut doğal gaz dağıtım hatları, sanayi merkezleri, enerji üretim tesisleri ve liman altyapısıyla entegre olarak, bölgesel bir hidrojen omurgasının geliştirilmesi için önemli bir temel sunmaktadır. Bu altyapı, hidrojenin

özellikle endüstriyel kullanım ve ısıtma sistemlerinde karışıma dayalı uygulamalarla devreye alınmasına olanak tanımaktadır.

DeneySEL veriler, hidrojen katkısının doğal gaz tüketimini azaltarak kaynakların ömrünü uzattığını ve CO₂ emisyonlarında belirgin düşüş sağladığını ortaya koymaktadır. Ancak NO_x emisyonlarındaki artış, hidrojen oranı arttıkça sistem tasarımında dikkatli mühendislik çözümleri gerektirdiğini göstermektedir. Ayrıca, hidrojenin RMS istasyonlarında merkezi olarak üretilip doğal gazla karıştırılması ile evsel düzeyde lokal olarak üretilmesi senaryoları arasında hem teknik hem ekonomik açılardan önemli farklar bulunmaktadır. Merkezi üretim ve blending, kısa vadede daha uygulanabilir bir yol sunarken; yerel üretim uzun vadede enerji özerkliği ve sistem esnekliği açısından avantajlar barındırmaktadır.

Sonuç olarak, Türkiye'nin enerji dönüşüm hedefleri doğrultusunda yeşil hidrojenin doğal gaz altyapısına entegrasyonu; teknik uygunluk, bölgesel planlama, altyapı analizi ve emisyon yönetimini birlikte değerlendiren bütüncül bir strateji gerektirir. Bu süreçte, hem mevcut sistemlerin hidrojenle uyumluluğu artırılmalı hem de uzun vadeli olarak saf hidrojen altyapısı için gerekli planlamalar yapılmalıdır. Yapılan çalışmalar ve pilot uygulamalar, Türkiye'nin bu alanda hızlı ve kararlı adımlar atarak bölgesel öncülük üstlenebileceğini göstermektedir.

5. Güney Marmara Bölgesi Stratejik İş Modeli Raporu

Bu bölümde, Güney Marmara Bölgesi'nin temiz hidrojen ekosistemine geçiş sürecini hızlandırmaya yönelik stratejik iş modeli yaklaşımı bütüncül bir perspektifle ele alınmaktadır. Çalışmanın temel amacı, bölgenin hidrojen üretim, dağıtım ve tüketim kabiliyetlerini çok boyutlu biçimde analiz etmek, potansiyel pazar fırsatlarını ortaya koymak ve sanayinin temiz dönüşümünü destekleyecek yönetim, mevzuat ve teşvik mekanizmalarına dair öneriler geliştirmektir.

İlk alt başlık (6.1) Güney Marmara'nın Hidrojen Vadisi perspektifinden özel konumunu değerlendirmekte, bölgenin yenilenebilir enerji potansiyeli ile hidrojen ekosistemi açısından taşıdığı avantajları kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır. Hidrojen vadilerinin yapısal bileşenleri ve bu modelin bölgeye sağlayabileceği stratejik katkılar analiz edilmektedir.

İkinci alt başlık (6.2) hidrojen ve türevleri (amonyak, metanol, toluen) odağında pazar analizini içermekte; Türkiye ve Avrupa pazar potansiyeli, elektrik üretimi, elektrikli ve hibrit araçların sektörel etkisi, elektrolizör teknolojisi, piyasa güvenilirliği ve mevzuat çerçevesinin işleyişi incelenmektedir. Bu analiz, bölgenin kısa ve uzun vadeli pazar perspektifine dair öngörülerini kapsamaktadır.

Üçüncü alt başlık (6.3) TR22 Güney Marmara Bölgesi için önerilen hidrojen üretim ve dağıtım üssü iş modelini detaylandırmaktadır. Mevcut durum, pazar ihtiyaçları, bölgesel ve uluslararası iş birliği fırsatları, ekonomik etkiler ve değer zinciri bileşenleri kapsamlı şekilde ele alınmakta; iş modelinin kurgusu ve uygulama yol haritası sunulmaktadır.

Dördüncü alt başlık (6.4) sanayinin temiz dönüşümüne ilişkin mevcut uluslararası teşvik sistemlerini ve yeni teşvik mekanizması önerilerini incelemektedir. Yatırım, tüketim ve ihracat odaklı teşvikler ile kamu-özel sektör iş birliği modellerine yönelik stratejik açılımlar değerlendirilmektedir.

Beşinci alt başlık (6.5) temiz hidrojenin gelişimi için gerekli mevzuatsal gereklilikleri ortaya koymakta ve yasal altyapıya dair öneriler geliştirmektedir. Türkiye'deki mevcut düzenlemeler, teknik standartlar, güvenlik düzenlemeleri, sertifikasyon süreçleri ve bölgesel uygulama boyutu ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

Bu kapsamlı analiz ve öneri seti, Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen ekonomisine entegre olmasına yönelik stratejik bir referans dokümanı oluşturmakta; karar vericiler, yatırımcılar ve ilgili tüm paydaşlar için yol gösterici bir çerçeve sunmaktadır.

5.1. Ekosistem Analizi

İklim değişikliği ile mücadele ve enerji güvenliğinin sağlanabilmesi için sürdürülebilir çözümler büyük bir önem taşımaktadır. Bu kapsamda temiz hidrojen teknolojileri öne çıkmaktadır. Bu bölümde hidrojen vadileri içerisinde yer alacak olan bileşenlere dair bilgi verilmektedir.

5.1.1. Giriş

Küresel enerji sistemleri, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltarak sürdürülebilir, çevre dostu ve düşük karbonlu bir yapıya dönüşmektedir. Bu süreçte hidrojen, çok yönlü kullanım alanları ve sıfır emisyon potansiyeli sayesinde öne çıkan temel enerji taşıyıcılarından biridir. Özellikle birçok ülkenin geliştirdiği ulusal hidrojen stratejileri, hidrojenin geleceğin enerji sistemindeki merkezi rolünü öne çıkarmaktadır.

Bu bağlamda ortaya çıkan hidrojen vadileri kavramı, entegre hidrojen üretimi, dağıtımı, depolanması ve kullanım uygulamalarının bir arada planlandığı bölgesel ölçekli ekosistemleri ifade etmektedir. Bu vadiler, hidrojenin endüstride, taşımacılıkta ve ısıtma gibi sektörlerde doğrudan kullanımına olanak sağlayarak bir ekonomi oluşturmaktadır. Aynı zamanda bölgesel kalkınma ve teknolojik kapasite artışı açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Dünyanın farklı bölgelerinde kurulan veya planlama aşamasında olan hidrojen vadileri, kamu-özel sektör iş birliklerinin, teknolojik yeniliklerin ve finansal yatırım modellerinin merkezinde yer almaktadır. Türkiye'nin de bu küresel dönüşümde yerini alabilmesi, stratejik yatırım kararları, uygun mevzuatlar ve yenilikçi altyapı projeleriyle mümkün olacaktır.

Aynı zamanda, elektrik üretimi için enerji kaynaklarından dağıtım sistemlerine ve son kullanıcılara kadar farklı bileşenleri içeren bir ekosistemdeki bileşenleri değerlendirebilmek için farklı parametreler göz önünde bulundurulmalıdır. Küresel ve yerel ölçekte yeşil hidrojenin mevcut trendi, yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar ve fosil yakıtlarla rekabeti, daha ekonomik temiz hidrojen üretimine duyulan ihtiyaç, üretilen hidrojenin depolanması ve son kullanıcılara ulaştırılması için daha uygulanabilir yöntemler tartışılması gereken parametrelerdir.

Fosil yakıtlar yüksek hacimlerde belirli coğrafi bölgelerden elde edilmektedir. Zaman içerisinde buna uygun dağıtım altyapısı kurulmuştur ve yaygınlaşmıştır. Yeşil hidrojen fosil yakıtların aksine, ihtiyaç duyulan yerde üretilebilme esnekliğine sahiptir. Bu özellik, hidrojen vadisi kavramının doğmasına yol açmıştır. Bu merkezler, sanayinin artan hidrojen talebine hızlı cevap verebilmek ve dağıtım maliyetlerini minimize etmek amacıyla tasarlanmaktadır. Genel olarak hidrojen vadilerinin bileşenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Hidrojen Üretimi:** Yeşil hidrojen üretimi genellikle elektroliz teknolojisine dayanmaktadır. Bunun yanında, karbon yakalama teknolojisi ile desteklenen metan reformasyonu (SMR) teknolojiyle mavi hidrojen de elde edilmektedir. Elektroliz, yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanan elektrik kullanılarak suyu hidrojen ve oksijene ayırıştırırken; SMR yöntemi metanı su buharıyla tepkimeye sokarak hidrojen üretir ve aynı zamanda emisyonların azaltılması amacıyla karbonun yakalanmasını içerir.
- **Hidrojen Depolama:** Bu merkezlerde hidrojen, gaz veya sıvı formda depolanabilir. Gaz halindeki hidrojen genellikle 350 veya 700 bar gibi yüksek basınçlı tanklarda muhafaza edilmektedir. Sıvı hidrojen ise kriyojenik tanklarda, çok düşük sıcaklıklarda tutulur. Her iki yöntem de farklı uygulamalara güvenilir hidrojen tedariki sağlamak üzere kullanılır.
- **Hidrojenin Dağıtımı:** Hidrojenin taşınmasında boru hatları, tırlar ve sıvı hidrojen tankerleri gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Boru hatları, üretim sahalarını son kullanıcılarla verimli bir şekilde bağlarken; tırlar ve sıvı hidrojen tankerler daha esnek bir taşıma çözümü sunar. Bu

dağıtım ağları, hidrojenin endüstriyel tesisler, dolun istasyonları ve diğer tüketim noktalarına ulaşmasında kritik rol oynar.

- Hidrojenin Kullanımı: Hidrojen vadileri, sanayi süreçleri, yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV) ve elektrik üretimi gibi pek çok son kullanım alanına hizmet etmektedir. Sanayide hidrojen, çelik üretimi ve amonyak sentezi gibi karbon yoğun süreçlerde fosil yakıtların yerine geçebilir. Ayrıca kimya endüstrisinde hammadde olarak kullanımı da yaygındır. Ulaşım sektöründe ise, genellikle 700 bar basınçta saklanan hidrojenle çalışan yakıt hücreli araçlar için özel dolun altyapıları gereklidir. Elektrik üretiminde ise hidrojen, gaz türbinlerinde veya yakıt hücrelerinde kullanılarak temiz ve esnek bir enerji kaynağı sunar.

Bununla birlikte, hidrojen vadileri bazı önemli zorluklarla karşı karşıyadır. Üretim maliyetlerinin yüksekliği, altyapının geliştirilmesi ve düzenleyici çerçevedeki belirsizlikler bu alanın önündeki temel engellerdendir. Özellikle yeşil hidrojen, çevresel açıdan avantajlı olsa da, geleneksel yakıtlara kıyasla halen daha maliyetlidir. Depolama, taşıma ve dolun altyapısının oluşturulması ise kapsamlı planlama, büyük yatırımlar ve kamu, özel sektör ile akademi gibi farklı paydaşların koordinasyonunu gerektirir. Ayrıca, hidrojenin güvenli taşınması ve kullanımı için net regülasyonlar ve güvenlik standartlarının oluşturulması büyük önem taşımaktadır.

Tüm bu zorluklara rağmen, hidrojen vadileri sürdürülebilir enerji sistemine geçişte kritik bir rol üstlenmektedir. Hidrojeni çeşitli sektörlerle entegre etmeye yönelik bütüncül bir çerçeve sunarak hem karbonsuzlaşma hedeflerine katkı sağlamakta hem de enerji arz güvenliğini desteklemektedir. Teknolojik gelişmelerin ve maliyet düşüşlerinin devam etmesiyle birlikte, hidrojen vadilerinin düşük karbonlu bir geleceğin inşasında giderek daha önemli hale gelmesi beklenmektedir. Bu çalışma, Güney Marmara Bölgesini temel alarak hidrojen piyasasının mevcut durumu, potansiyeli, yatırım fırsatları ve Türkiye özelindeki stratejik yönelimleri analiz etmeyi amaçlamaktadır.

Hidrojen, çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesine sahip çok yönlü ve temiz bir enerji taşıyıcısıdır. Petrol rafinasyonu, amonyak ve metanol üretimi ve metal işleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir yakıt olarak hidrojen, fosil yakıtlara sıfır emisyonlu alternatifler sunan araçlar, yedek güç sistemleri ve taşınabilir elektronikler için yakıt hücrelerine güç sağlamaktadır. Enerji sektöründe, özellikle yenilenebilir kaynaklardan üretildiğinde, enerji depolama ve şebeke stabilizasyonu için bir araç olarak hizmet vermektedir. Ayrıca hidrojen, çelik üretimi ve havacılık gibi karbondan arındırılması zor sektörlerde önem kazanmakta ve düşük karbon ekonomisine küresel geçişte kilit bir oyuncu haline gelmektedir.

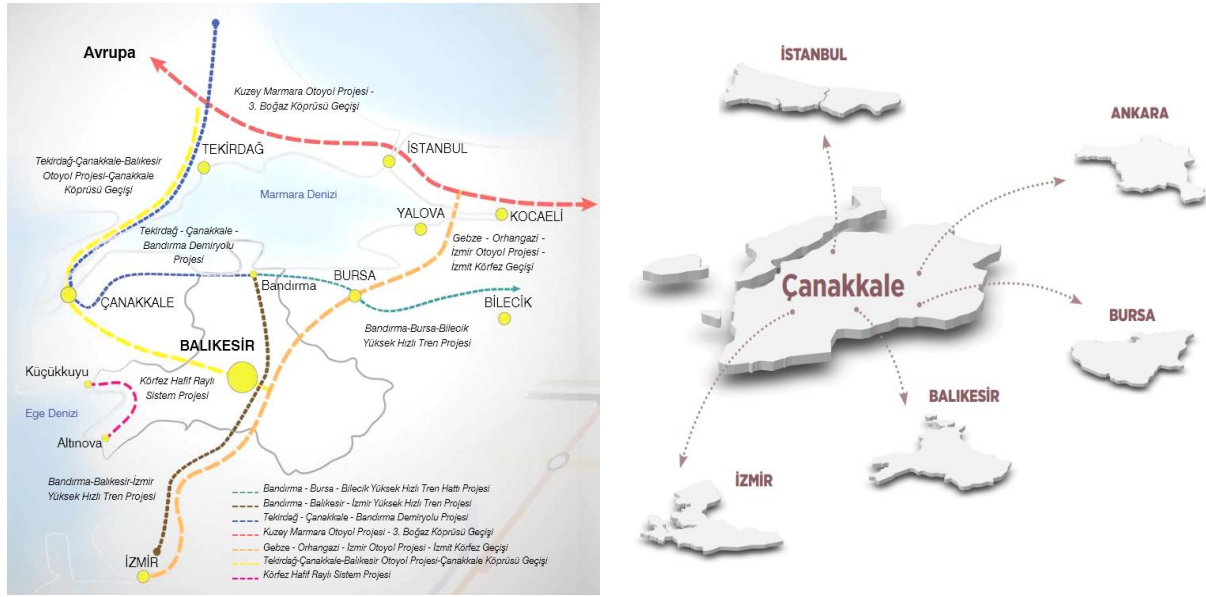
Türkiye, özellikle karbonsuzlaşma ve enerji dönüşümü bağlamında, enerji stratejisinin önemli bir bileşeni olarak hidrojene giderek daha fazla odaklanmaktadır. Bu doğrultuda Türkiye, hidrojen pazarı oluşturmak için çeşitli teşvikler başlatmıştır. Bu teşvikler arasında hidrojeni doğal gazla %10 oranında karıştırma planları da bulunmaktadır. Bu girişimler, hidrojeni mevcut enerji altyapısına entegre etmeyi amaçlamaktadır. 2020'den 2050'ye kadar olan dönem için ise stratejik bir yol haritası önerilmiştir. Bu yol haritasında 2020'den 2025'e kadar, doğal gaz şebekelerinde hidrojen karıştırmaya başlanmasına odaklanılacaktır. 2025'ten 2030'a kadar, doğal gaz boru hatlarında en az %10 hidrojen taşınması hedeflenmektedir. 2030 ile 2040 arasındaki dönemde hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi hedeflenirken, 2040 ile 2050 arasında hidrojen üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve çeşitli sektörlerde kullanımının yaygınlaştırılmasına odaklanılacaktır.

5.1.2. Hidrojen Vadisi İçin Güney Marmara Bölgesinin Özel Konumu

Balıkesir; İstanbul, İzmir, Bursa gibi kalkınmış illere yakınlığı, gelişmekte olan ulaşım altyapısı, çok alternatifli lojistik imkânları ve genç nüfusu ile sanayi yatırımlarının yeni adresi olmaktadır. Yatırımlar için uygun arazilerin bulunması, işletmelere ciddi avantajlar sunan bölgesel teşvik ve destekler, arazi fiyatlarının uygunluğu ve kurumlar arası koordinasyon, yatırımlar için Balıkesir'i daha cazip hale getirmektedir. Aynı zamanda Balıkesir; gelişen kara, demir, deniz ve havayolu ulaşımının yanı sıra, sık kullanılan ulaşım ağlarının üzerinde yer alması ve büyük sanayi

merkezlerine yakınlığı ile yatırımcıların dikkatini çekmektedir. Balıkesir, sanayi sektöründe gerçekleştirdiği inovasyon faaliyetleri ile de öne çıkmaktadır. İl, her türlü sanayi yatırımının ihtiyaç duyduğu nitelikli iş gücünü barındırmaktadır. İlde 5 farklı organize sanayi bölgesi ve 13 küçük sanayi sitesi bulunmaktadır. Organize sanayi bölgeleri arasındaki koordinasyon, yatırım ortamı için güçlü bir profil oluşturmaktadır [114].

Aynı zamanda, mevcut projenin amacı göz önünde bulundurularak, Çanakkale, stratejik konumu ve İstanbul, Bursa, İzmir gibi metropollere yakınlığı ile çevre dostu yatırımlar için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bölgenin gelişen ulaşım altyapısı, Ar-Ge faaliyetlerinin yürütülebileceği Teknopark gibi merkezleri, üniversite-sanayi işbirliğine olanak sağlayacak eğitim altyapısı, bölgesel teşvik ve destek unsurları işletmelere önemli avantajlar sunuyor. Balıkesir ve Çanakkale'nin stratejik konumu Şekil 50'de gösterilmektedir. Bu konumun bir taraftan yerel ve küresel pazarlara erişilebilirliği, diğer taraftan da sanayi, tarım ve deniz yollarının merkezi olması bu bölgeye kritik bir rol vermektedir.



Şekil 50. Balıkesir ve Çanakkale'nin Stratejik Konumu, Görsel Kaynağı: [115]

Güney Marmara Bölgesi'nde yer alan hidrojen vadisi, sanayi bölgesi olarak bilinen bölgede, başta sanayi tüketicileri olmak üzere farklı sektörler için gerekli tüm hidrojeni sağlamayı amaçlamaktadır. Yerel ve küresel pazarlarla rekabet edebilmek için, güneş parladığında ve rüzgar estiğinde yenilenebilir enerjiyi güvence altına alarak ve depolayarak yeşil enerji üretecektir.

5.1.3. Hidrojen Vadileri ve Bileşenleri

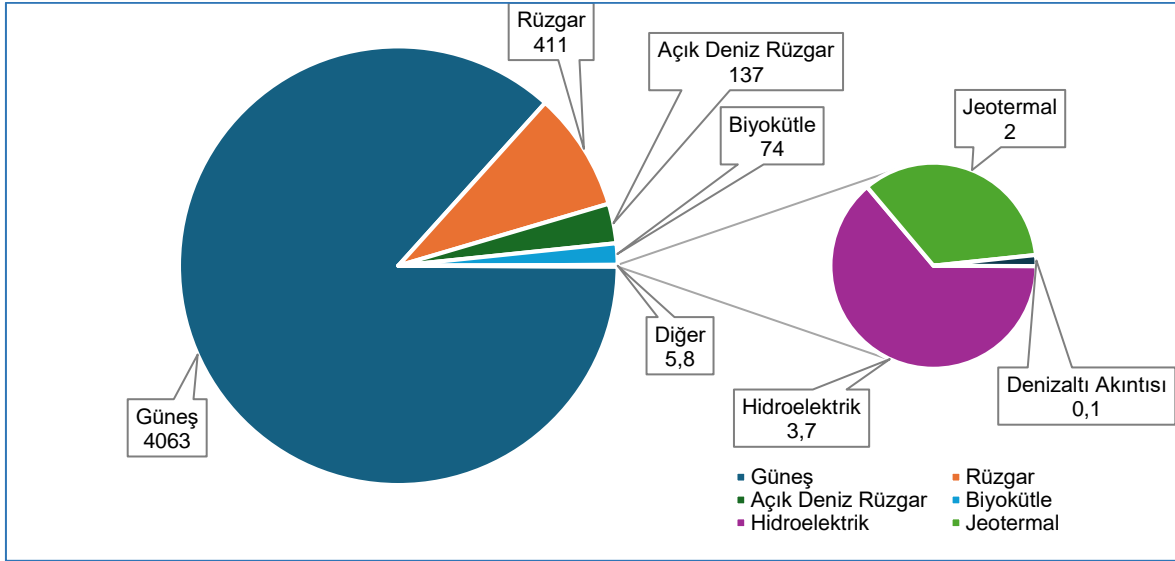
Enerji hubları, çeşitli enerji kaynaklarını, depolama teknolojilerini ve tüketicileri tutarlı ve verimli bir ağa entegre eden merkezi düğümler olarak hizmet vererek ülkelerin kalkınmasında önemli bir rol oynamaktadır [116]. Bu bağlamda hidrojen vadisi, ana unsurun hidrojen ve türevleri olduğu özel bir enerji merkezi türüdür. Ana unsurlar, yeşil hidrojen üretmek için etkili bir yöntem olan yeşil enerji kaynaklarını içerir. Son kullanıcıların konumu ve talep miktarı, üretilen hidrojenin depolama ve taşıma yöntemini belirleyen ana faktörlerdir. İdeal olan, hidrojeni son kullanıcılara mümkün olduğunca yakın bir yerde üretmektir ve böylelikle nakliye sorunu en aza indirilmiş olacaktır.

Yeşil hidrojen vadileri, ekonomilerini karbonsuzlaştırmayı ve uzun vadeli enerji bağımsızlığını güvence altına almayı hedefleyen ülkelerin kalkınmasında dönüştürücü bir rol oynamaktadır. Genel olarak, başlıca yenilenebilir enerji kaynakları (%90'ın üzerinde) rüzgâr ve güneşten

oluşmaktadır. Bu yüzden, hidrojen merkezleri, genellikle rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen hidrojenin üretimini, depolanmasını ve dağıtımını entegre ederek sanayi, ulaşım ve enerji sektörlerini destekleyen kapsamlı bir ekosistem oluşturur. Bu merkezler, yerel yenilenebilir kaynaklardan yararlanarak, doğrudan kullanılabilen veya daha sonra kullanılmak üzere depolanabilen yeşil hidrojenin istikrarlı, büyük ölçekli üretimini mümkün kılar ve güneş veya rüzgar koşulları stabil olmasa bile güvenilir bir temiz enerji sağlar [117], [118].

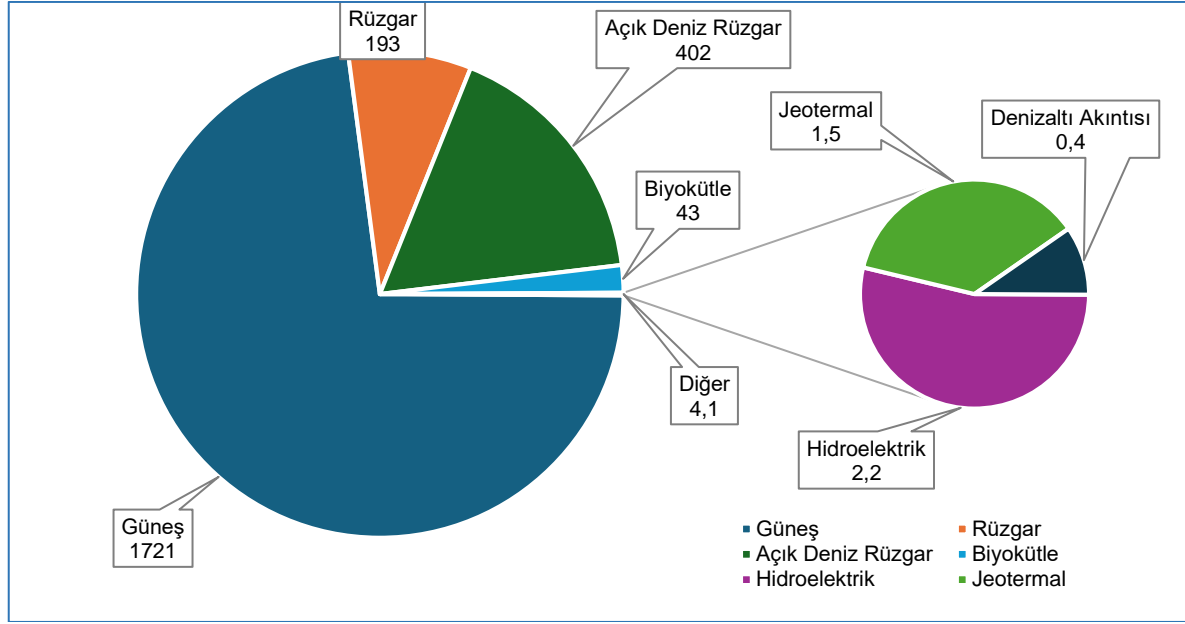
Çanakkale ve Balıkesir yenilenebilir enerji potansiyeli

Hidrojen söz konusu olduğunda, enerji üretmek için farklı yöntemler vardır, ancak mevcut projedeki ana kriter, yeşil veya temiz hidrojen olarak da adlandırılan karbonsuz hidrojendir. Bu, geleneksel Buhar Metan Reformu (SMR) yöntemleriyle üretilen hidrojenin, hidrojen üretimi sürecinde karbondioksit üretecek olan ve temiz hidrojen olmayan doğal gazla dayandığı anlamına gelmektedir. Balıkesir için hidrojen üretmeye yönelik yenilenebilir enerji potansiyeli Şekil 51'de gösterilmiştir.



Şekil 51. Balıkesir Hidrojen Üretim Potansiyeli (Kt/Yıl), Veri Kaynağı: [118]

Balıkesir'in yeşil hidrojen potansiyelini hesaplamak için öncelikle bölgenin yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeli devlet referansları kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Örneğin, güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli elde edilmiştir. Ardından, güneş panellerinin veya rüzgâr türbinlerinin kurulabileceği uygun yerler belirlenmiştir. Bu amaçla şehir alanları, milli parklar, ulaşılması zor bölgeler ve benzeri sınırlamalar göz önünde bulundurulmuştur. Benzer şekilde, diğer yenilenebilir kaynaklar da araştırılmıştır. Elde edilen yeşil elektrikten bölgenin konut ve sanayi ihtiyacı çıkarılmıştır. Kalan elektrik, toplam yeşil hidrojen üretimini elde etmek için makul bir dönüşüm verimliliği varsayılarak elektrolizörler tarafından kullanılmıştır.



Şekil 52. Çanakkale Hidrojen Üretim Potansiyeli (Kt/Yıl), Veri Kaynağı: [96]

Benzer şekilde, Çanakkale için de hem yenilenebilir enerji kaynakları hem de hidrojen üretimi açısından yüksek bir potansiyel bulunmaktadır. Şekil 52’de sunulan varsayımların en önemlisi, yenilenebilir enerji uygulamalarını kurmak için gerekli boş arazinin hesaplanmasıdır. Çanakkale ve Balıkesir toplam yüz ölçümleri devlet kaynaklarından alınmıştır. Amaç, güneş ve rüzgâr enerjileri için kara ve açık deniz alanlarını kullanmaktır, böylece faydalı net boş alan hesaplanmıştır. Kentsel alanlar, sanayi alanlar, ormanlık alanlar, milli parklar ve üzeri açık-kapalı tarım alanları şehrin toplam alanından çıkarılmaktadır. Bu çıkarma işleminden sonra, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü’nden alınan Türkiye Topografya ve Türkiye Fiziki Haritaları kaynak olarak kullanılarak bu boş arazinin de yüzde kaçının düz ve kullanıma elverişli olduğu bir katsayısı ile hesaplanmıştır [97]. Bir diğer varsayım ise şehirlerdeki çatıların ortalama yüzde 20’lik kısmının güneş enerjisine yani fotovoltaik panellere ayrılmasıdır.

Her iki bölge için, toplam güneş radyasyonu verileri Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı’na bağlı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü’nden alınmıştır [98]. Fotovoltaik sistemler için, ortalama %20 verime sahip monokristal paneller yerine daha düşük maliyete ve hesaplamalarda ortalama %15 verime sahip polikristal paneller kullanılmıştır. Üretilen elektrik gücü daha sonra elektrolizde kullanılmak üzere değerlendirilmiştir. Elektroliz prosesi için ortalama %75 verime sahip alkali tip elektrolizörler seçilmiştir. Rüzgâr enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları için de benzer varsayımlar yapılmıştır.

Hidrojen Vadisinin Güney Marmara Bölgesine Potansiyel Faydaları

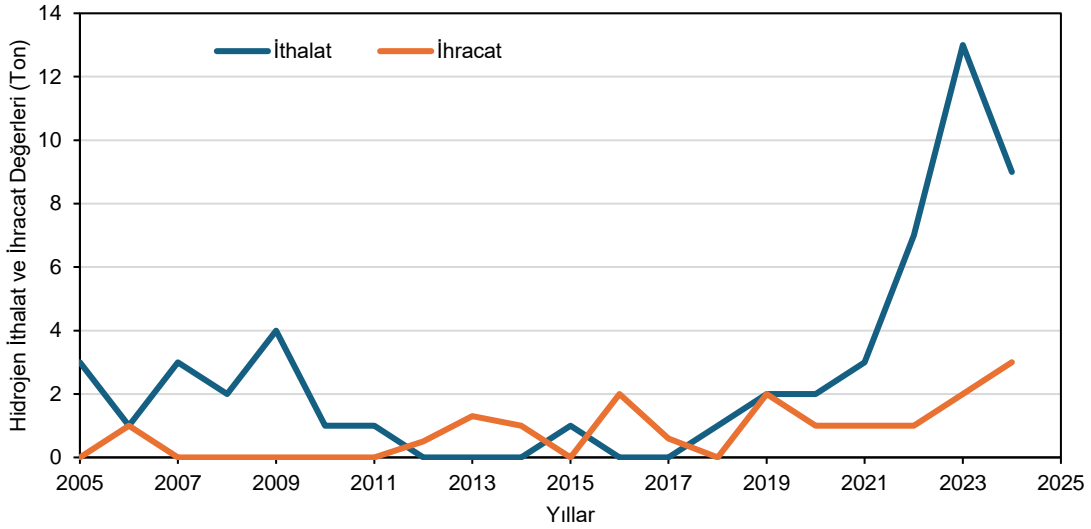
Hidrojen vadileri, geniş ölçekli ekonomi sağlayarak ve birim hidrojen maliyetini düşürerek hidrojen üretim tesisleri için sabit bir pazar sağlayabilecektir. Tüketim alanlarına yakınlığı ise yeşil hidrojen ve türevlerinin toplu tedarikini ve uygun maliyetli teslimatları mümkün kılacaktır. Bu vadiler, hidrojen kullanıcıları ve üreticileri, yenilenebilir enerji üreticileri, düzenleyiciler ve politika yapımcılar gibi paydaşlar arasında bilgi alışverişini ve kaynak paylaşımını kolaylaştırarak sektörler arası iş birliği için bir platform görevi görecektir. Bu çok paydaşlı ortaklık, mevcut ticari prosedürleri iyileştirecek, genel işleyişi optimize edecek ve yeşil hidrojen teknolojilerinin gelişimine olanak sağlayacaktır.

Küresel sahnede hidrojen merkezleri, ülkeleri temiz enerji ihracatçısı olarak konumlandırmakta ve fosil yakıt ithalatına olan bağımlılığı azaltmaktadır. Rotterdam Limanı, Danimarka ve Avustralya gibi yerlerdeki projeler, hidrojen merkezlerinin yeşil hidrojenin büyük ölçekli üretimini ve ihracatını kolaylaştırarak bir ülkenin uluslararası enerji ticaretindeki rolünü nasıl güçlendirebileceğini göstermektedir. Bu ülkelerdeki başarılı projeler göz önünde bulundurulduğunda ve Türkiye'nin diğer Avrupa ülkelerine kıyasla yüksek güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli değerlendirildiğinde, Güney Marmara Hidrojen Vadisi kritik bir öneme sahiptir. Vadinin çıktıları başta bölge olmak üzere tüm ülkeye fayda sağlayacaktır. Aşağıdaki bölümlerde, yeşil hidrojenin iç ve dış pazarı kısaca incelenmiştir.

5.2. Pazar Analizi

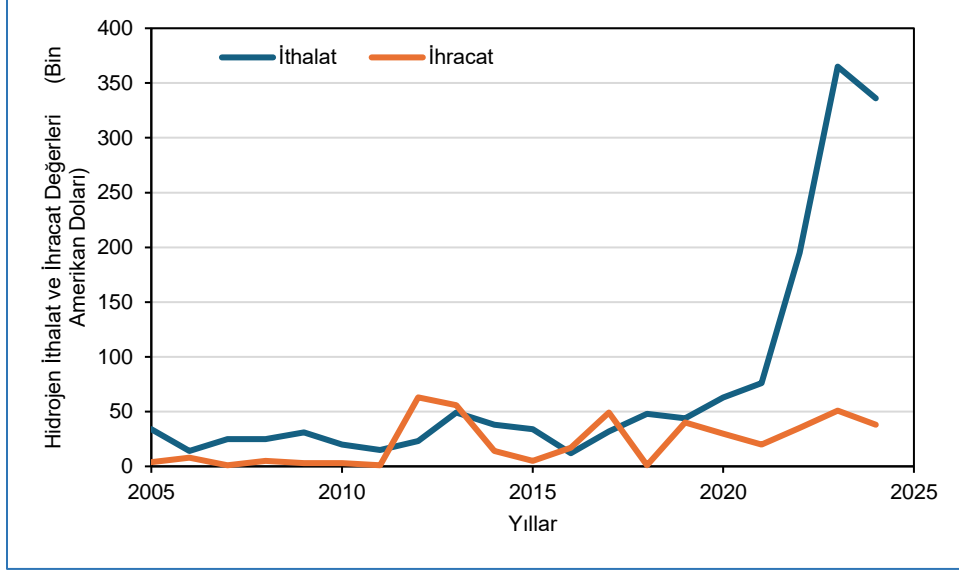
5.2.1. Hidrojen (H₂)

2005-2024 yıllarını kapsayan Şekil 53'teki grafikte, Türkiye'nin hidrojen ithalatı istikrarlı bir artış gösterirken, ihracat rakamları sınırlı düzeyde kalmıştır. Türkiye'nin hidrojen ithalatı 2005-2010 yılları arasında yıllık ortalama 5 ton seviyesindeyken, bu rakam 2023 yılında 13 ton'a ulaşmıştır. Bu durum, Türkiye'de hidrojenin endüstriyel kullanımının arttığını ve yerli üretimin bu talebi karşılamakta yetersiz kaldığını göstermektedir. İhracat verileri incelendiğinde ise, 2005-2022 yılları arasında yıllık ortalama 1 ton gibi oldukça düşük seviyelerde seyrettiği, 2022 sonrası ise özellikle yeşil hidrojen teknolojilerine yönelik yatırımların artmasıyla birlikte ihracatta kısmi bir yükseliş başladığı görülmektedir. 2024 yılında yaklaşık 3 tonluk ihracat gerçekleşmiştir.



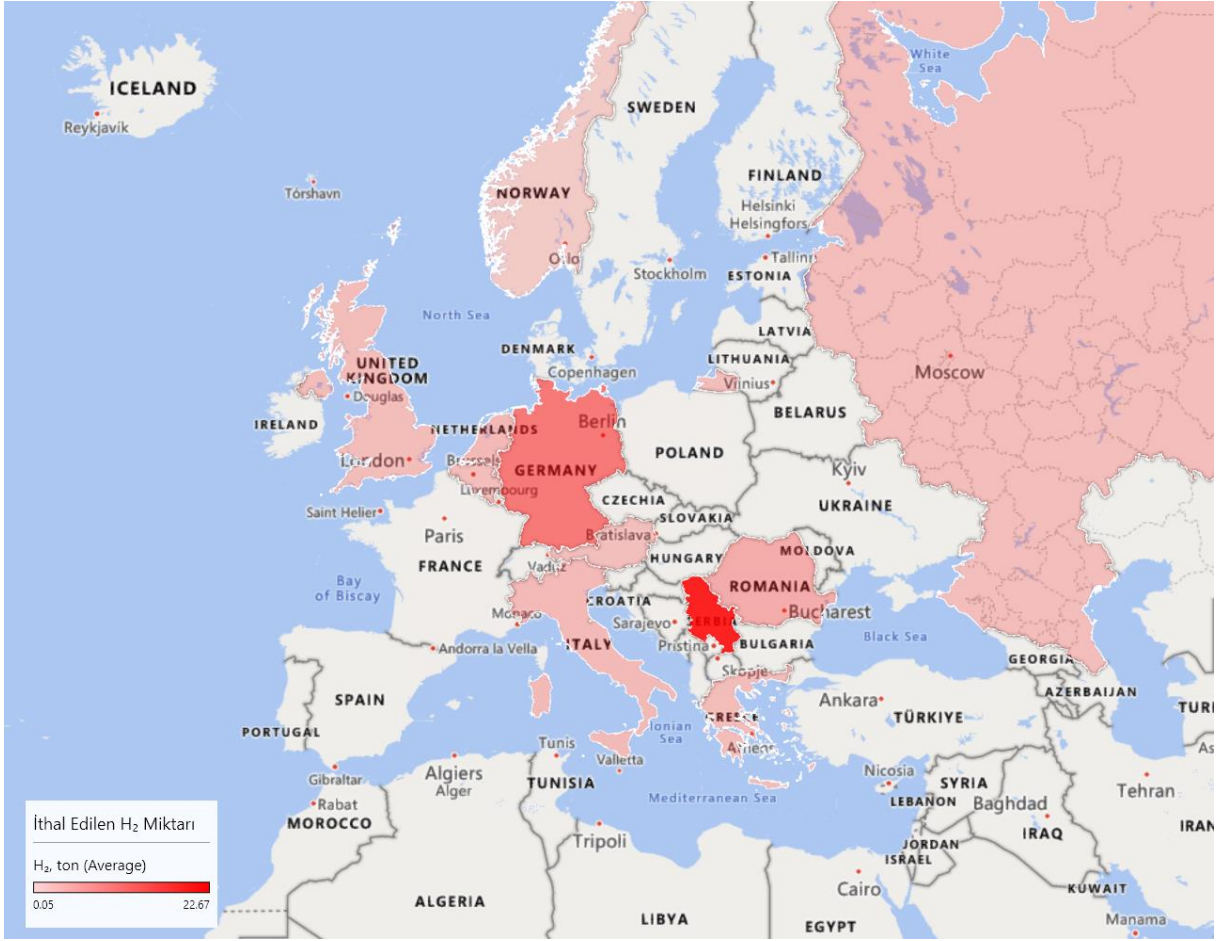
Şekil 53. Türkiye Hidrojen İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119]

Artan hidrojen ithalatı ile 2024 yılında hidrojen ithalatına ayrılan bütçe 336 bin Amerikan doları olarak belirlenmiştir. 2005–2024 Yılları arasında hidrojen ithalat ve ihracatının Amerikan doları cinsinden değişimi Şekil 54' de belirtilmiştir. Bu trendle ilgili ilginç olan şey, pandemi etkisi gibi bazı parametreler nedeniyle son yıllarda yaşanan ani artıştır.



Şekil 54. Türkiye Hidrojen İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119]

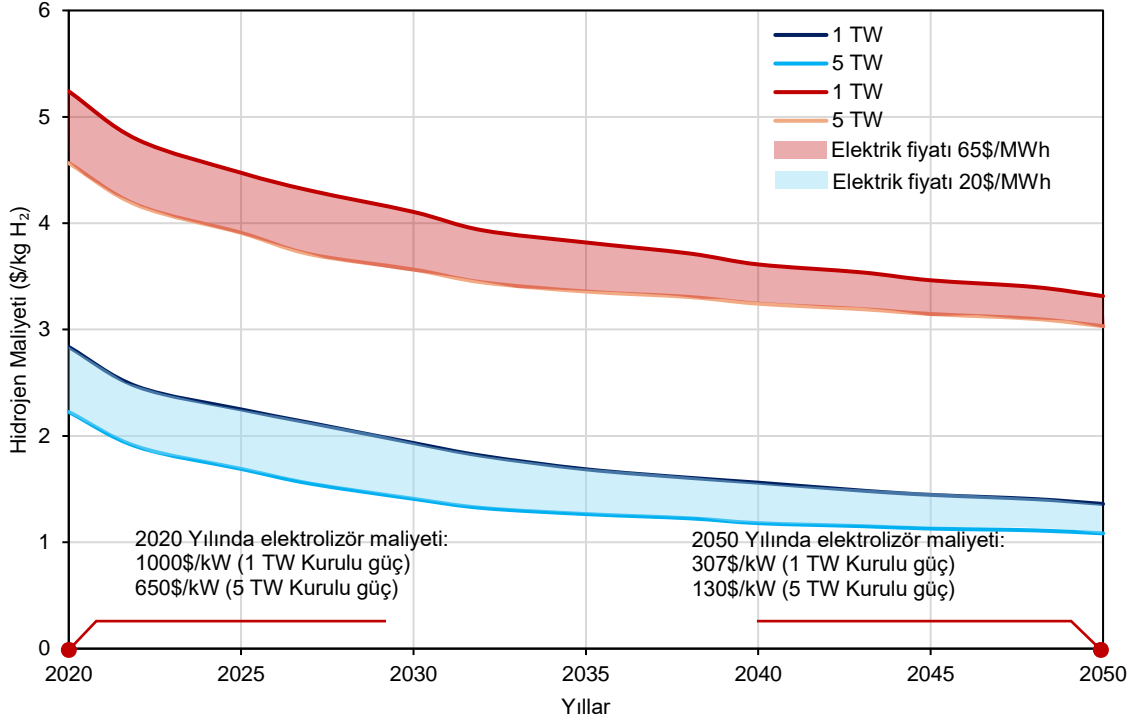
Yapılan ithalatın boyutu kadar hidrojen konusunda iş birliği yapılan ülkelerin çeşitliliği de önemlidir. 2020-2024 Yılları arasında Türkiye' nin en çok hidrojen ithal ettiği ülke 21 ton ile Sırbistan olmuştur. Sırbistan' ı sırasıyla 9, 3 ve 1 tonluk ithalat değerleri ile Almanya, Romanya ve diğer ülkeler takip etmektedir. Son beş sene içerisinde toplam hidrojenin ithal edildiği Avrupa ülkeleri Şekil 55'te belirtilmiştir.



Şekil 55. Türkiye'nin Hidrojen İthalatındaki Avrupa Ülkelerinin Payı (2020-2024), Veri Kaynağı: [119]

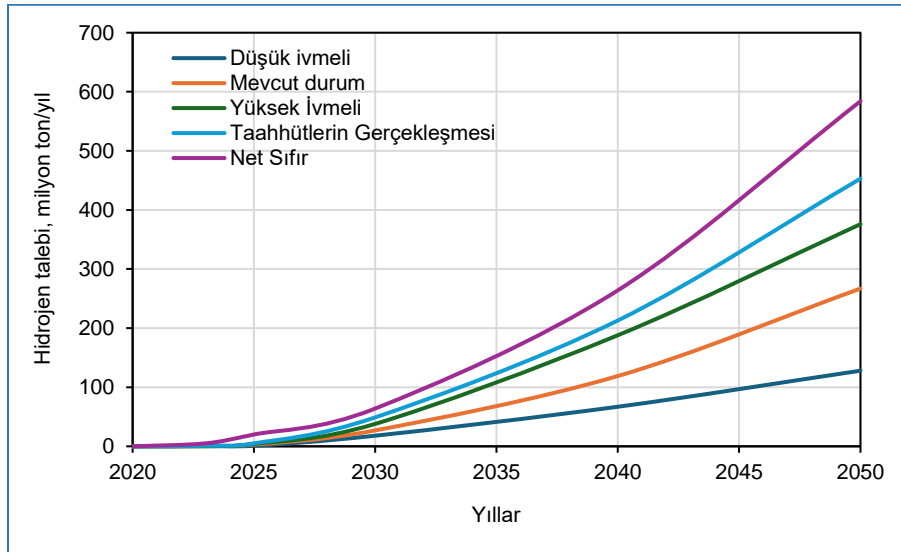
Bu grafikler, Türkiye'nin hidrojen alanında henüz net ithalatçı pozisyonunda olduğunu ancak hidrojen vadisi gibi yeşil enerji stratejileri ile orta vadede ihracat potansiyelini artırabileceğini göstermektedir. Yurt içi ve yurt dışı pazar analizinin daha hassas yapılabilmesi için Türkiye'deki hidrojen ve türevlerini üreten firmalarla iletişime geçilmiştir. HABAŞ ve Linde gibi firmalar stratejik sebeplerden ötürü net hidrojen üretimlerini saklı tutarken, Tüpraş ise yeşil hidrojen üretim planlamalarına başlayacağını belirtmiştir [120].

Küreselde ise hidrojen stratejileri geliştiren ülke sayısında dikkat çekici bir artış olmuştur. Sadece 2020 yılında 14 yeni ulusal hidrojen yol haritası yayınlanmıştır. Örneğin, Almanya ve İspanya yalnızca yeşil hidrojen üzerine odaklanırken; Birleşik Krallık ve Avustralya gibi ülkeler temiz ve düşük karbonlu seçenekler de dahil olmak üzere çeşitli hidrojen türlerini değerlendirmektedir [121]. Analiz edilen 25 ülke arasında, 13'ü temiz veya yeşil hidrojen ihraç etmeyi planlarken, 6 ülke ve Avrupa Birliği hidrojen ithalatı yapmayı hedeflemektedir. Buna ek olarak, 6 ülke ise hidrojen konusunda kendi kendine yetmeyi veya bir dağıtım merkezi olmayı amaçlamaktadır [122]. 2020 ile 2030 dönemi, hidrojen ekonomisinin kurulum aşaması olarak görülmektedir ve 2030 sonrası dönemde hidrojen talebinde keskin bir artış beklenmektedir. Ülkeler, hidrojen gelişimlerini yönlendirmek amacıyla 2030 ve 2050 yılları için somut hedefler belirlemektedir. Ülkelerin hidrojen ekonomisi hedeflerini gerçekleştirebilmelerindeki en büyük parametrelerden biri de hidrojen maliyetidir. Hidrojenin fiyatı, net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için kritik öneme sahiptir, çünkü hidrojenin temiz enerji çözümü olarak ekonominin kilit sektörlerinde uygulanabilirliğini, ölçeklenebilirliğini ve yaygınlaşmasını doğrudan etkiler. Hidrojen maliyetinin ileriye dönük tahmini Şekil 56'da belirtilmiştir.



Şekil 56. Farklı Senaryolarda Hidrojen Maliyetinin Değişimi, Veri Kaynağı: [123]

Küresel hidrojen talebinin önümüzdeki yıllarda nasıl bir seyir izleyeceğine dair çeşitli senaryolar geliştirilmiştir. Bu senaryolar, politika uygulamaları, teknolojik gelişmeler, yatırım dinamikleri ve toplumsal dönüşüm hızına göre farklılık göstermektedir. Şekil 57'de sunulan analiz, söz konusu senaryoları karşılaştırmalı biçimde ele almaktadır.



Şekil 57. Farklı Senaryolarda Yeşil Hidrojen Talebinin Değişimi, Veri Kaynağı: [124]

Buna göre hidrojen talebi beş senaryoda incelenmiştir: (i) Düşük İvmeli Senaryo, (ii) Mevcut Durum Senaryosu, (iii) Yüksek İvmeli Senaryo, (iv) Taahhütlerin Gerçekleşmesi Senaryosu ve (v) Net Sıfır Senaryosu.

Net Sıfır Emisyon Hedefi Senaryosu. Bu senaryolar, hidrojenin üretiminden kullanımına kadar olan zincirdeki gelişmelerin hızına bağlı olarak, yıllara göre talep değerlerini ortaya koymaktadır. Günümüzde, yeşil hidrojen küresel ölçekte henüz yaygın bir enerji taşıyıcısı olarak kullanılmamaktadır. Dünya genelinde üretilen hidrojenin %95'i halen fosil yakıtlardan elde edilmektedir.

2025 yılı sonrası, yeşil hidrojen talebinde ciddi bir hareketlenmenin başladığı bir eşik yılı olarak görülmektedir. 2030 yılı itibariyle hidrojen talebi, tüm senaryolarda dikkate değer biçimde artmaktadır. Bu durum, aynı zamanda küresel enerji dönüşümünde hidrojenin daha görünür bir rol üstleneceğini göstermektedir.

2040 yılına gelindiğinde hidrojen talebinde sıçrama neredeyse her senaryoda katlanarak devam etmektedir. Düşük ivmeli senaryoda yeşil hidrojen ihtiyacı yılda yaklaşık 70 milyon ton olarak tahmin edilmektedir. Mevcut durum senaryosunda ise 120 milyon ton/yıl değerine yükselmektedir. Buna karşılık yüksek ivmeli senaryo yılda 190 milyon ton, net sıfır senaryosu ise 270 milyon tonluk talep öngörmektedir.

Senaryolar arasındaki farkların temel nedeni, politika desteği, altyapı yatırımları, teknolojik gelişmeler ve kamu-özel sektör iş birliklerinin farklı düzeylerde gerçekleşmesidir. Düşük ivmeli ve mevcut durum senaryoları, bugünkü eğilimlerin küçük değişimlerle sürdürülmesi halinde hidrojenin ancak sınırlı bir rol üstleneceğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, yüksek ivmeli ve taahhüt temelli senaryolar, kararlı politika uygulamaları ve hızlı yatırım kararları ile hidrojenin çok daha geniş bir kullanım alanına ulaşacağını göstermektedir.

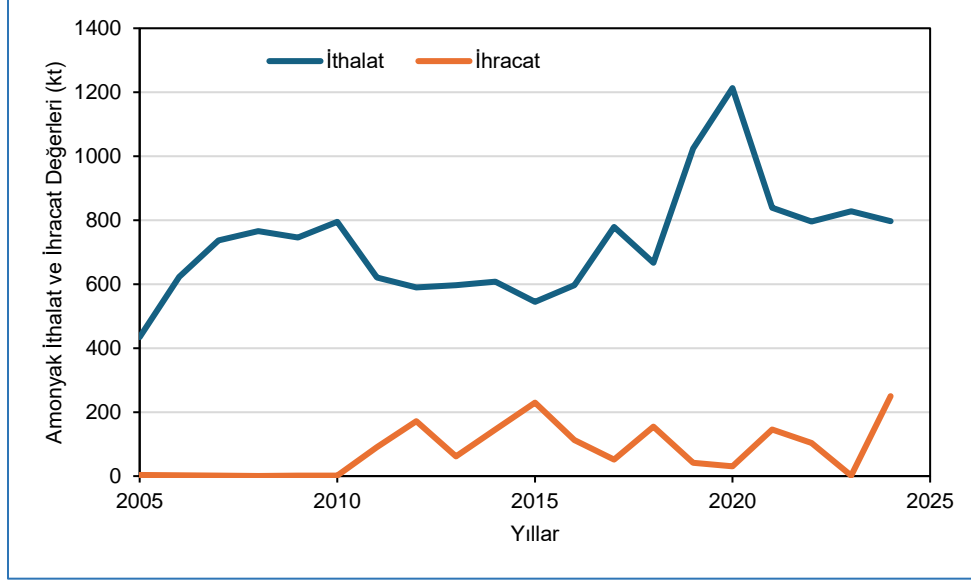
5.2.2. Hidrojen Türevleri

Amonyak (NH₃)

Amonyak, demir bazlı katalizör ile yüksek basınç ve sıcaklık altında Haber–Bosch prosesi ile sentezlenmektedir [125]. Amonyak, azot bazlı gübrelerin temel bileşeni olarak tarımda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Gübrelerin ötesinde, endüstriyel soğutma, kimyasal üretim ve su arıtma alanlarında da kullanılmaktadır. Son zamanlarda amonyak, özellikle karbonsuzlaşan küresel enerji ortamında nakliye ve enerji üretimi için bir hidrojen taşıyıcısı ve potansiyel karbonsuz yakıt olarak dikkat çekmektedir.

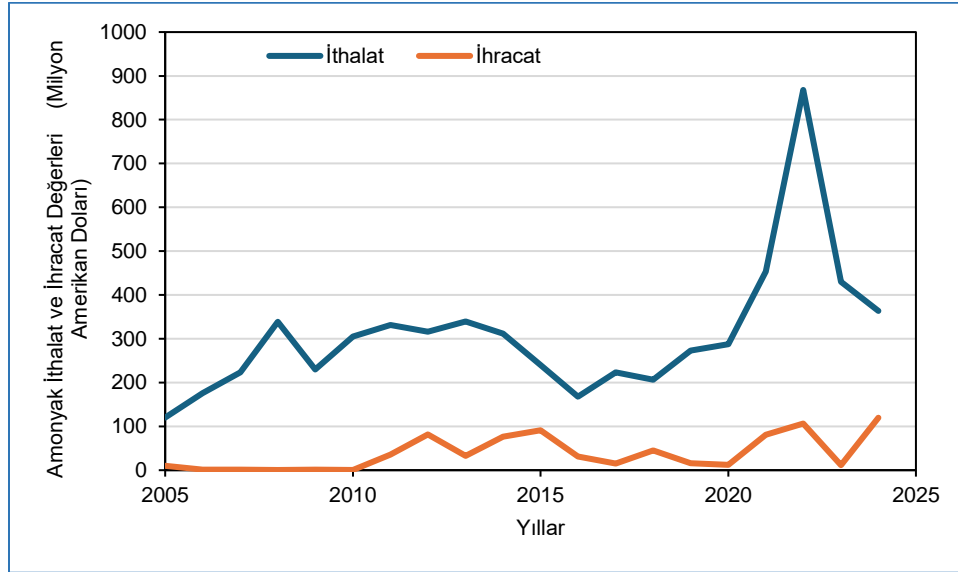
Türkiye'nin yıllık amonyak üretim kapasitesi yaklaşık 0,86 milyon tondur. Ancak, 2020 yılında gerçek üretim sadece yaklaşık 0,45 milyon ton olarak gerçekleşmiştir. Bu durum, o yıl 2,1 milyon ton olarak kaydedilen yurt içi amonyak talebinin karşılanmasında önemli bir eksiklik olduğunu göstermektedir. Gerekli ve üretilen amonyak arasındaki fark oldukça büyüktür, bu da tarım sektörünün ihtiyaçlarını karşılamak için yaklaşık 1,18 milyon ton amonyak ve 0,92 milyon ton diğer azot içeren ürünlerin ithalatına yol açmaktadır [126]. Türkiye, gerekli tüm hammadde ve gübre türlerini yurt içinde üretmeyi hedeflemektedir. Bu politika, gübre sektöründe kendi kendine yeterliliği artırmak ve ithalata bağımlılığı azaltmak için daha geniş bir stratejinin parçasıdır. Politikalar, çeşitli karbon azaltma yollarını değerlendiren bir model aracılığıyla uzun vadeli bir planlama (2020-2053) boyunca toplam maliyetleri en aza indirmek üzere tasarlanmıştır.

Türkiye'nin amonyak ithalat ve ihracat miktarları Şekil 58' de belirtilmiştir. 2005–2024 dönemini kapsayan grafiklerde, Türkiye'nin amonyak ithalatı 2021 yılı itibariyle durağan bir şekilde ilerlemektedir. İhracat rakamları ise son 15 yılda yıllık ortalama 200 bin ton civarındadır. Türkiye'nin amonyak ithalatı 2005 yılında yaklaşık 400 bin ton civarındayken, bu miktar 2024 yılına gelindiğinde 800 bin tonun üzerine çıkmıştır. Bununla beraber, pandemi sonrasında amonyak ithalat rakamlarında büyük bir düşüş gözlemlenmiştir. Amonyak, azotlu gübre üretiminde temel bileşen olarak kullanıldığından, ithalat rakamları tarım politikaları ve iklimsel koşullarla doğrudan ilişkilidir. İhracat verileri incelendiğinde, Türkiye'nin bu alanda genellikle net ithalatçı pozisyonunda olduğu görülmektedir. 2024 yılında amonyak ihracatı yaklaşık 250 bin ton civarına yükselmiştir. Bu durum, iç pazarda düşen talebin bir yansıması olarak okunabilir. İthalat kapasitesini sınırladığı ve yerli üretimin daha çok iç tüketimi karşıladığını göstermektedir.



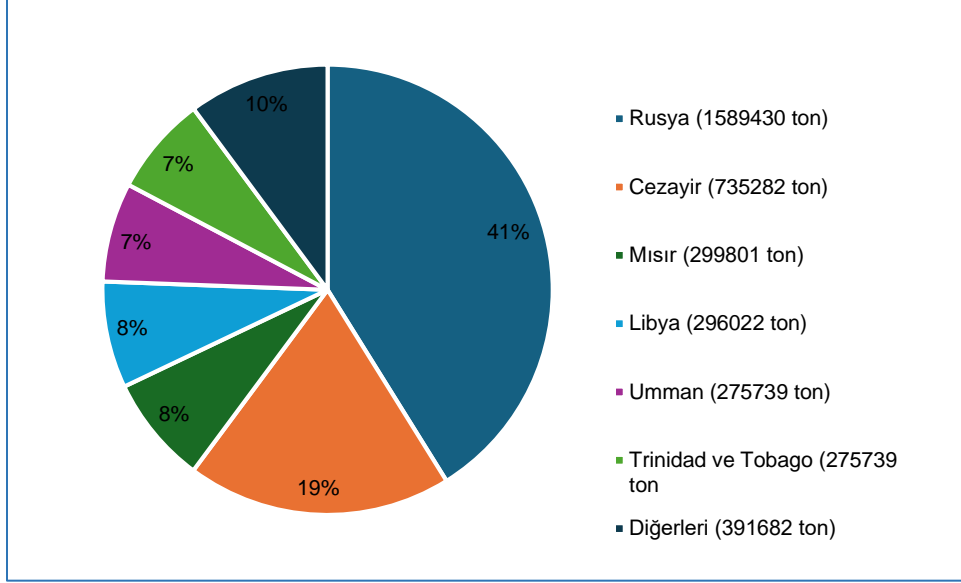
Şekil 58. Türkiye Amonyak İthalat Ve İhracat Değerleri [119]

Artan gübre talebi ile amonyağın ithalat ile ihracat değerleri arasındaki fark da açılmıştır. Sadece 2022 yılında amonyak ithalatına ayrılan bütçe 867 milyon Amerikan doları olarak belirlenmiştir. 2005 – 2024 Yılları arasında amonyak ithalat ve ihracatının Amerikan doları cinsinden değişimi Şekil 59'da belirtilmiştir.



Şekil 59. Türkiye Amonyak İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119]

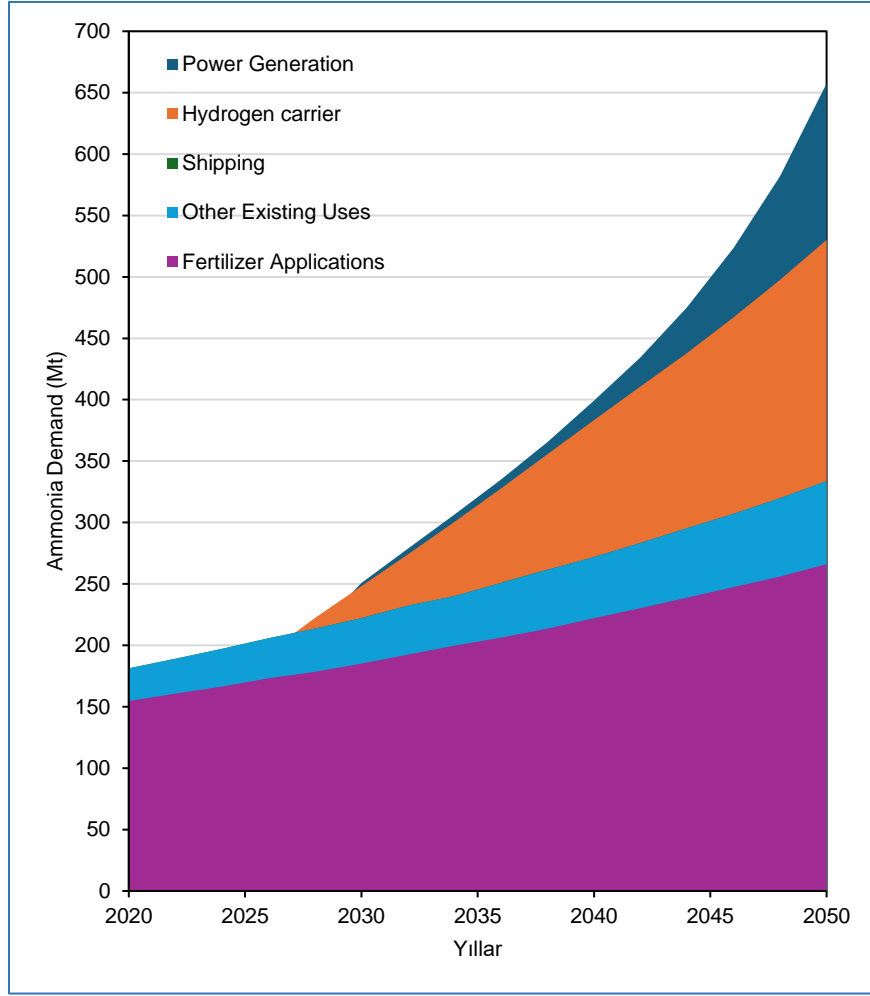
2020 – 2024 Yılları arasındaki amonyak ithalatı yapılan ülkeler incelendiğinde birinci sırada yaklaşık 1.5 milyon ton ile Rusya gelmektedir. Rusya'yı yaklaşık 735 bin ton ile Cezayir takip etmektedir. Bu iki ülke beraber Türkiye'nin amonyak ithalatının %60' unu karşılamaktadır. Amonyakın ithal edildiği ülkelerin oranları Şekil 60'ta belirtilmiştir.



Şekil 60. Türkiye'nin Amonyak İthalatındaki Ülkelerin Payı (2020-2024), Veri Kaynağı: [119]

Grafiklerdeki eğilim, Türkiye'nin petrokimya ve gübre üretim kapasitesini artırması gerektiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, gelecekte yeşil amonyak üretim teknolojilerinin benimsenmesiyle birlikte, çevreci üretim ve ihracat fırsatlarının doğabileceği öngörülmektedir.

Öte yandan küresel amonyak pazarı incelendiğinde, özellikle yeşil amonyağın hidrojen ekonomisinde kilit bir aktör olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Geleneksel amonyak endüstrisi, küresel hidrojen tüketiminin yaklaşık %43'ünü oluşturmaktadır [127]. Bu durum, amonyakın hidrojen tedarik zincirindeki kritik rolünü ve çeşitli endüstriyel uygulamalardaki önemini vurgulamaktadır [128]. Japonya, amonyağı yenilenebilir enerji ithalatının önemli bir aracı olarak görerek yeşil amonyak pazarında lider konumuna gelmeyi hedeflemektedir. Japonya, yeşil amonyak talebini artırmayı amaçlayan bir yol haritası geliştirmiştir ve 2050 yılına kadar 50 milyon tonluk iddialı bir hedef belirlemiştir. Bu stratejik hamle, Japonya'nın yeşil amonyağı enerji çerçevesine entegre etme konusundaki kararlılığını ortaya koymaktadır [129]. Hollanda da yeşil amonyak sektöründe önemli adımlar atmaktadır. Ülke, 2024 yılından itibaren yeşil amonyak ithalatına başlamayı planlamaktadır. Bu, yenilenebilir kaynaklarla enerji arzını artırmaya yönelik yaklaşımlarını yansıtmaktadır [130]. Ülkeler karbon salınımını azaltma ve yenilenebilir enerji entegrasyonu konusunda iddialı hedefler belirledikçe, yeşil amonyak talebinin artması beklenmektedir. Örneğin, Avrupa Birliği 2030 yılına kadar amonyak üretiminin yaklaşık %10'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmasını hedeflemekte, bu da daha yeşil alternatiflere doğru bir geçiş olduğunu göstermektedir [131]. 2050 yılına kadar tahmin edilen amonyak talebi Şekil 61'de belirtilmiştir [132].

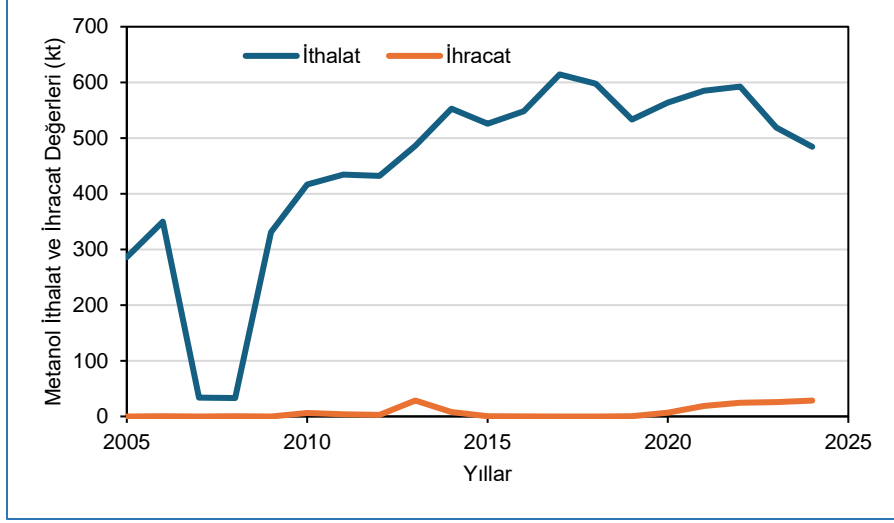


Şekil 61. 2050 Yılına Kadar Tahmin Edilen Amonyak Talebi, Veri Kaynağı: [132]

Metanol (CH₃OH)

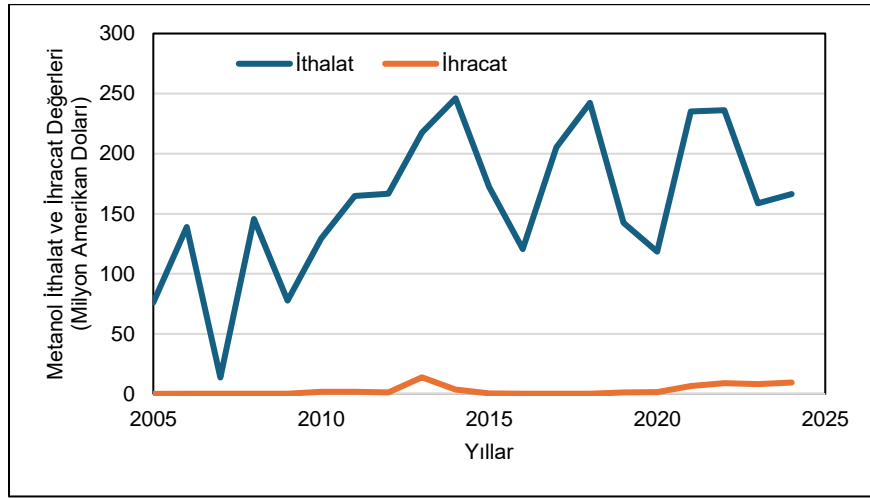
Metanol, karbon monoksit ve hidrojenin yüksek basınç ve sıcaklıklarda tepkimeye girmesi ile üretilmektedir. Metanolün üretiminde çoğunlukla bakır/çinko katalizörler kullanılmaktadır [133]. Metanol endüstride yaygın olarak kullanılan bir kimyasaldır ve formaldehit, asetik asit ve çeşitli plastikler için hammadde görevi görmektedir. Ayrıca çözücü, antifriz ve yakıt olarak da kullanılmaktadır. Yenilenebilir enerjiye olan ilginin artmasıyla birlikte metanol; araçlar, deniz taşımacılığı ve enerji üretimi için daha temiz bir alternatif yakıt olarak ortaya çıkmaktadır. Şekil 62 ve Şekil 63'te belirtilen ve 2005–2024 yıllarını kapsayan grafiklerde, Türkiye'nin metanol ithalatı son 10 yılda yıllık ortalama 500 bin ton civarındayken, ihracat rakamları 2020 yılına kadar neredeyse sıfır düzeyindedir. Metanol ihracatı 2024 yılında 28 bin ton değerine ulaşmıştır. Özellikle ithalat, yıllara göre ekonomik ve sektörel gelişmelere paralel olarak ciddi iniş çıkışlar göstermiştir. Metanol ithalatı 2006 yılında yaklaşık 350 bin ton seviyesindeyken, 2007 ve 2008 yıllarında ise ekonomik durgunluklar sebebiyle 34 bin ton gibi düşük seviyelere gerilemiştir. Bu dalgalı yapı, Türkiye'de metanolün büyük ölçüde dışa bağımlı olduğunu ve ithalatın iç talep ve fiyatlara duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. Metanol; biyoyakıt katkı maddesi, çözücü, plastik ve kimya sanayi gibi birçok alanda kullanılsa da Türkiye'de henüz yerli üretimi sınırlı olduğu için ithalat bu açığı kapatmaktadır. İhracat rakamları ise dönem boyunca neredeyse sıfıra yakın

seyretmiştir. Bu da Türkiye'nin metanol alanında üretimden çok tüketici konumunda olduğunu göstermektedir.



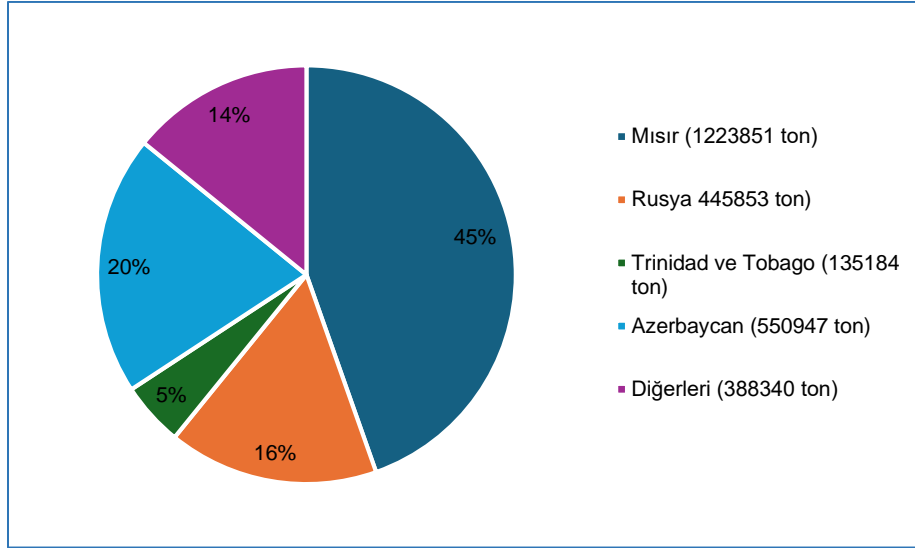
Şekil 62. Türkiye Metanol İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119]

Metanol fiyatındaki dalgalanmalar ithalat bütçesinde büyük değişimleri de beraberinde getirmektedir. 2014 – 2024 yılları arasında metanol ithalatına ayrılan bütçe değeri 250 milyon Amerikan doları ile 120 milyon Amerikan doları arasında gidip gelmektedir. 2005 – 2024 Yılları arasında metanol ithalat ve ihracatının Amerikan doları cinsinden değişimi Şekil 63'te belirtilmiştir.



Şekil 63. Türkiye Metanol İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri kaynağı: [119]

2020 – 2024 yılları arasındaki metanol ithalatı yapılan ülkeler incelendiğinde birinci sırada yaklaşık 1.2 milyon ton ile Mısır gelmektedir. Mısır' ı yaklaşık 445 bin ton ile Rusya takip etmektedir. Bu iki ülke beraber Türkiye' nin metanol ihracatının %61' ini karşılamaktadır. Metanolün ithal edildiği ülkelerin oranları Şekil 64'te belirtilmiştir.

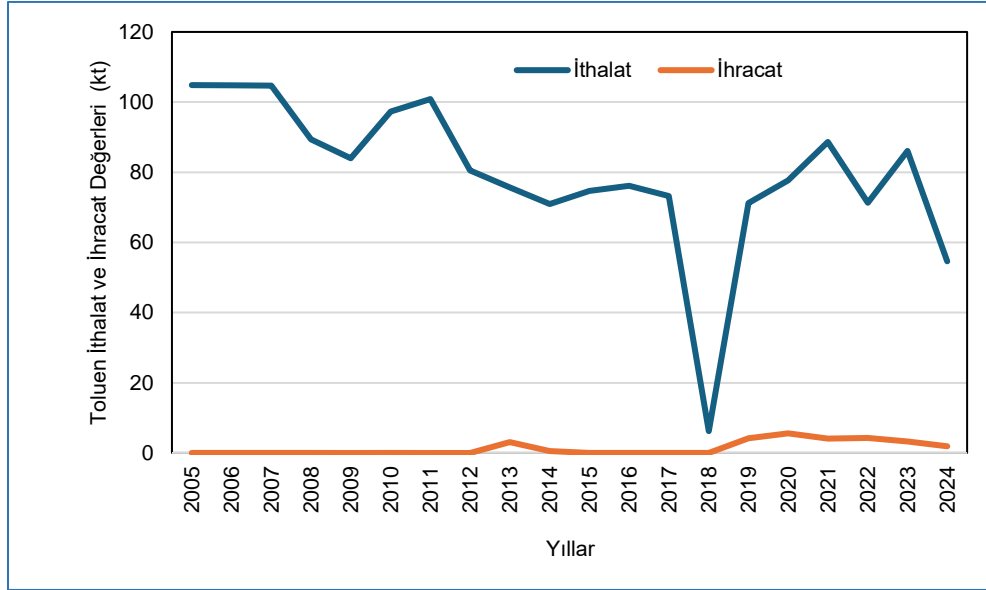


Şekil 64. Türkiye'nin Metanol İthalatındaki Ülkelerin Payı

Bu grafikler, Türkiye'nin metanolde net ithalatçı pozisyonunu sürdüreceğini, ancak gelecekte yeşil metanol gibi alternatiflerin üretimiyle birlikte yeni yatırım fırsatları doğabileceğini göstermektedir. Küresel metanol pazarı incelendiğinde, metanol yıllık 98 milyon tonun üzerinde bir miktarda üretilmekte olup, esas olarak kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Yakıt hücreli otomobiller, hibrit araçlar, içten yanmalı motorlar ve çeşitli gemilerde kullanılmaktadır. Standart oda sıcaklığı ve basınçta sıvı haldeki yapısı, depolama, nakliye ve dağıtımını kolaylaştırmaktadır. Metanol üretimi ve tüketimi, kimya sektörünün emisyonlarının yaklaşık %10'una katkıda bulunmaktadır ve yenilenebilir kaynakların benimsenmesiyle önemli ölçüde azaltılma potansiyeli bulunmaktadır. Mevcut tahminlere göre, metanol üretimi yalnızca fosil yakıtlara dayalı olarak devam ederse, 2050 yılına kadar önemli miktarda CO2 emisyonuna yol açabilecektir [134]. Yeşil hidrojen ve karbondioksit veya biyokütleden üretilen yenilenebilir metanole geçiş, sıfır karbon emisyonu hedeflerine ulaşmak için çok önemlidir. Şu anda maliyetli ve küçük ölçekte üretilse de, uygun yatırımlar ve mevzuatla 2050 yılına kadar yenilenebilir metanolün rekabetçi bir fiyatla üretilebileceği öngörülmektedir [135].

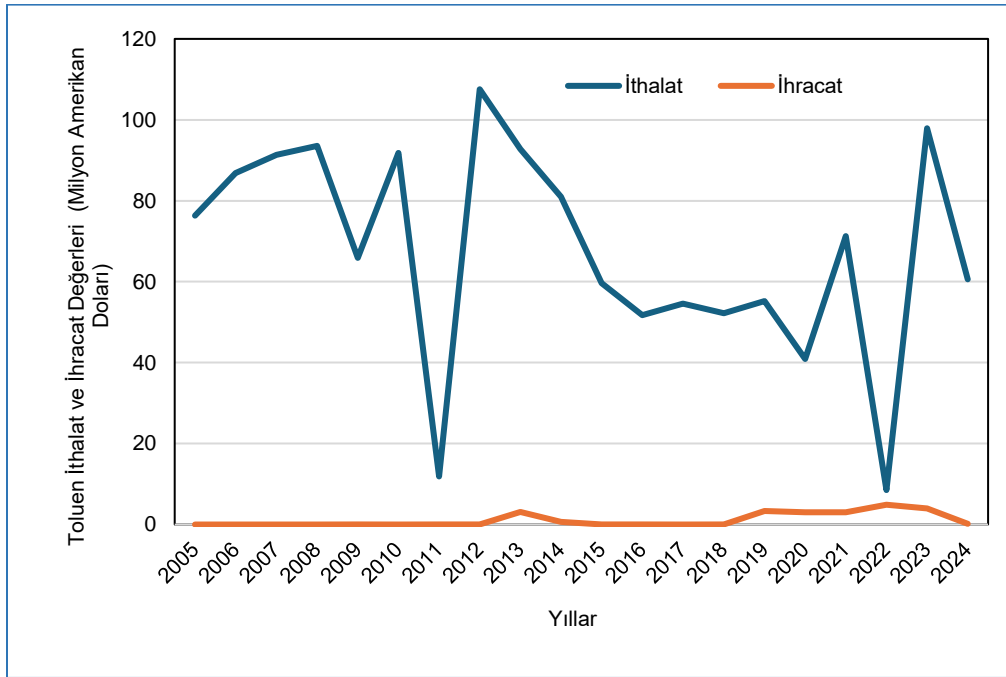
Toluen (C₆H₅CH₃)

Yaygın olarak kullanılan bir diğer hidrojen türevi de toluendir. Toluen, başlıca endüstriyel bir çözücü olarak, benzen ve TNT gibi patlayıcıların üretiminde kullanılan aromatik bir hidrokarbondur. Petrokimya endüstrisinde, boyalarda, kaplamalarda ve yapıştırıcılarda sıklıkla kullanılır. Toluen ayrıca bazı kimyasal hidrojen üretim yöntemlerinde bir hidrojen sağlayıcısıdır. 2025 – 2024 yılları arasında Türkiye'nin ithal ettiği toluenin değişimi Şekil 65'te belirtilmiştir.



Şekil 65. Türkiye Toluene İthalat Ve İhracat Değerleri [119]

Türkiye'nin toluene ithalatı son yıllarda dalgalı bir seyir izlemekte olup, iç talebe ve küresel fiyatlara duyarlı bir yapı göstermektedir. Özellikle petrokimya, boya ve solvent sektörlerindeki dönemsel dalgalanmalar ithalat miktarını doğrudan etkilemektedir. İhracat tarafında ise son 5 yılda çok sınırlı bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, Türkiye'deki kimya sektörünün büyümesine rağmen, halen toluene alanında net ithalatçı konumunun sürdüğünü ortaya koymaktadır. Yerli üretimin artması durumunda, bu ürünün dış ticaret dengesi daha istikrarlı hale gelecektir. Şekil 66 aynı zamanda Tolune'nin söz konusu yıllardaki Toluene İthalat ve İhracat Değerlerini göstermektedir.



Şekil 66. Türkiye Toluene İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119]

Türkiye iç pazarında hidrojen ve türevlerinin miktarının belirlenebilmesi için son beş yıldaki ithalat ve ihracat rakamları birbiriyle toplanmıştır. Elde edilen toplam değerler Tablo 11’de belirtilmiştir. Tabloda hidrojenin birimi ton ile belirtilirken, amonyak, metanol ve toluen değerleri kiloton ile belirtilmiştir.

Tablo 11. Son 5 Yılda Türkiye Pazarındaki Hidrojen Ve Türevlerinin Miktarı [119]

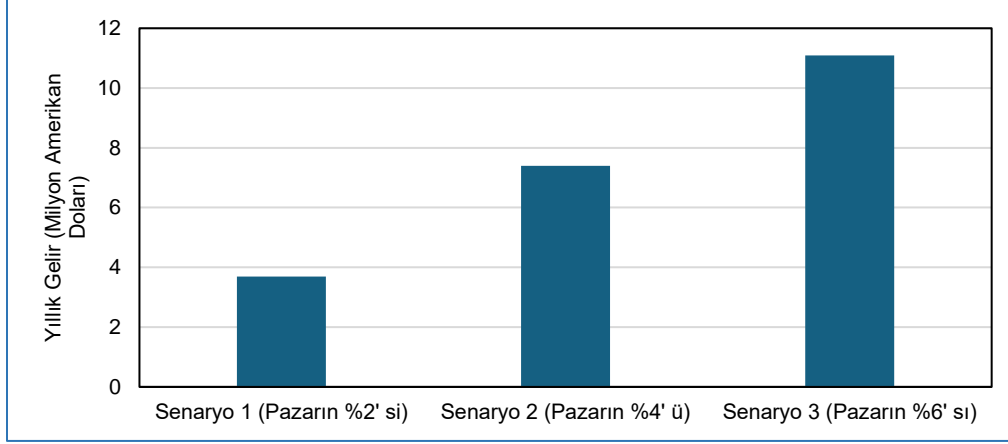
Yıllar	Toplam Hidrojen Pazarı (ton)	Toplam Amonyak Pazarı (kt)	Toplam Metanol Pazarı (kt)	Toplam Toluen Pazarı (kt)
2020	3	1243,8	570,7	83,2
2021	4	984,3	603,8	92,7
2022	8	900,2	616,7	75,5
2023	15	829,9	544,1	89,3
2024	12	1046,8	512,6	56,5

Tablo 11’de elde belirtilen değerler incelendiğinde Türkiye iç pazarında hidrojenden ziyade türevlerine daha yüksek bir talebin olduğu görülmektedir. Ancak hidrojen türevlerinin, kendilerini oluşturan ana unsur olan hidrojen cinsinden bilinmesi Türkiye iç pazarına daha net bir bakış açısı sunacaktır. Bu sebeple bir ton amonyak, metanol ve toluen için gerekli hidrojen miktarlarının hesaplanması gerekmektedir.

Bir ton amonyak üretimi için 178 kilogram hidrojene ihtiyaç duyulmaktadır. Benzer şekilde metanol üretimi için ise bir ton başına 190 kilogram hidrojen gerekmektedir. Toluende ise durum biraz daha farklıdır. Toluen reaksiyonu esnasında hidrojen doğrudan sağlanmamaktadır. Bunun yerine benzen ve metanol kullanılarak sentezlenir. Bir ton toluende 87 kilogram hidrojen bulunmaktadır. Tablo 11’deki hidrojen ve türevlerine ait veriler ele alındığında Türkiye’ nin son 5 yıllık hidrojen ihtiyacı yaklaşık 1500 kiloton olarak hesaplanmıştır. Bu sayı, yıllık ortalama 300 kiloton hidrojen ihtiyacına tekabül etmektedir.

Türkiye Hidrojen Pazar Potansiyeli

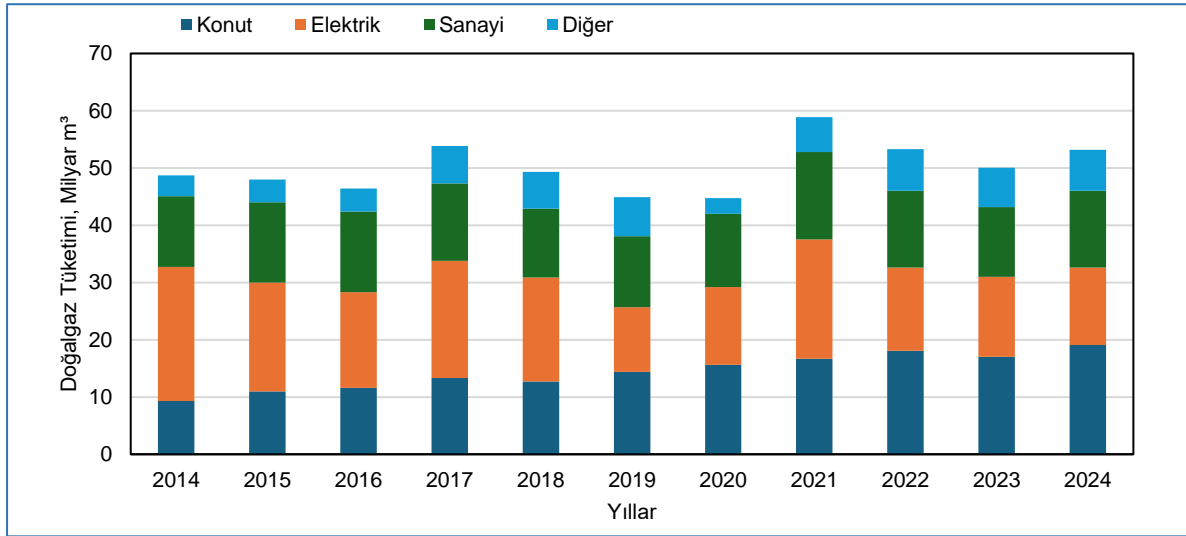
Türkiye için yapılan finansal analizde ihracat potansiyeli de belirlenmiştir. Bu potansiyel belirlenirken, ithal edilen hidrojenin ağırlığı veya hacmi yerine gerçekleştirilen alım ücreti üzerinden yapılmıştır. Bunun sebebi yapılan ithalat esnasında taşınan hidrojenin basıncı ve sıcaklığının bilinmemesidir. Bu sebeple analizin maliyet üzerinden yapılması daha isabetli sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır. Türkiye’ nin hidrojen ihracatı yaptığı senaryolarda elde edeceği yıllık gelirler Şekil 67’de belirtilmiştir. Senaryolarda sırasıyla %2, %4 ve %6 pazar hakimiyeti işlenmiştir.



Şekil 67. Hidrojen Pazarına İhracat Senaryolarında Elde Edilebilecek Yıllık Gelirler, Veri Kaynağı: [119]

Şekil 67 incelenirken, bu senaryoların sadece hidrojen için hazırlandığı unutulmamalıdır. Küresel amonyak pazarı hidrojen pazarından 45 kat ve küresel metanol pazarı 80 kat daha büyüktür. Ayrıca toulen pazarı da hidrojen pazarından 19 kat daha büyüktür. Hidrojen türevlerinin de hesaba katılması ile küresel talebin %2' sinin karşılandığı senaryoda yıllık 532 milyon Amerikan doları gelir elde edilebilir. Bu sayı %4 pazar hakimiyeti için yaklaşık 1 milyar Amerikan doları ve %6 Pazar hakimiyeti için 1.5 milyar Amerikan dolarıdır.

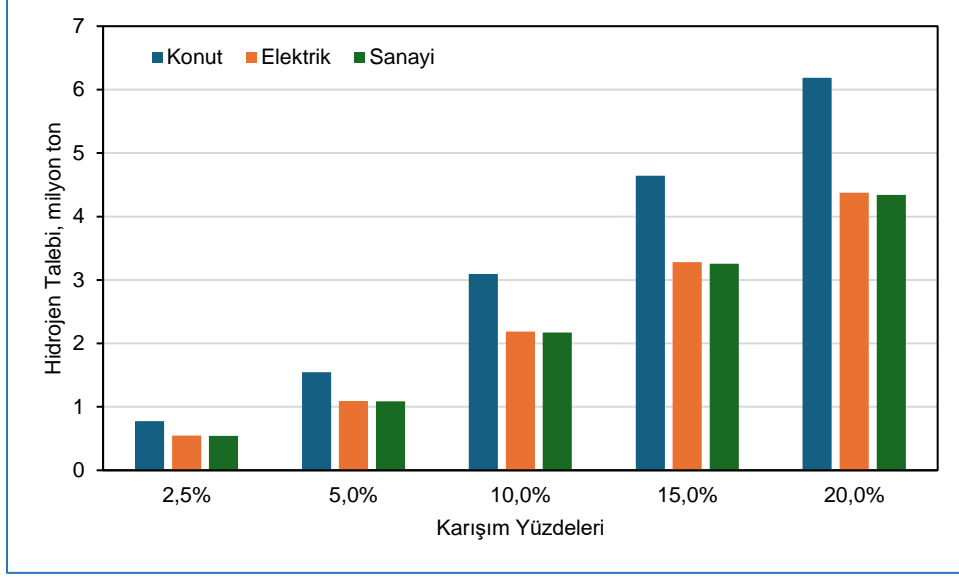
Türkiye içindeki talebin belirlenmesi nispeten daha zordur. Hidrojenin ticaret eğilimlerine bakıldığında, hacmin oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hidrojenin doğalgaz ile karıştırılarak kullanılması ve belirli oranlarda ya da tamamen hidrojen kullanan brülör ünitelerin tasarımı üzerine çalışmalar mevcuttur. Sınırdaki karbon uygulamasının devreye girmesi ile birlikte özellikle demir-çelik gibi doğalgaz tüketimi yüksek sektörlerde hidrojen kullanımının yaygınlaşacağı öngörülmektedir. Bu kapsamda Türkiye'nin doğalgaz tüketim eğilimlerinin incelenmesi uygun bir yaklaşım olacaktır. Buna göre Türkiye'de sektörler göre yıllık tüketilen doğalgaz miktarları Şekil 68'de sunulmuştur.



Şekil 68. Sektörlere Göre Türkiye'de Yıllık Doğalgaz Tüketim Miktarları, Veri Kaynağı: [136]

Şekil 68 incelendiğinde, yıllara göre konut tüketiminin arttığı, enerji tüketiminin ise azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, sanayi tüketimi ortalama 12,8 milyar m³ seviyelerindedir. Türkiye

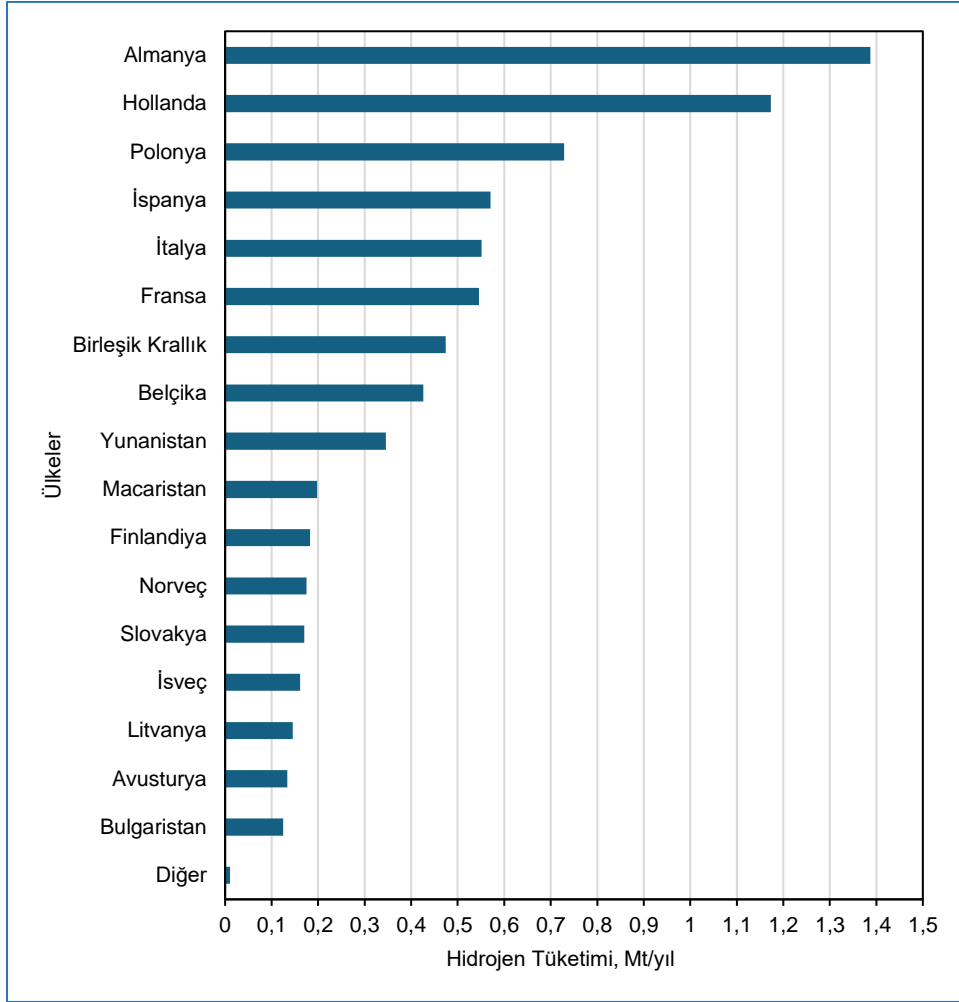
Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritasına göre doğalgaz hatlarında planlanan hidrojen karışım oranı %5-20 arasındadır. Buna göre bu karışım yüzdelerine göre ihtiyaç duyulacak olan hidrojen miktarları hesaplanarak Şekil 69'da sunulmuştur. Buna göre önümüzdeki süreçte yıllık 4.3-17.2 milyon ton aralığında hidrojen talebi oluşması söz konusudur.



Şekil 69. Doğalgaz Karışım Yüzdelerine Göre Türkiye’de Oluşabilecek Hidrojen Talebi

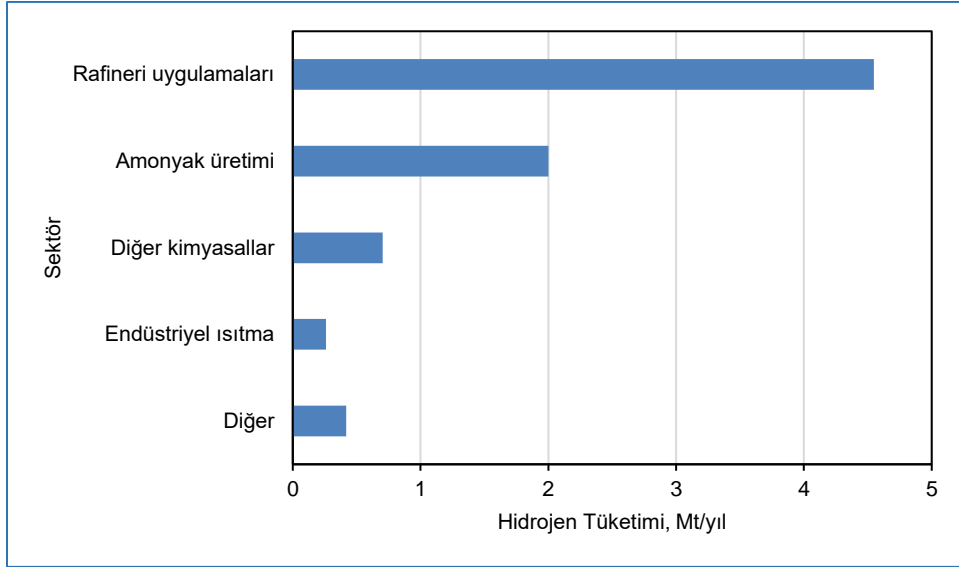
Avrupa Pazar Potansiyeli

Avrupa ülkelerine ait yıllık hidrojen tüketim verileri Şekil 70’te sunulmuştur. Avrupa ülkelerinin yıllık toplam hidrojen tüketimi incelendiğinde ülkeler arasında büyük farklılıklar olduğu görülmektedir. Bu farklılıklar, ülkelerin ekonomik yapıları, sanayi yoğunlukları ve enerji politikalarıyla doğrudan ilişkilidir. Verilere göre Almanya, yıllık 1.387.000 ton ile en fazla hidrojen ihtiyacına sahip olan ülkedir. Almanya’yı 1.173.000 ton ile Hollanda, 729.000 ton ile Polonya, 570.000 ton ile İspanya, 551.000 ton ile İtalya ve 546.000 ton ile Fransa takip etmektedir. Bu ülkeler, Avrupa’nın en büyük sanayi üreticileri arasında yer almakta olup, rafineriler, kimya tesisleri ve ağır sanayi sektörlerinde hidrojenin yaygın olarak kullanıldığı merkezlerdir. Bu ülkelerde yeşil hidrojenin tüm tüketime olan oranı %1’in altındadır ve halen büyük oranda gri hidrojen kullanılmaktadır. Yeşil hidrojen geçişinin bu ülkeler için büyük bir potansiyel taşımaktadır.



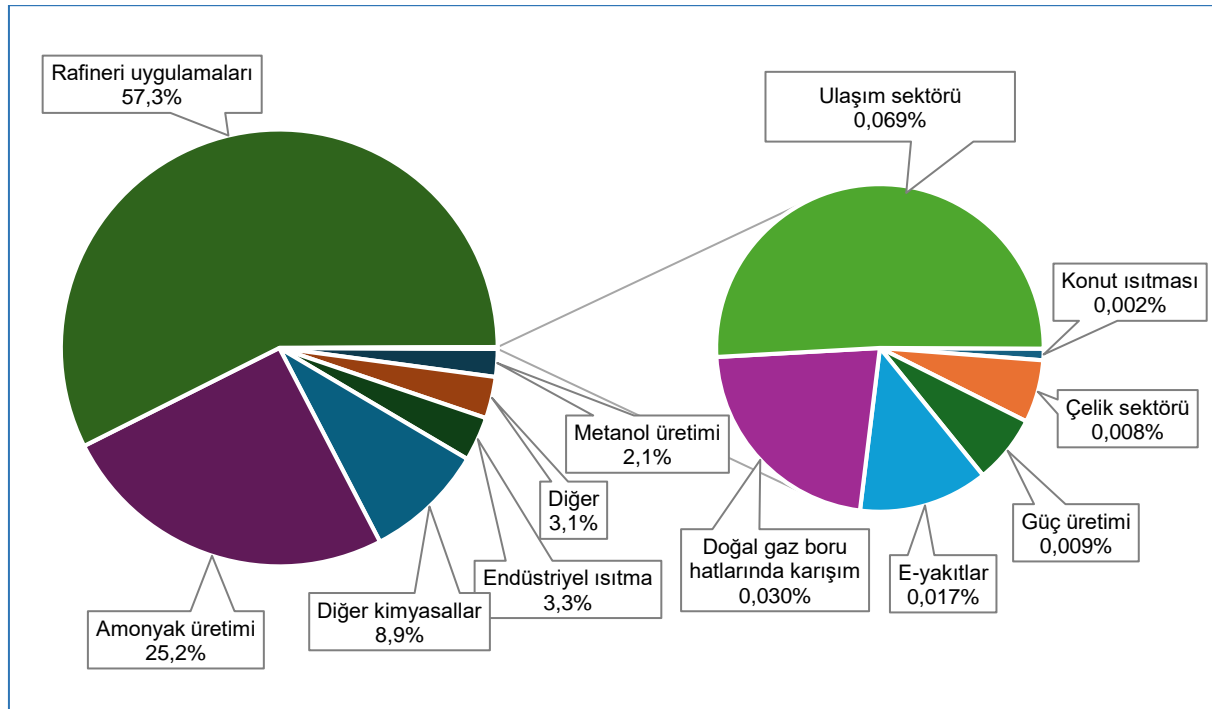
Şekil 70. Avrupa Ülkelerinin Yıllık Hidrojen Tüketim Miktarları, Veri Kaynağı: [137]

Avrupa'da hidrojenin tüketim alanlarına göre dağılımı incelendiğinde, kullanımın büyük ölçüde sanayi ve kimya sektörlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Sektörlere göre hidrojen tüketimi Şekil 71'de sunulmuştur. En fazla hidrojen tüketilen alan, yaklaşık 4,5 milyon tonla rafineri uygulamalarıdır. Bu alan, toplam hidrojen tüketiminin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Rafinerilerde hidrojen genellikle ham petrolün işlenmesinde ve kükürt giderme işlemlerinde kullanılmaktadır.



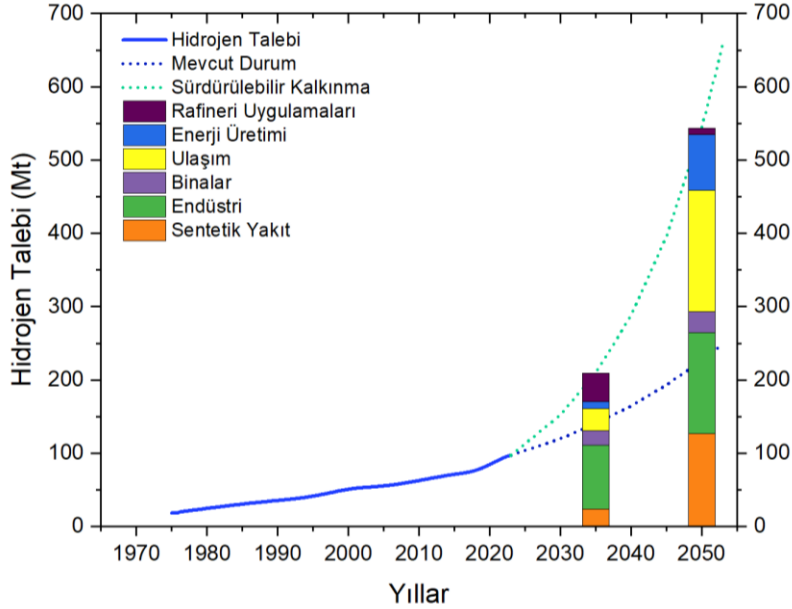
Şekil 71. Avrupa'da Sektör Bazında Hidrojen Tüketim Miktarları, Veri Kaynağı: [137]

Rafineri uygulamalarından sonra, 2 milyon tonun üzerinde tüketimle amonyak üretimi yer almaktadır. Amonyak, özellikle gübre endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır ve hidrojenin geleneksel ve büyük ölçekli kullanım alanlarından biridir. Diğer kimyasal türevlerinin üretimi için 704 bin ton hidrojen kullanılmaktadır. Bu kategori içinde plastik, ilaç ve sentetik malzeme üretiminde kullanılan kimyasallar yer almaktadır. Endüstriyel ısıtma ise yaklaşık 260 bin tonluk hidrojen tüketimi bildirilmiştir. Metanol için ise 163 bin tonluk hidrojene ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 72. Avrupa'da Sektör Bazında Hidrojen Tüketim Yüzdeleri, Veri Kaynağı: [137]

Bu alanlar hidrojen ihtiyacının büyük bir kısmını oluşturmakla birlikte, daha küçük hacimlerde hidrojenin kullanıldığı sektörler de bulunmaktadır. Şekil 72'de tüketim yüzdelere göre çeşitli alanlar sunulmuştur. Buna göre, hidrojen talebinin %5,2'lik bir kısmı e-yakıtlar, güç üretimi, ısıtma, çelik sektörü gibi alanlarda kullanılmaktadır. Önümüzdeki 20 yıllık süreçte bu alanların daha da gelişmesi beklenmektedir. Bu bağlamda yapılan projeksiyon çalışmalarından biri Şekil 73'te sunulmuştur. Buna göre küresel hidrojen talebinin sürdürülebilir kalkınma ile 2035 yılında 210 Mt, 2053 yılında ise 660 Mt seviyesine çıkması beklenmektedir. Avrupa için hidrojen talebinin 2030 yılında 20 Mt, 2050 yılında ise 95 Mt olması beklenmektedir [138].



Şekil 73. Yıllara Göre Küresel Hidrojen Talebi Ve Talep Projeksiyonları, Veri Kaynağı: [104] Ve [138]

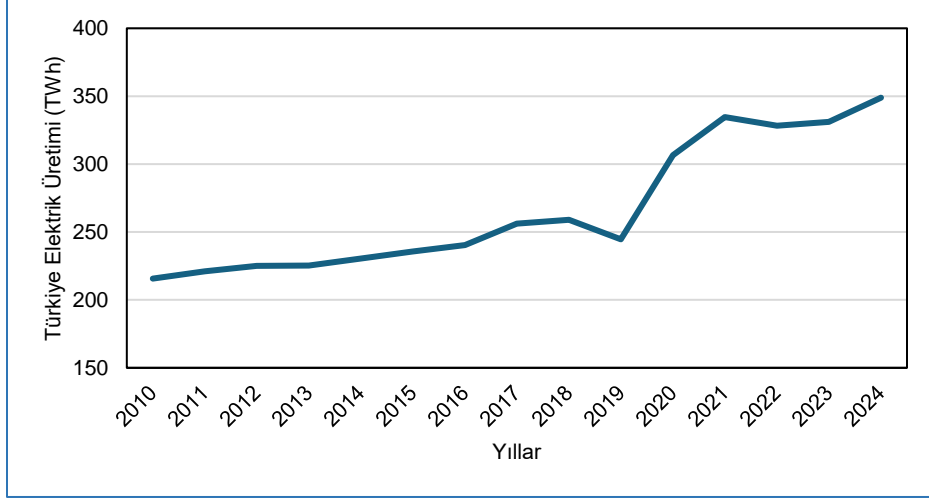
Genel olarak bakıldığında, Avrupa'da hidrojenin en çok kullanıldığı alanlar geleneksel sanayi ve kimya sektörleridir. Enerji üretimi, ulaşım ve ısıtma gibi gelecekte genişlemesi beklenen alanlardaki tüketim henüz düşük seviyededir. Bu durum, hidrojenin enerji dönüşümündeki rolünün artması için teknolojik gelişmelerin hızlanması, teşviklerin artırılması ve altyapı yatırımlarının yaygınlaştırılması gerektiğini göstermektedir. Özellikle yeşil hidrojen üretiminin yaygınlaştırılması, bu yeni kullanım alanlarının gelişimini destekleyecek ve hidrojenin düşük karbonlu bir enerji taşıyıcısı olarak Avrupa enerji sistemine entegrasyonunu hızlandıracaktır.

Avrupa ve dünyadaki hidrojen tüketim verileri, özellikle sanayi, kimya gibi sektörlerde yoğunlaşan yüksek talebin, yeşil hidrojen için büyük bir market sunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, güçlü yenilenebilir enerji kaynaklarına, stratejik coğrafi konuma ve gelişmiş sanayi altyapısına sahip olan Türkiye, yeşil hidrojen üretimi ve ihracatı açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Avrupa'nın özellikle rafineri, amonyak ve metanol üretimi gibi yüksek hacimli tüketim alanlarında fosil yakıtlara dayalı hidrojen kullanımını azaltma hedefi doğrultusunda, Türkiye temiz hidrojen tedarikçisi olarak bölgesel bir merkez haline gelebilir. Hem iç pazardaki sanayileşme sürecine katkı sağlamak hem de Avrupa'nın karbonsuzlaşma hedeflerine entegre olmak adına Türkiye'nin yeşil hidrojen yatırımlarına hız vermesi stratejik bir fırsat sunmaktadır.

5.2.3. Türkiye' deki Elektrik Üretimi

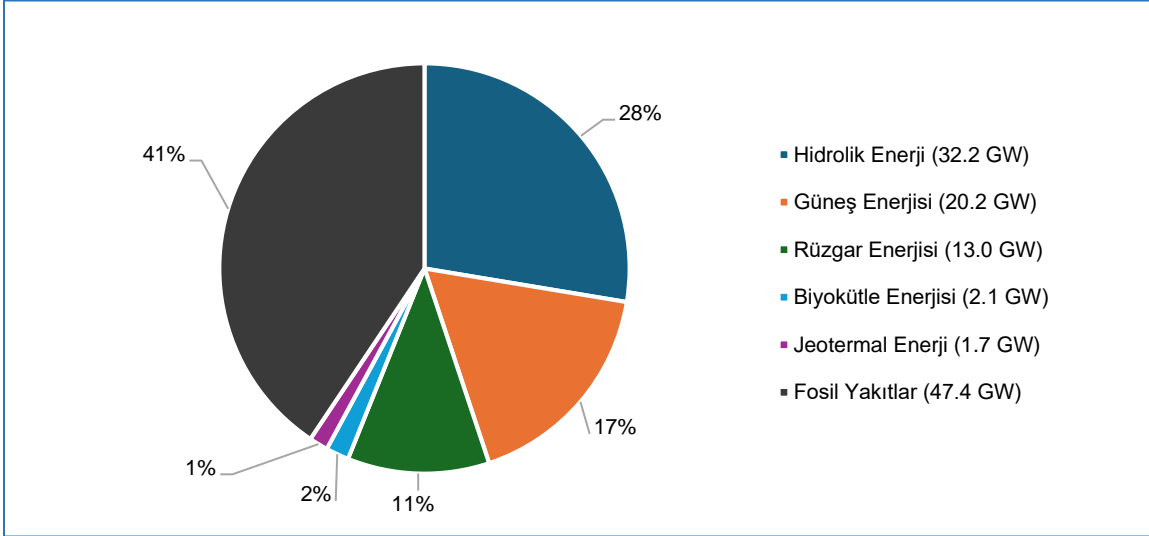
Elektrik üretimi 2010-2017 dönemde istikrarlı fakat sınırlı bir artış göstermiştir. Yaklaşık 210.000 GWh seviyelerinden başlayan üretim, 2017'de 260.000 GWh düzeyine ulaşmıştır. Bu artış,

Türkiye'nin enerji talebindeki artışa bağlı olarak yenilenebilir enerji santrallerinin devreye alınmasıyla açıklanabilir. 2018 Yılında hafif bir artış devam etmiş ancak 2019 yılında dikkat çekici bir düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş, Covid-19 pandemisinin beraberinde getirdiği ekonomik yavaşlamadan kaynaklanmaktadır. 2019'daki düşüşün ardından, 2020'de sert bir yükseliş başlamış ve üretim 300.000 GWh' nin üzerine çıkmıştır. Bu artış, Türkiye'nin enerji altyapısına yaptığı yatırımlar, yenilenebilir kaynak kullanımının yaygınlaşması ve pandeminin ilk etkilerinin ardından gelen toparlanmayla açıklanabilir. 2020-2023 döneminde ise üretim biraz yatay seyretmiş, artış hızında geçici bir yavaşlama olmuştur. 2024 yılı için ise tekrar bir artış eğilimi görülmektedir. Bu durum, Türkiye'nin enerji üretiminde yeniden büyüme dönemine girdiğini ya da yenilenebilir enerji projelerinin devreye alındığını gösterebilir. Türkiye' nin 2010-2024 yılları arasındaki elektrik üretimi TWh cinsinden Şekil 74'te belirtilmiştir.



Şekil 74. Türkiye Elektrik Üretimi, Veri Kaynağı: [139] Ve [140]

Türkiye Elektrik İletim AŞ (TEİAŞ) tarafından açıklanan 2025 verilerine göre Türkiye' nin toplam elektrik kurulu gücü 116 GW' a yükselmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları ise bu kurulu gücün yaklaşık 70 GW' ını oluşturmaktadır. Bu verilere göre yenilenebilir enerji kaynakları, toplam kurulu gücün yaklaşık %59' unu oluşturmaktadır. Elektrik enerjisi kaynaklarının toplam kurulu güç içerisindeki oranları Şekil 75'te belirtilmiştir.

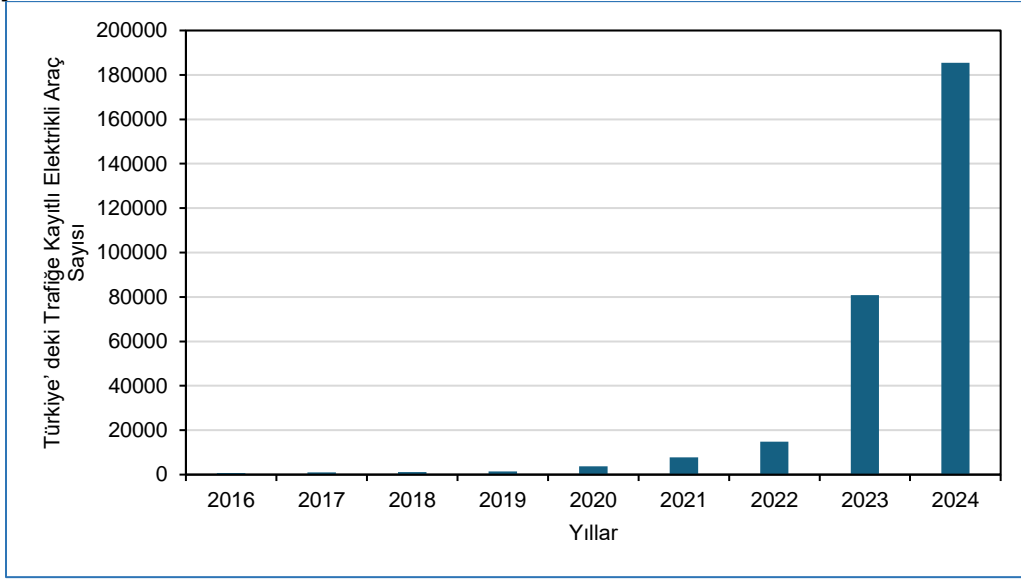


Şekil 75. Elektrik Enerjisi Kaynaklarının Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranları, Veri Kaynağı: [139]

Şekil 75'te görüldüğü üzere, 2025 yılının başındaki son istatistikler, Türkiye'deki elektriğin %41'inin fosil yakıtlardan üretildiğini göstermektedir. Karbonsuzlaşma senaryoları göz önüne alındığında, üretilen 47,4 GW elektrik, hidrojen gibi temiz enerji kaynaklarıyla değiştirilmelidir. Elektrik üretiminde hidrojenin katkısı, ülkenin orta ve uzun vadeli politikalarına bağlıdır. Hidrojen, elektrik üretimi için gaz türbinlerinde yakıt olarak veya elektrik üretimi için yakıt hücrelerinde kullanılabilir. Her iki durumda da bu durum hidrojen pazarını önemli ölçüde etkileyecektir.

5.2.4. Hidrojen Pazarında Elektrikli ve Hibrit Araçların Rolü

Türkiye'de trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı 2016–2020 döneminde oldukça sınırlı bir artış göstermişken, 2021'den itibaren ivme kazanmış, 2023 ve özellikle 2024 yılında adeta patlama yaşamıştır. 2024 yılı itibarıyla bu sayı 180.000'i aşmıştır. İlk olarak, dünya genelinde batarya maliyetlerinde yaşanan düşüş bu büyümenin temel itici gücüdür. 2010 yılında 1 kWh batarya üretim maliyeti yaklaşık 1100 ABD dolarıyken, bu rakam 2024 itibarıyla 100 doların altına gerilemiştir. Bu durum elektrikli araçların hem üretim hem de satış fiyatlarını ciddi biçimde düşürmüştür, Türkiye'de hem yerli hem de ithal elektrikli araçların daha erişilebilir hale gelmesini sağlamıştır. 2016-2024 Yılları arasında Türkiye' deki trafiğe kayıtlı elektrikli araç sayısı Şekil 76'da belirtilmiştir.



Şekil 76. Türkiye' deki Trafiğe Kayıtlı Elektrikli Araç Sayısı, Veri kaynağı: [141]

Öte yandan Türkiye'de şarj altyapısında da son yıllarda büyük ilerleme kaydedilmiştir. EPDK'nın lisans verdiği şarj operatörleri sayesinde, şehir içlerinde ve otoyollar boyunca hızlı şarj istasyonlarının yaygınlaşması sağlanmıştır. Bu gelişmeler, tüketicilerdeki "menzil kaygısını" azaltarak elektrikli araçların günlük kullanımda güvenilir bir alternatif haline gelmesine katkı sağlamıştır. Son olarak, Türkiye'nin yerli otomobil projesi olan TOGG' un 2023 yılında pazara sunulması, elektrikli araçlara yönelik farkındalık ve talebi önemli ölçüde artırmıştır. Yerli üretim algısı, devlet destekli tanıtım kampanyaları, ÖTV muafiyetleri gibi teşvikler ve düşük işletme maliyetleri sayesinde birçok tüketici ilk defa elektrikli araç satın alma yoluna gitmiştir.

Türkiye için yakıt hücreli elektrikli araçlara yönelik perspektif, hükümet politikalarına ve uluslararası ticarete bağlıdır. Örneğin, 5 milyon nüfusa ve toplam 3,37 milyon kayıtlı araca sahip Kanada'nın Alberta eyaletinde, eyaletin net sıfır hedeflerini karşılamak için 2035 yılına kadar yollarda 30.000

hidrojen yakıtlı araca ihtiyaç vardır [116]. Benzer şekilde, Türkiye için de yakın gelecekteki hidrojen ihtiyacı ve yaratılan pazar hakkında bir tahminde bulunulabilir [116].

5.2.5. Elektrolizör Teknolojisinin Market Üzerindeki Rolü

Elektrik bazlı hidrojen, elektrik kaynağından bağımsız olarak suyun elektrolizi yoluyla üretilen hidrojeni ifade etmektedir. Sudaki hidrojen ve oksijeni ayıran cihazlara ise elektrolizör denir. Elektrik bazlı hidrojen üretiminin tüm yaşam döngüsü sera gazı emisyonları ve elektriğin nasıl üretildiğine bağlıdır. Yenilenebilir hidrojen ise, suyun elektrolizi yoluyla ve yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrikle üretilen hidrojendir. Yenilenebilir hidrojen üretiminin tüm yaşam döngüsü boyunca sera gazı emisyonları sıfıra yakındır. Yenilenebilir hidrojen, sürdürülebilirlik gerekliliklerine uygun olması halinde biyogazın reformasyonu (doğal gaz yerine) veya biyokütlenin biyokimyasal dönüşümü yoluyla da üretilir [142].

Hızlanan sanayileşme, daha fazla araştırma faaliyetlerini de beraberinde getirmektedir. Araştırma hem yeni nesil teknolojilerin geliştirilmesinde hem de örneğin yakıt pili hücreleri ve elektroliz alanlarında üretimin ölçeklendirilmesinde önemli bir unsurdur. Sistem geliştirme planının bir parçası olarak, elektrik, gaz ve hidrojen için ortak gelecek senaryoları hazırlanmalıdır. Bundan türetilen basitleştirilmiş modelleme, daha sonra sistemdeki iyileştirme potansiyelini ve ilgili talebe dayalı şebeke geliştirme planlamasını belirlemek için temel sağlayabilecektir. Örneğin, elektrik şebekesindeki darboğazlar hidrojen şebekesine geçilerek ortadan kaldırılabilir veya elektrolizörler için uygun yerler belirlenebilir. Tüm bu hedeflerin gerçekleştirilebilmesi için elektrolizörlerin maliyetlerinin düşürülüp verimlerinin yükseltilmesi gerekmektedir. Elektrolizörler çalışma prensiplerine ve çalıştıkları ortam sıcaklıklarına göre çeşitlilik göstermektedir. Alkali elektrolizörler, proton değişim membran elektrolizörler ve anyon değişim membran elektrolizörler ambiyans sıcaklığında çalışan elektrolizörlerdir. Katı oksit elektrolizör ve proton iletken seramik elektrolizörler ise yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır [180].

En yaygın olarak kullanılan elektrolizörlerden ilki alkali elektrolizörlerdir. Yapısında sıvı elektrolitler bulunduran alkali elektrolizörler, 70-90 °C sıcaklık aralığında çalışmaktadır. Alkali elektrolizörlerin en büyük avantajlarının biri, yapısında platinyum gibi pahalı metaller bulundurmamasıdır. Bu sayede diğer elektrolizörlere kıyasla düşük yatırım maliyeti gerektirmektedir. Ancak operasyon esnasında kararlı hale ulaşmaları uzun sürmektedir. Bu da alkali elektrolizörlerin yenilenebilir enerji kaynaklarına entegresini zorlaştırmaktadır. Proton değişim membran elektrolizörler de alkali elektrolizörler gibi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Dinamik çalışma koşullarında yüksek performans göstermesi sebebiyle yenilenebilir enerji entegreli sistemlerde tercih edilmektedir. 50-80 °C aralığında yüksek verimlerde çalışan proton değişim membran elektrolizörlerin en büyük dezavantajı maliyetidir. Katalizör olarak platinyum grup metalleri içermesi sebebiyle yüksek yatırım maliyetlerine sahiptir. Anyon değişim membran elektrolizörler ise yakın zamanda en fazla araştırma-geliştirme yapılan elektrolizör tipidir. Alkali elektrolizörler ile proton değişim membran elektrolizörlerin avantajlı yanlarını barındıran anyon değişim membran elektrolizörler hem maliyet açısından uygun hem de yenilenebilir enerji entegrasyonuna müsaittir. Genellikle 40-60 °C sıcaklık aralığında çalışan bu elektrolizörlerin en büyük dezavantajı kimyasal olarak stabil olmamasıdır. Bu da anyon değişim membran elektrolizörlerinin uzun süreli kullanımını kısıtlamaktadır. Yüksek sıcaklıkta çalışan elektrolizörlerde ise katı oksit elektrolizörler ön plana çıkmaktadır. Çalışma esnasında 700-850 °C sıcaklığına ulaşan katı oksit elektrolizörler yüksek akım yoğunluğu ve yüksek verimle çalışmaktadır. Katı oksit elektrolizörler gerektiğinde yakıt pili hücresi olarak da çalışma kabiliyetine sahiptir. En önemli dezavantajı ise yüksek sıcaklıklar sebebiyle termomekanik özelliklerinin uzun süreli kullanıma elverişli olmamasıdır. Son olarak proton iletken seramik elektrolizörler, 300-600 °C sıcaklık aralığında çalışan ve seramik elektrolite sahip elektrolizörlerdir. Proton iletken seramik elektrolizörlerin en büyük avantajı ürettiği hidrojenin saf olmasıdır. Yüksek

sıcaklıklarda çalışması sebebiyle yüksek verimlere sahip olan bu elektrolizör çeşidinin en büyük dezavantajı ise olduğu malzemelerin üretim zorluğudur. İnce ve aynı zamanda yoğun elektrolit üretimindeki zorluklar ve termomekanik özelliklerinin düşük olması sebebiyle proton iletken seramik elektrolizörler üzerine araştırma çalışmaları yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Yeşil hidrojenin maliyetlerinin düşürülmesinde iki büyük aktör bulunmaktadır. Bunlardan ilki elektrolizörün beslediği temiz enerjinin maliyetidir. Yenilenebilir enerji üretim kapasitelerinin artması ve maliyetlerin düşüşü hidrojen marketi üzerinde olumlu bir etki yaratacaktır. Hidrojen maliyeti üzerindeki diğer büyük aktör ise elektrolizörlerin gelişmişlik seviyesidir. Elektrolizörlerin tasarımlarındaki optimizasyon, yüksek kapasitelerde verim artışı, yenilenebilir enerji entegrasyonundaki iyileştirmeler ve malzemelerin dayanımlarının artırılması, hidrojen marketini doğrudan etkileyecek ve hidrojenin daha ulaşılabilir olmasını sağlayacaktır.

5.2.6. Market Güvenilirliği

Hidrojen pazarının güvenliği, hidrojenin ülke genelinde gelişimini ve kabulünü etkileyen kritik bir husustur. Hidrojen piyasaları genellikle güvenlik standartlarını içeren karmaşık düzenlemeler altında faaliyet göstermektedir. Örneğin, İngiltere'deki 1996 tarihli Gaz Güvenliği Yönetmeliği şu anda gaz şebekelerindeki hidrojen içeriğini hacimsel olarak %0,1 ile sınırlamaktadır [121]. Bu yönetmelik, mevcut gaz altyapısında güvenliğin sağlanması için çok önemlidir. Güvenlik endişeleri hidrojen piyasasındaki yatırımcı belirsizliğine katkıda bulunmaktadır. Hem üretim hem de talep tarafları, güvenlik standartlarını karşılayan destekleyici altyapı ihtiyacının yanı sıra zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Hidrojen için yeni pazarların önünü açmak için mevzuat değişiklikleri gerekli olabilir. Bu, belirli alanlarda hidrojeni kullanan cihazların zorunlu kılınmasını ve düşük karbonlu hidrojen kullanımını sınırlayan engellerin ele alınmasını içerir. Bu sebeple hidrojen güvenliği konusunda farkındalık yaratmak ve potansiyel kullanıcıların katılımını sağlamak, pazarın büyümesi için kritik öneme sahiptir.

5.2.7. Politikaların ve Mevzuatların Piyasalar Üzerindeki Rolü

Hidrojen stratejisini etkin bir şekilde hızlandırmak için, hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesini ve yaygınlaştırılmasını destekleyen politika ve düzenlemelerin şekillendirilmesi şarttır. Açık ve destekleyici mevzuat çerçevelerin geliştirilmesi çok önemlidir. Bu mevzuatlar, mevcut düzenlemelerin hidrojene ve hidrojenin enerji sistemine entegrasyonuna nasıl uyarlanabileceğini de belirlemelidir. Hidrojen üretimi ve altyapısına yatırımı teşvik eden politikaların da uygulanması hayati önem taşımaktadır. Örneğin, Birleşik Krallık hükümeti, pazarın büyümesini teşvik etmeye yardımcı olacak erken hidrojen üretim projelerine ortak yatırım yapmak için 240 milyon sterlinlik Net Sıfır Hidrojen Fonu'nu başlatmayı planlamaktadır [121]. Hidrojen için yeni pazarların kilidini açabilecek mevzuat değişikliklerini belirlemek için teknoloji sağlayıcıları, enerji şirketleri ve düzenleyiciler de dâhil olmak üzere sektör paydaşlarıyla iş birliği yapılması gerekmektedir. Bu katılım, politikaların pratik ve etkili olması için son derece önemli bir faktördür.

Hidrojen teknolojilerinin yaygın bir şekilde benimsenmesi için tüketici kabulünün oluşturulması şarttır. Bu, hidrojenin uygulanabilir bir enerji kaynağı olarak olumlu bir algının geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Benzer şekilde hidrojenin faydaları ve güvenliği hakkında kamuoyu bilinçlendirme kampanyaları ve eğitimler bu sürecin benimsenmesi için faydalı olacaktır. Hidrojen Düzenleyicileri Forumu gibi platformların oluşturulması düzenleyiciler, endüstri ve hükümet arasında sürekli diyalogu kolaylaştıracaktır. Bu forum, düzenleyici zorlukların ele alınmasına ve hidrojenin yaygınlaştırılması için en iyi fikirlerin paylaşılmasına yardımcı olacaktır. Politikalar, hidrojen bazlı cihazların ve altyapının geliştirilmesi de dâhil olmak üzere hidrojen teknolojilerinde inovasyonu teşvik etmelidir. Bu, düşük karbonlu hidrojen çözümlerini ilerletmeyi amaçlayan finansman destekleri ve hibeler yoluyla desteklenebilir.

5.2.8. Güney Marmara Bölgesi İçin Piyasa Odaklı Sonuçlar ve Gelecek Perspektifi

Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecinde hidrojen stratejik olarak önemlidir. Bu bağlamda, Güney Marmara bölgesi, hidrojen vadisi kurulumu için hem coğrafi hem de ekonomik açıdan dikkate değer fırsatlar sunmaktadır. Lojistik altyapı, nitelikli iş gücü, yatırım teşvikleri ve bölgesel kalkınma potansiyeli gibi faktörler, bu illeri temiz hidrojen ekosistemi için ideal bir konum haline getirmektedir. Bu bölümde Güney Marmara'da hidrojen vadisi kurulmasının kısa ve uzun vadeli finansal uygulanabilirliği detaylı şekilde ele alınmaktadır.

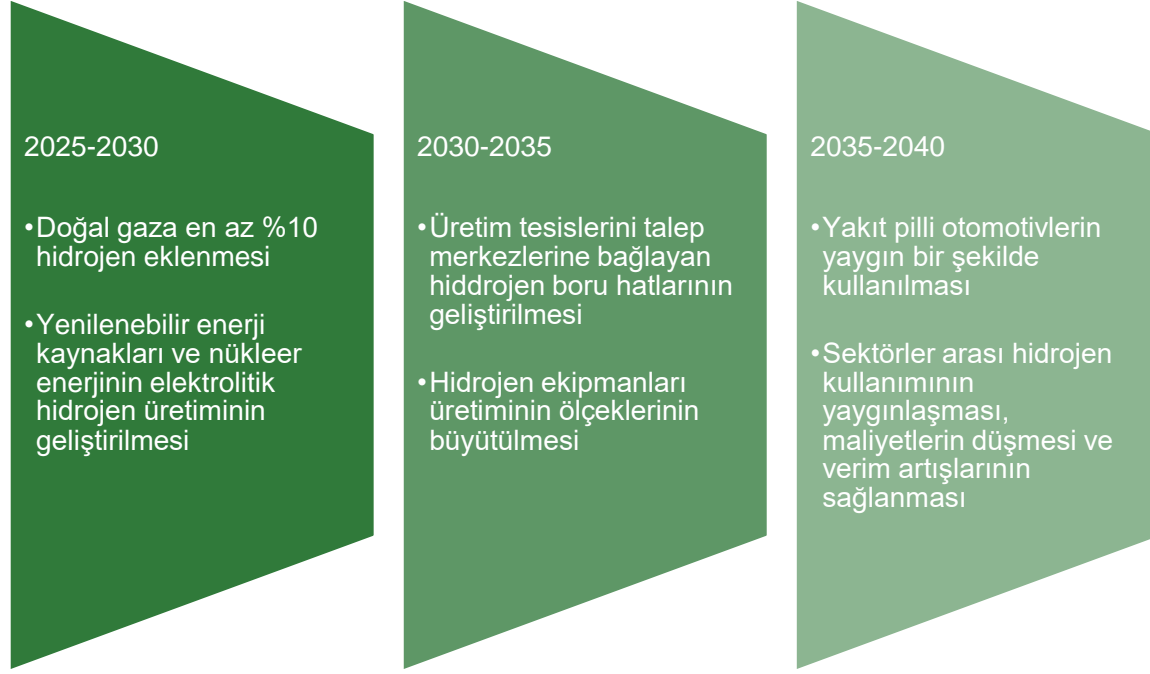
Kısa Vadeli

Çanakkale veya Balıkesir'de bir hidrojen vadisi kurmak, uygulanabilirliğini ve yatırımcılar için çekiciliğini etkileyebilecek çeşitli finansal faktörler sunmaktadır. Çanakkale ve Balıkesir'in stratejik konumu, hidrojen enerjisi için önemli pazarlar olan İstanbul, İzmir ve Bursa gibi büyük şehirlere kolay erişim sağlamaktadır. Çanakkale 1915 Köprüsü ve bağlantı yollarının tamamlanması, erişilebilirliği daha da artıracak ve bu şehir merkezlerinde temiz bir enerji kaynağı olarak hidrojene olan talebi potansiyel olarak artıracaktır. Çanakkale Havaalanı ve İÇDAŞ 2 Limanı da dâhil olmak üzere mevcut altyapı, bir hidrojen merkezi için lojistik ve ulaşım ihtiyaçlarını desteklemektedir. Havalimanının terminali ve liman tesisleri, gerekli malzemelerin ithalatını ve hidrojen ürünlerinin ihracatını kolaylaştırabilir, bu da operasyonel verimlilik için çok önemlidir. Türkiye, hidrojen de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji sektörlerindeki yatırımlar için çeşitli teşvikler sunmaktadır.

Çanakkale ve Balıkesir, hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi ve sürdürülmesi için gerekli olan vasıflı işgücüne sahiptir. Eğitimli personelin mevcudiyeti, işgücü maliyetlerini düşürecektir ve üretkenliği artırarak merkezi mali açıdan daha uygulanabilir hale getirecektir. Temiz bir enerji kaynağı olarak hidrojene yönelik küresel ilgi arttıkça, Güney Marmara kendisini hidrojen pazarında kilit bir oyuncu olarak konumlandırabilir. Sürdürülebilir enerji çözümlerine yönelik yerel talep, daha büyük pazarlara ihracat potansiyeli ile birleştiğinde merkez için sağlam bir gelir akışı yaratabilir. Sürdürülebilir ve çevre dostu yatırımlara odaklanma, karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik küresel eğilimlerle uyumludur. Bu durum, çevreye duyarlı yatırımcıları ve tüketicileri çekerek hidrojen merkezinin finansal beklentilerini daha da artırabilir.

Uzun Vadeli

Başta hidrojen olmak üzere yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik küresel değişimin artarak devam etmesi beklenmektedir. Ülkeler karbon emisyonlarını azaltmayı taahhüt ettikçe, temiz bir enerji alternatifi olarak hidrojene olan talep de artacaktır. Çanakkale ve Balıkesir, kendisini bölgede önemli bir tedarikçi olarak konumlandırarak bu eğilimden faydalanabilir ve potansiyel olarak hem yerel hem de uluslararası pazarlardan uzun vadeli gelir artışı sağlayabilir [143]. Hidrojen üretim, depolama ve dağıtım teknolojilerindeki sürekli ilerlemeler hidrojen üretimiyle ilgili verimliliği artırabilir ve maliyetleri düşürebilir. Çanakkale ve Balıkesir'de araştırma ve geliştirmeye yatırım yapmak, operasyonel verimliliği artıran ve uzun vadeli maliyetleri düşüren yeniliklere yol açarak merkezi pazarda daha rekabetçi hale getirebilir. Bunun yanı sıra Türkiye, hidrojen de dahil olmak üzere yenilenebilir enerji girişimlerini giderek daha fazla desteklemektedir. Yeşil enerjiyi teşvik etmeyi amaçlayan uzun vadeli politikalar, hidrojen merkezi için işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltabilecek mali teşvikler, sübvansiyonlar ve hibeler sağlayabilir. Bu destek, uzun vadede yatırımcılar için istikrarlı bir finansal ortam yaratabilir. Türkiye' nin hidrojen ekonomisi yol haritası Şekil 77'de belirtilmiştir.



Şekil 77. Türkiye'nin Hidrojen Ekonomisi Yol Haritası, Görsel Kaynağı: [144]

Hidrojen pazarı büyüdükçe boru hatları, depolama tesisleri ve dağıtım ağları da dâhil olmak üzere genişletilmiş altyapıya ihtiyaç duyulacaktır. Çanakkale ve Balıkesir başta olmak üzere bölgenin mevcut altyapısı bu ihtiyaçları karşılayacak şekilde geliştirilebilir, bu da yatırım fırsatlarının artmasına ve özel sektör ve kamu sektörüyle ortaklıklar kurulmasına yol açarak merkezin finansal uygulanabilirliğini artırabilir. Küresel çapta daha katı çevre düzenlemeleri, daha temiz enerji kaynaklarına olan talebi de artıracaktır. Çanakkale ve Balıkesir'deki hidrojen merkezi, işletmeler ve endüstriler hidrojene geçiş yaparak çevre standartlarına uyum sağlamaya çalıştıkça bu düzenlemelerden faydalanabilir. Bu değişim, merkezin ürün ve hizmetleri için istikrarlı bir müşteri tabanı oluşturabilir. Bir hidrojen merkezinin kurulması, istihdam yaratarak ve ilgili endüstrileri çekerek yerel ekonomik büyümeyi teşvik edebilir. Bu ekonomik gelişme, yerel yatırımların ve tüketici harcamalarının artmasına yol açarak Marmara bölgesinin finansal başarısını daha da iyileştirebilir. Üniversiteler, araştırma kurumları ve özel şirketlerle stratejik ortaklıklar kurmak inovasyonu teşvik edebilir ve ek finansman kaynaklarına erişim sağlayabilir. İş birlikleri merkezin kabiliyetlerini ve pazar erişimini artırarak uzun vadeli sürdürülebilirlik ve kârlılık sağlayabilir.

5.2.9. Kapanış

Artan karbonsuzlaşma ihtiyacı ve sürdürülebilir enerjiye geçiş nedeniyle, amonyak ve yeşil metanol de dâhil olmak üzere temiz hidrojen ve türevlerine yönelik küresel pazarın önümüzdeki yıllarda önemli ölçüde artması beklenmektedir. Global ölçekte, yenilenebilir enerji kullanılarak üretilen hidrojene odaklanan bir alt küme olan yeşil hidrojen pazarı, 2021 yılında yaklaşık 0,8 milyar dolar değerindeydi ve 2028 yılına kadar yaklaşık %55,2 gibi çok yüksek bir yıllık bileşik büyüme oranı sergileyerek yaklaşık 10,2 milyara ulaşması beklenmektedir [145].

Temiz hidrojene geçiş için giderek artan düzenlemeler göz önüne alındığında, Güney Marmara bölgesindeki yüksek güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli, hidrojen vadisinin kurulması ve hidrojen ekonomisinin gelişimi için büyük avantajlardır. Kısa vadede, yeşil hidrojen üretimi pahalı olmaya devam edecektir. Bunun sebebi sıvılaştırma, sıkıştırma ve dönüştürme proseslerindeki kayıplar ve dağıtımla ilgili maliyetlerin yüksek olmasıdır. Ancak bu bölümde bahsedilen Güney Marmara

Bölgesinin beraberinde getirdiği avantajlardan faydalanılarak hidrojen dönüşümü çok daha hızlı bir biçimde gerçekleştirilebilir.

5.3. TR22 Güney Marmara Bölgesi için Hidrojen Üretim ve Dağıtım Üssü İş Modeli

5.3.1. Mevcut Durum Analizi ve Pazar İhtiyaçları

a) Küresel ve Ulusal Hidrojen Gündemi

Küresel enerji dönüşümü kapsamında yeşil hidrojen (yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojen) kritik bir rol oynamaktadır. Birçok ülke iklim hedeflerine ulaşmak için hidrojen stratejileri açıklamış, 2030-2050 dönemine yönelik elektroliz kapasitesi ve tüketim hedefleri belirlemiştir. Örneğin Avrupa Birliği (AB), 2030 yılına kadar 10 milyon ton yenilenebilir hidrojen üretme ve ek 10 milyon ton da ithal etme hedefini ortaya koymuştur [1]. Bu hedef doğrultusunda AB, hidrojenin taşınması, sertifikasyon ve altyapı yatırımları için yeni düzenlemeler getirmekte ve REPowerEU planıyla 2030'a kadar 500 TWh yenilenebilir elektriği hidrojen üretimine tahsis etmeyi öngörmektedir [146]. Avrupa'da özellikle Almanya ve Hollanda gibi sanayisi gelişmiş ülkeler, uzun vadede iç talebin önemli bir kısmını ithalatla karşılamak durumunda kalacaklarını öngörmektedir. Nitekim Almanya'da yapılan araştırmalar, 2050'de hidrojen talebinin 800 TWh düzeyine çıkabileceğini ve 80 GW elektroliz kapasitesi kurulsu dahi talebin ancak bir kısmının iç üretimle sağlanabileceğini ortaya koymuştur [147]. Almanya'nın güncellenen hidrojen stratejisinde 2030 için 10 GW elektroliz kapasitesi hedeflenirken, bu kapasitenin ülkenin ihtiyacının ancak %50-70'ini karşılayabileceği, kalan kısmın ithal edilmesi gerekeceği belirtilmiştir [147]. Dolayısıyla uluslararası hidrojen ticareti ve iş birlikleri, küresel hidrojen ekonomisinin gelişimi için zorunlu görülmektedir [2].

Türkiye, 2053 için karbon nötr olma hedefini ilan etmiş ve Paris Anlaşması'nı onaylayarak daha iddialı bir enerji dönüşüm stratejisi hazırlığına başlamıştır. Bu çerçevede hidrojen, Türkiye'nin uzun vadeli enerji geçişi ve iklim stratejisinde önemli bir yer tutmaya adaydır. Bu kapsamda 2023 yılında "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından olarak yayımlanmıştır. Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası raporu, hidrojen ekonomisinde Türkiye'nin somut hedeflerini, bu alandaki ihtiyaçlarını ve bu ihtiyaçlara yönelik çözümleri ortaya koymaktadır. Raporda, yeşil hidrojen üretim maliyetini 2035 yılına kadar hidrojenin kilogramı başına 2,4 ABD dolarının altına (2053 itibarıyla 1,2 ABD dolarının altına) düşürmek ve elektrolizör kurulu güç kapasitesini 2030'da 2 GW, 2035'te 5 GW, 2053'te 70 GW seviyesine çıkarmak gibi hedefler belirtilmiştir. Ayrıca Türkiye'nin hidrojen teknolojileri alanında yerli teknoloji geliştirme, altyapı kurma, mevzuatı iyileştirme ve nitelikli insan kaynağı oluşturma gibi kritik ihtiyaçları vurgulanmıştır. Fakat bu ihtiyaçların karşılanması için çözüm önerilerinin daha detaylı incelenmesi, çeşitli kurumlar ve çalışma grupları ile kapsamlı politika önerileri geliştirilmesi ve bu sebeple daha kapsamlı bir yol haritasının hazırlanması gerekmektedir. Bir çalışmada, Türkiye'de 2050'ye dek yenilenebilir elektrikten üretilebilecek toplam yeşil hidrojen miktarı ve potansiyel ihracat imkânları analiz edilmiştir. Bu çalışmaya göre Türkiye, 2050 yılında iç talebini karşıladıktan sonra yıllık 1,5-1,9 milyon ton yeşil hidrojen ihraç edebilecek potansiyele sahiptir [148]. Bunu gerçekleştirmek için 2050'ye kadar her yıl ortalama 3-4 milyar dolar yatırım yapılması gerekebileceği hesaplanmıştır [3]. Bu ölçekli bir yatırımın 2050 itibarıyla ülke ekonomisine 6-8 milyar dolar yıllık brüt katma değer yaratacağı öngörülmektedir [148].

Türkiye'de halihazırda hidrojen üretimi büyük ölçüde fosil yakıtlara dayalı (örneğin rafineri ve gübre sektörlerinde gri hidrojen) olup, yeşil hidrojen üretimi ise henüz pilot ölçeklerde. Ancak son yıllarda önemli pilot projeler devreye alınmaya başlanmıştır. 2023 yılı itibarıyla Türkiye'nin ilk Yeşil Hidrojen Vadisi projesi (HYSouthMarmara) Güney Marmara'da hayata geçmiştir. 5 yıl sürecek bu proje, AB'nin Ufuk Avrupa Clean Hydrogen Partnership programından 8 milyon € hibe alarak 36,8 milyon € bütçe ile başlamıştır [4]. Proje kapsamında Balıkesir'de Enerjisa Üretim'e ait bir sahada yılda en az 500 ton yeşil hidrojen üretilecek, üretilen hidrojen Linde Gaz tarafından taşınarak bölgedeki Hidrojen Peroksit, Kale Seramik, Şişecam ve Eti Maden tesislerinde sanayide yakıt ve

hammadde olarak kullanılacaktır [149]. Bu proje ile Güney Marmara, Türkiye'nin 2053 net-sıfır hedefi yolunda öncü bir bölge olmayı ve aynı zamanda Avrupa'ya hidrojen ve türevleri ihracatında önde gelen bir üs haline gelmeyi hedeflemektedir [149]. Proje, yeşil metanol ve amonyak gibi Türkiye'nin hâlihazırda ithal ettiği hidrojen türevlerinin yerli ve yenilenebilir kaynaklarla üretilmesini de planlamakta, ayrıca bor minerallerinin hidrojen depolamada kullanılmasına yönelik olarak Türkiye'nin ilk Sodyum Borhidrür tesisinin Balıkesir'de kurulmasını öngörmektedir [149]. Dünya bor rezervlerinin %73'üne sahip olan Türkiye'nin bor kimyasalları aracılığıyla hidrojen ekonomisinde önemli bir yere sahip olması amaçlanmaktadır [149].

Yukarıdaki gelişmeler, Türkiye'de hidrojen alanında kamu, özel sektör ve uluslararası işbirliğiyle artan bir ivme yakalandığını göstermektedir. Ancak halen teknoloji, ölçek ve maliyet açısından başlangıç aşamasındadır. Bu nedenle, mevcut durum analizinde teknolojik gelişmeler ve piyasa ihtiyaçları değerlendirildikten sonra TR22 özelinde fırsatlar incelenmiştir.

b) TR22 (Güney Marmara) Bölgesinin Mevcut Durumu (Enerji Altyapısı, Ulaşım ve Sanayi) ve Pazar İhtiyaçları

TR22 Güney Marmara Bölgesi (Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan bölge), yenilenebilir enerji üretim kapasitesi ve sanayi altyapısıyla, bir hidrojen üretim-dağıtım üssü için doğal bir aday konumundadır. Bölge enerji ve lojistik altyapısı açısından hidrojen değeri zincirini geliştirmek için bir dizi avantaja sahiptir ve bunlar aşağıda özetlenmiştir.

Yenilenebilir Enerji Potansiyeli: TR22, Türkiye'nin rüzgâr enerjisi kurulu gücünde lider konumdadır. Bölge, Türkiye toplam rüzgâr kurulu gücünün %20'den fazlasını barındırmakta ve 3 GW'a yaklaşan yenilenebilir kapasitesiyle ülkenin elektrik üretiminin %13'ünü sağlamaktadır [149]. Özellikle Balıkesir çevresinde yoğunlaşan rüzgâr santrallerine ek olarak, Çanakkale'de de güçlü rüzgâr koridorları bulunmaktadır. Güneş enerjisi potansiyeli olarak da Ege'ye yakın konumu sayesinde yıllık güneşlenme süresi iyi seviyededir. Bu yüksek yenilenebilir kaynak potansiyeli, yeşil hidrojen üretimi için düşük maliyetli elektrik kaynağı oluşturabilir.

Mevcut Enerji Altyapısı: Bölgede Bandırma'da doğalgaz çevrim santralleri ve Çan'da termik santral bulunmaktadır. Doğalgaz iletim hattı bölgeye kadar uzanmakta ve şehir dağıtım şebekeleri Balıkesir ve Çanakkale'de yaygındır. Bu altyapı, ileride hidrojenin doğalgaz şebekesine karıştırılması (blending) gibi uygulamalar veya mevcut boru hatlarının hidrojen taşımaya uyarlanması için bir temel sağlayabilir. Ayrıca Bandırma'da BOTAŞ'a ait LNG terminali ve depolama tesisleri bulunmaktadır. LNG tesisleri ileride sıvı hidrojen veya amonyak gibi yakıtların depolanmasında dönüşüme uğrayabilir.

Ulaşım ve Lojistik: TR22 bölgesi coğrafi olarak stratejik bir konumdadır. Çanakkale Boğazı ile Akdeniz ve Ege'den Karadeniz ve Marmara'ya deniz geçişini kontrol eden bir noktadadır. 2022'de hizmete giren 1915 Çanakkale Köprüsü ile Avrupa (Trakya) yakasına karayolu bağlantısı güçlenmiştir. Balıkesir, İstanbul-İzmir otoyolu üzerinde yer alarak batıdaki büyük endüstri merkezlerine karayolu ile erişimi kolaylaştırır. Bandırma Limanı, Marmara Denizi'nde önemli bir yük ve feribot limanıdır ve demiryolu bağlantısı da bulunan liman, bölgedeki ürünlerin (örneğin bor mineralleri, sanayi ürünleri) ulusal ve uluslararası pazarlara sevkiyatında kullanılmaktadır. Çanakkale'de Kepez Limanı ve çevresinde daha küçük ölçekli limanlar vardır. Denizyolu erişimi, özellikle yeşil hidrojenin *amonyak*, *metanol* gibi türevler şeklinde ihraç edilmesi için kritik bir avantajdır. Bölge, Rotterdam veya Hamburg gibi Avrupa'nın kuzey limanlarına deniz yoluyla ulaşmak için Akdeniz üzerinden Süveyş'e gitme zorunluluğu olmadan, Cebelitarık rotası üzerinden bağlantı kurabilir – bu mesafe Kuzey Afrika veya Orta Doğu'dan gelen rotalara benzer mesafededir.

Sanayi Yapısı: Güney Marmara, farklı sanayi kollarını barındıran bir bölgedir. Balıkesir’de kimya, seramik, cam, gıda işleme gibi sektörler mevcuttur. Örneğin Bandırma’da Eti Maden işletmelerine ait Bor ve Borik Asit tesisleri bulunmaktadır ve bu tesisler bor türevleri üretiminde hidrojen kullanımı (sodyum borhidrür gibi) için pilot projelere ev sahipliği yapabilecektir [149]. Çanakkale büyük ölçekli seramik fabrikalarına sahiptir ve seramik fırınlarında ileride doğal gaz yerine hidrojen kullanımı değerlendirilebilir. Şişecam’ın bölgede cam üretim tesisleri mevcut olup, cam eritme fırınlarında hidrojen karışım yakıt testleri planlanabilir. Ayrıca Bandırma Eti Gübre gibi gübre fabrikaları geçmişte faaliyet göstermiş, gübre üretimi (amonyak) doğrudan hidrojen talebi yaratabilecek potansiyel bir sektördür. Çanakkale’de demir-çelik üretimi ölçeği sınırlı olsa da yakın çevrede (Biga yöresi) bir entegre çimento fabrikası ve çeşitli maden işletmeleri vardır. Bu sanayi çeşitliliği, bölgenin hidrojeni doğrudan kullanabilecek bir müşteri tabanına sahip olduğunu göstermektedir. Hidrojen, bu sektörlerde fosil yakıtların yerini alarak karbonsuzlaşma sağlayabilir ve böylece bu işletmelerin Avrupa Yeşil Mutabakatı ve sınırda karbon vergisi gibi uygulamalara uyumunu kolaylaştırır.

Özetle, TR22 bölgesi güçlü yenilenebilir enerji kaynakları, uygun coğrafi konum, mevcut enerji-lojistik altyapı ve hidrojen kullanabilecek çeşitli sanayi tesisleriyle bir hidrojen üretim ve dağıtım merkezi olmaya elverişli bir konumdadır. Mevcut durumda bölgede başlayan hidrojen pilot uygulamaları (yeşil hidrojen vadisi projesi gibi) bu potansiyelin ilk adımlarıdır. Devamında, pazara erişim ve iş birliği boyutlarının doğru kurgulanması halinde TR22, hem komşu bölgelere hem de uluslararası piyasalara hidrojen sağlayan bir hub haline gelebilir.

c) Pazar İhtiyaçları

Hidrojen pazar ihtiyacı, hem **yerel/ulusal talep** hem de **uluslararası (ihracat) talep** boyutunda değerlendirilmiştir ve detaylar aşağıda verilmiştir.

Yurtiçi Pazar İhtiyacı: Türkiye’nin sanayi, ulaştırma ve enerji sektörlerinde hidrojen talebi orta vadede oluşmaya başlayacaktır. Özellikle gübre (amonyak) üretimi, petrokimya, petrol rafinerileri, demir-çelik (doğrudan indirgeme için hidrojen kullanımı) ve cam-seramik-çimento gibi yüksek ısı gerektiren sektörler, karbon nötr hedefler kapsamında hidrojen kullanımı değerlendiren sektörlerdir. Yapılan bir projeksiyona göre, 2030’da Türkiye’nin yeşil hidrojen talebi 1-1,5 milyon ton/yıl mertebesine ulaşabilir ve 2050’de ise 2-2,5 milyon ton seviyelerine görebilir [150]. Bu talebin önemli bir kısmı Marmara ve Ege bölgesindeki ağır sanayi kümelerinden gelebilir. TR22’nin çevresindeki TR41 (Bursa/Eskişehir), TR42 (Kocaeli/Sakarya) ve TR10 (İstanbul) bölgeleri, Türkiye’nin sanayi üretiminin ve enerji tüketiminin kalbidir. Örneğin Kocaeli’nde TÜPRAŞ’ın rafinerisi, hali hazırda günlük yüzlerce ton hidrojeni fosil yakıtlardan üretilen proseslerinde kullanmaktadır. İlerleyen dönemde TÜPRAŞ, hidrojenini yeşil kaynaklardan temin etmeyi planladığını açıklamıştır. Bu gibi büyük tüketiciler, TR22’de üretilecek yeşil hidrojen veya türevleri için potansiyel müşterilerdir. Ayrıca ulaşım sektöründe, Marmara Bölgesi’nde planlanan hidrojenle çalışan otobüs filoları, forklift ve araç projeleri küçük de olsa bir talep başlatacaktır. Elektrik üretiminde hidrojen talebi ise daha uzun vadede (örneğin gaz santrallerinde hidrojen karışımı) gündeme gelebilir. Bütün bu alanlarda, yerli üretimin gelişmesi için talep garantileri veya teşvikler kritik olacaktır. Kamu kurumlarının, örneğin elektrik üreticisi EÜAŞ veya BOTAŞ’ın, pilot ölçekte hidrojen harmanlama projelerine girişmesi iç talebi tetikleyebilir.

Avrupa ve Uluslararası Pazar İhtiyacı: Avrupa, yukarıda belirtildiği gibi, 2030’a dek yıllık 10 milyon ton yenilenebilir hidrojen ithalatı hedeflemektedir [146]. Bu ithalatın büyük bölümü potansiyel olarak yeşil hidrojenin amonyak, metanol, sentetik yakıtlar gibi daha kolay taşınabilir türevleri şeklinde olacaktır. Rotterdam ve Hamburg gibi Avrupa’nın başlıca enerji limanları, şimdiden dev ölçekli yeşil amonyak ithalat terminalleri planlamaktadır. Örneğin, Hamburg Limanı’nda 2026 itibarıyla devreye girmek üzere yeşil amonyak ithalat ve hidrojen dönüşüm tesisi inşası planlanmıştır [152]. Bu tesis, dünyanın farklı bölgelerinde Air Products ve ortaklarının

üreteceği yeşil amonyağı gemilerle Hamburg'a getirip hidrojenine dönüştürerek Alman müşterilere dağıtacaktır [151]. Yine Rotterdam Limanı, 2030 sonuna kadar Kuzeybatı Avrupa için yıllık 4,6 milyon ton yeşil hidrojen tedarik kapasitesine ulaşmak üzere İspanya, Orta Doğu, Kuzey Afrika gibi bölgelerle koridor anlaşmaları yapmaktadır [152]. Rotterdam merkezli kurulacak hidrojen tedarik zinciri, amonyak ve metanol gibi taşıyıcılarla Güney Avrupa'dan Kuzey Avrupa'ya yeşil yakıt taşımayı hedeflemektedir [152]. Krk Adası (Hırvatistan) ise Güneydoğu Avrupa'ya yönelik bir hidrojen ithalat merkezi olarak ortaya çıkmaktadır. 2023 yılında açıklanan bir projeye, Hırvatistan'ın Krk adasında mevcut LNG terminaline entegre şekilde yıllık 10 milyon ton yeşil amonyak ithal edip depolayabilecek bir altyapı planlanmıştır [153]. Bu amonyakin Brezilya gibi ülkelerden tedarik edilmesi ve gerektiğinde hidrojen dönüşümüyle Orta Avrupa pazarlarına sevk edilmesi öngörülmektedir [153]. Tüm bu gelişmeler, Avrupa'nın 2025-2030 döneminde hidrojen ve türevlerinin ticaretini başlatıp hızlandıracağını göstermektedir.

Bu uluslararası talep dinamikleri, Türkiye açısından hem bir fırsat hem de rekabet unsuru barındırmaktadır. Kuzey Afrika (Fas, Mısır), Orta Doğu (Suudi Arabistan, Birleşik Arap Emirlikleri) gibi bölgeler büyük ölçekli güneş yatırımlarıyla yeşil hidrojen üretip Avrupa'ya satma planlarını duyurmuştur. Örneğin, Namibya-Almanya iş birliği kapsamında Namibya'da dev yeşil hidrojen tesislerine yatırım yapılarak 2025'ten itibaren Almanya'ya amonyak formunda ihracat hedeflenmektedir [147]. Türkiye ise coğrafi yakınlığı ve gümrük birliği gibi avantajlarıyla Avrupa pazarına erişimde avantaja sahip olabilir, ancak bunun için vakit kaybetmeden üretim kapasitesini oluşturup güvenilir tedarikçi konumunu kazanması gerekir. Avrupa'da hidrojen ithalatında kaynak çeşitliliği önemsenmektedir. Dolayısıyla, Türkiye'nin Güney Marmara gibi bölgelerinde üretilecek hidrojen, yeşil sertifikasyon şartlarını sağlayarak Avrupa'nın ithalat portföyünde yer alabilir. Pazar ihtiyaçları bağlamında AB'nin yenilenebilir hidrojen için tanımladığı kriterler (ilave yenilenebilir enerji kullanımı, karbon yoğunluğu sınırları vb.) mutlaka dikkate alınmalıdır [146].

Sonuç olarak, mevcut durum analizine dayanarak Türkiye içinde özellikle Marmara ve çevresinde önümüzdeki on yılda oluşacak sanayi ve ulaşım hidrojen talebi için hazırlık yapılmalı, eşzamanlı olarak Avrupa'nın ithalat talebine yönelik ihracat kapasitesi geliştirilmelidir. Güney Marmara (TR22) bölgesi, her iki talep türünü karşılayacak konumda olup, bir üretim ve dağıtım üssü haline gelmek için güçlü bir adaydır.

5.3.2. Pazar Erişimi ve Bölgesel/Uluslararası İşbirliği Modelleri

Hidrojen değer zincirinin geliştirilmesinde pazar erişimi kritik bir faktördür. TR22'de üretilecek hidrojenin gerek yurtiçinde gerekse yurtdışında tüketiciyle buluşabilmesi için uygun ulaştırma, depolama ve satış kanalları kurulmalıdır. Pazar erişimi aynı zamanda çeşitli aktörler arası iş birliğini gerektirir. Bu bölümde önce TR22'nin çevresindeki bölgelere (Türkiye içi Düzey 2 bölgeler: TR10, TR21, TR33, TR41, TR42) erişim ve entegrasyon ele alınacak, ardından Avrupa'daki ithalat hub'larıyla (Rotterdam, Hamburg, Krk vb.) uluslararası iş birliği ve ihracat modelleri tartışılacaktır. Ayrıca kamu-özel iş birliği yapıları bu başlık altında incelenecektir.

a) Bölgesel Pazar Erişimi (TR10, TR21, TR33, TR41, TR42 ile Entegrasyon)

TR22 Güney Marmara Bölgesi, çevresinde yer alan Düzey-2 bölgeleriyle hem coğrafi yakınlık hem de ekonomik etkileşim anlamında güçlü bağlara sahiptir. Bu bölgelerle hidrojen alanında iş birliği yapmak, iç pazarı büyütmek ve ölçek ekonomisi yaratmak açısından önemlidir:

TR10 (İstanbul): Türkiye'nin en büyük metropolü olan İstanbul, aynı zamanda büyük bir endüstriyel ve lojistik merkezdir. İstanbul'da enerji talebi çok yüksektir ve ulaşım sektörü yoğun karbon salımı yapmaktadır. TR22'de üretilecek yeşil hidrojen, İstanbul'un kentsel ulaşımında (örneğin belediye otobüslerinde yakıt olarak veya yakıt hücreli araç filolarında) kullanılmak üzere sağlanabilir. Ayrıca İstanbul'daki Ambarlı çevrim santrali gibi doğalgaz santrallerinde test amaçlı hidrojen karışımı uygulanması söz konusu olursa, TR22 bir tedarikçi olabilir. İstanbul'da hidrojen

tüketebilecek diğer bir alan liman operasyonları ve gemi yakıt ikmal olabilir. Dünyanın önde gelen limanları arasında hidrojenle çalışan rıhtım ekipmanları, yakıt ikmal gemileri gibi yenilikler gündemdedir. İstanbul'un Ambarlı ve Haydarpaşa limanlarında ileride hidrojen/amonyak yakıtlı gemilere ikmal hizmeti verilecek olursa, yakıtın TR22'de üretilip tankerlerle İstanbul'a taşınması ekonomik bir model oluşturabilir. İstanbul ile TR22 arasında hâlihazırda yoğun bir elektrik ve doğalgaz iletimi, ayrıca karayolu taşımacılığı altyapısı vardır ve bunlar hidrojenin türevlerini (sıvı hidrojen olmasa da amonyak tankerleri gibi) taşımak için de değerlendirilebilir.

TR21 (Tekirdağ, Edirne, Kırklareli – Trakya): Bu bölge, Türkiye'nin Avrupa'ya açılan kapısıdır ve Yunanistan/Bulgaristan sınır kapılarını içermektedir. Ayrıca Tekirdağ ve çevresi sanayileşmekte olan, limanları (Marmara Ereğlisi, Tekirdağ) bulunan bir bölgedir. TR21, Trakya doğal gaz iletim şebekesi ve LNG terminallerine ev sahipliği yapar (özellikle Marmara Ereğlisi LNG terminali). Bu açıdan, Trakya bölgesinin hidrojen altyapısına entegrasyonu iki yönlü olabilir:

(1) Avrupa'ya Boru Hattı Bağlantısı: Mevcut doğalgaz boru hatları (örn. Türkiye-Yunanistan doğalgaz interkonektörü veya Bulgaristan hattı) gelecekte hidrojen taşımak için kullanılabilir veya yeni bir hidrojen boru hattı koridoru inşa edilebilir. Nitekim Almanya Ekonomi Bakanlığı, Türkiye'den Almanya'ya Avusturya üzerinden uzanacak bir hidrojen boru hattı fikri üzerinde çalışıldığını açıklamıştır. Bu kapsamda Türkiye'nin Avrupa Hidrojen Omurgası (European Hydrogen Backbone) girişimine dahil edilmesi için planlar yapılmaktadır [154]. Eğer Trakya üzerinden bir hidrojen boru hattı Avrupa'ya bağlanırsa, TR22 bölgesinde üretilen hidrojenin taşınması için önce Trakya'ya ulaştırılması gerekir. Bu noktada BOTAŞ'ın mevcut iletim hatlarının adaptasyonu veya yeni bir hattın döşenmesi gündeme gelebilir.

(2) Bölgesel Sanayi Tüketimi: Trakya'da Çerkezköy-Çorlu bölgesinde yoğun bir endüstri vardır, ancak bu sektörlerin hidrojen talebi sınırlı olabilir. Yine de Trakya'da cam fabrikaları ve çimento fabrikaları gibi potansiyel kullanıcılara yeşil hidrojen veya amonyak sağlanması mümkündür. Ayrıca Edirne civarındaki tarım işletmeleri için yeşil gübre (amonyak bazlı) temini, yeşil metanol bazlı biyoyakıt karışımları sağlanması gibi dolaylı kullanım alanları da düşünülebilir. TR22 – TR21 etkileşiminde kritik nokta, lojistikdir: Çanakkale Köprüsü ve karayolu sayesinde tanker veya tüplerle hidrojen taşınabilirliği kolaylaşmıştır. Orta vadede ise boru hattı bağlantısı stratejik hedef olmalıdır.

TR41 (Bursa, Eskişehir, Bilecik) & TR42 (Kocaeli, Sakarya, Düzce, Bolu): Bu iki bölge, Marmara'nın doğusunda yer alıp Türkiye'nin imalat sanayi üslerini barındırmaktadır. Bursa, otomotiv endüstrisinin merkezidir ve Tofaş, Oyak Renault gibi otomobil fabrikaları burada bulunur. Otomotiv sektöründe yakıt hücreli araç üretimi veya kullanımı konusunda küresel eğilimler göz önüne alındığında, Bursa'daki firmaların gelecekte hidrojen teminine ihtiyacı olabilir (örneğin hidrojen yakıt hücreli araç prototipleri, test filoları). Eskişehir, havacılık ve makina sektöründe önemli bir ildir ve ayrıca bir raylı sistem üretim merkezi olarak hidrojenli tren teknolojilerine (örneğin Alstom'un hidrojen trenleri gibi) ilgi duyabilir. Bilecik ve Sakarya'da çimento fabrikaları, seramik ve kimya tesisleri vardır. Özellikle Kocaeli (TR42) ülkenin kimya ve rafineri üssüdür: TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi, PETKİM'e hammadde sağlayan tesisler, otomotiv yan sanayi, gübre ve kimya üreticileri hep bu bölgededir. Bu tesisler halihazırda gri hidrojen kullanıyor veya yakın gelecekte hidrojen ihtiyacı olacak sektörlerdir. Örneğin gübre üreticileri yeşil amonyak tedarik etmek isteyebilir, rafineri ise proseslerinde yeşil hidrojen kullanarak ürün karbon izini düşürmeyi hedeflemektedir. TR22 bu komşu bölgelere hem kara hem deniz yoluyla bağlıdır. Bandırma'dan İzmit Körfezi'ne deniz yolu ile tanker taşımacılığı yapmak mümkündür veya Balıkesir-Bursa üzerinden karayolu ile tüplü gaz nakliyesi gerçekleştirilebilir. Bölgesel ölçekte ortak bir hidrojen boru şebekesi vizyonu geliştirmek de uzun vadede mantıklıdır. Örneğin Bandırma-Bursa-Kocaeli hattında kurulacak bir boru hattı, bölgedeki sanayi tesislerini TR22 üretim merkezine bağlayabilir. Böyle bir şebeke, sadece hidrojen değil CO2 toplama hatlarıyla birlikte, karbon yakalama ve kullanımını da entegre edebilir (örneğin yeşil metanol sentezi için gerekli CO2'nin tesislerden toplanması gibi).

TR33 (Manisa, Afyon, Kütahya, Uşak): Bu bölge, Ege Bölgesi'nin iç kesimlerini kapsar ve Balıkesir'in güneydoğusuyla komşudur (Kütahya). Kütahya önemli bor madeni üretim alanlarına ve bir borik asit fabrikasına sahiptir ve bu tesisler Eti Maden'in TR22'deki tesisleriyle entegre çalışmaktadır. Kütahya ayrıca termal santralleri olan bir ilimizdir, dolayısıyla emisyon azaltım baskısı altındadır. Yeşil hidrojen, Kütahya'daki termik santrallerin biyokütle ve hidrojenle birlikte eş-yanmasını sağlama gibi deneysel projelerde yer bulabilir. Manisa ise İzmir'e yakın bir sanayi kenti olup elektrik-elektronik, demir çelik (Erdemir tesisleri) ve otomotiv tedarik sanayi mevcuttur. Manisa Organize Sanayi Bölgesi, enerji tüketimi yüksek bir OSB'dir ve burada yeşil hidrojen kullanımı şimdilik uzak görünse de, OSB içerisinde kurulacak bir trigenerasyon tesisi veya ısıtma amaçlı hidrojen kullanımı (doğal gaz yerine) gibi uygulamalar pilot olarak düşünülebilir. TR22'nin TR33 ile etkileşiminde en somut konu, lojistik ve hammadde bağlantısıdır. Örneğin Balıkesir'de üretilen yeşil amonyak, Afyon'daki gübre dağıtım depolarına sevk edilebilir veya Uşak'taki tekstil fabrikalarına hidrojenle çalışan kazan yakıtı sunulabilir. Bu tip iş birlikleri, bölgesel ihtiyaçlara özel iş modelleri gerektirir.

Bölgesel iş birliğinin modelleri arasında şunlar sayılabilir:

- Konsorsiyumlar ve Kümelenmeler: TR22 ve çevre bölgelerdeki enerji ajansları, sanayi odaları ve firmalar bir araya gelerek Hidrojen Kümelenmeleri oluşturabilir. Bu yapılanmalar, ortak altyapı kullanımı (örneğin ortak hidrojen depolama tesisi veya dağıtım ağı) için planlama yapabilir.
- Kamu-Kurumları Arasında Protokoller: Bölgesel kalkınma ajansları (GMKA gibi) ile komşu bölgelerdeki kalkınma ajansları veya belediyeler arasında iş birliği protokolleri imzalanabilir. Bu protokoller ile örneğin İstanbul Büyükşehir Belediyesi'nin hidrojen yakıtlı otobüs projesine TR22 bölgesinden yakıt tedariki konusunda iyi niyet anlaşmaları yapılabilir. Benzer şekilde, Kocaeli veya Bursa'daki sanayi kümeleriyle yeşil hidrojen tedarik sözleşmeleri için zemin hazırlanabilir.
- Altyapı Ortak Kullanımı: Hidrojenin taşınması pahalı bir işittir. Bu nedenle, TR22'de üretilen hidrojenin boru hattı veya tankerle taşınması için komşu bölgelerle ortak altyapı yatırımları cazip olabilir. Örneğin BOTAŞ ve TPAO gibi kamu şirketleri ile TÜPRAŞ, Boru Hatları ile Petrol Taşıma AŞ gibi büyük endüstriyel kullanıcılar bir ortak yatırım modeli geliştirerek Bandırma-Bursa-İzmit hattında bir hidrojen boru hattı inşa edebilir. Bu, bir tür kamu-özel ortaklığı (PPP) olarak kurgulanabilir.
- Sertifikasyon ve Garanti Sistemleri: Bölgeler arası hidrojen ticaretinde yeşil hidrojen sertifikaları kritik olacaktır. Çevre bölgeler ve TR22, ulusal ölçekte geçerli bir Garanti Sertifikası sisteminin gelişmesi için birlikte çalışabilir. Örneğin İstanbul'daki bir fabrika, tükettiği hidrojenin TR22'deki yenilenebilir enerjiden üretildiğine dair sertifika talep edecektir. Bu nedenle, üretimden tüketime izlenebilirlik sağlayan dijital altyapılar (Guarantee of origin gibi) bölgeler arası iş birliğiyle kurulabilir.

b) Uluslararası İş Birliği ve İhracat Modelleri

TR22'nin bir hidrojen üssü olarak gelişmesinin bir ayağı da uluslararası pazarlara erişim olacaktır. Avrupa'daki hidrojen ithalat merkezleriyle entegre olmak, Türkiye'nin hidrojenini küresel değer zincirine sokmak için gereklidir. Bu kapsamda Rotterdam (Hollanda), Hamburg (Almanya) ve Krk (Hırvatistan) gibi limanlar öne çıkmaktadır. Bu hub'larla iş birliği aşağıdaki şekillerde gerçekleşebilir:

Deniz Yolu İhracatı (Amonyak ve Metanol Koridorları): Rotterdam ve Hamburg hâlihazırda Akdeniz ve Atlantik ötesinden gelecek yeşil amonyak ve metanolü karşılamak üzere altyapı yatırımlarına başlamıştır. TR22, Çanakkale ve Bandırma limanları üzerinden bu koridorlara dâhil olabilir. Örneğin İspanya'nın Algeciras Limanı ile Rotterdam arasında yeşil hidrojen koridoru kurulması için Cepsa ve Rotterdam Limanı arasında bir mutabakat imzalanmıştır ve bu koridor 2027'de faaliyete geçerek gemilerle amonyak taşıyacaktır [155]. Benzer şekilde, Güney

Marmara’da üretilecek amonyağın Deniz üzerinden Kuzey Avrupa’ya sevki için konsorsiyumlar kurulabilir. Rotterdam Limanı yönetimi, potansiyel tedarikçi ülkeler listesine Türkiye’yi de ekleyebilir. Bunun için Rotterdam Limanı Otoritesi ile Türkiye arasında resmi bir işbirliği platformu oluşturmak değerlidir. Türkiye Cumhuriyeti Enerji Bakanlığı veya ihracatçılar birliği, Rotterdam Limanı ile Niyet Mektubu (MoU) imzalayarak yeşil hidrojen ticaretinde ortak çalışmayı başlatabilir. Bu, Rotterdam’ın 2030 hedefi olan 4.6 milyon ton tedarik içinde Türkiye’ye bir pay ayrılmasına katkı yapacaktır.

Amonyak ihracatı özelinde, Bandırma veya Çanakkale’de bir amonyak sıvı yük terminali kurulması gerekebilir. Bu terminal, tıpkı bir LNG tesisi gibi çalışarak yeşil amonyağı depolayıp, gemilere yükleyebilir. Avrupa’ya sefer yapacak amonyak tankerleri ile ürün sevki mümkündür. Rotterdam’da amonyağın yeniden hidrojene dönüştürülmesi veya doğrudan amonyak olarak kullanılması (gübre, yakıt) söz konusu olacaktır. TR22 kaynaklı amonyak, Avrupa’da temiz gübre veya yeşil deniz yakıtı olarak da talep görebilir. Bu tür uzun vadeli tedarik anlaşmaları için Türk üreticileri ile Avrupa alıcıları arasında offtake anlaşmaları imzalanmalıdır.

Boru Hattı ile İhracat: Orta ve uzun vadede, Türkiye-Avrupa arasında bir hidrojen boru hattı hayata geçerse, TR22 bundan faydalanabilir. Güncel gelişmeler, Bulgaristan üzerinden Romanya’ya uzanan, oradan Orta Avrupa’ya bağlanacak bir hidrojen boru hattı güzergâhının Avrupa Hidrojen vizyonuna girdiğini göstermektedir. Böyle bir hat, Türkiye’nin doğalgaz iletim altyapısının bir kısmının hidrojen taşımak üzere dönüştürülmesiyle veya yeni hat inşasıyla mümkün olacaktır. Almanya’nın 2023’teki açıklaması, Türkiye’yi İtalya ve Kuzey Afrika ile birlikte hidrojen şebekesine dâhil etmeyi planladıkları yönündedir [154]. Bu gerçekleşirse, TR22’de üretilen hidrojen, ulusal şebeke üzerinden Trakya’ya iletilip oradan Bulgaristan’a ihraç edilebilir. Boru hattı ihracat modeli, kesintisiz büyük hacimli taşıma imkânı verse de, teknik ve diplomatik zorlukları vardır: Hidrojenin boruda taşınması için yüksek saflık, uygun basınç ve malzeme gereksinimleri, ayrıca ülkelerarası düzenlemeler gerekir. Bu nedenle kısa vadede olası görünmese de 2035 sonrasının konusu olabilir. Yine de bugünden bu vizyonu destekleyecek adımlar atılmalıdır. Örneğin, BOTAŞ ile Avrupa’daki gaz iletim operatörleri (Transmission System Operator/TSO) arasında hidrojen harmanlama testleri ve altyapı uyumluluğu çalışmaları başlatılabilir.

Yabancı Yatırım ve Ortaklıklar: Uluslararası iş birliğinin bir diğer boyutu, yatırım ortaklıklarıdır. Avrupa’nın enerji şirketleri, fonları veya kalkınma bankaları Türkiye’deki projelere ortak olabilir. Nitekim Güney Marmara’daki hidrojen vadisi projesinde Linde gibi uluslararası şirketlerin yer aldığı görülmektedir. Bunu daha da geliştirmek için örneğin Hydrogen Council üyesi büyük şirketler (Shell, Air Liquide, TotalEnergies vb.) TR22’deki yatırımlara davet edilebilir. Bu şirketler hali hazırda Kuzey Afrika ve Orta Doğu’da proje kovalarken, Türkiye’yi de portföylerine eklemek isteyebilirler. Özellikle Alman enerji şirketleri, Rus gazına bağımlılığını azaltma stratejileri kapsamında Türkiye’de yeşil hidrojen üretimine ilgi gösterebilir. Araştırmalara göre Alman yetkililer Türkiye’de üretilen yeşil hidrojeni Almanya’ya taşımak üzere çalışmalara başladıklarını, Türkiye’nin güneş ve rüzgâr potansiyelini değerlendirmek istediklerini belirtmiştir [154]. Bu kapsamda Almanya ile Türkiye arasında hidrojen konusunda bir enerji iş birliği anlaşması imzalanması olasıdır. Benzer şekilde, Japonya, Güney Kore gibi hidrojen ithalatçısı olması beklenen ülkelerle de (örneğin Japonya Yeni Enerji ve Sanayi Teknoloji Geliştirme Organizasyonu - NEDO ile) pilot projeler geliştirilebilir.

Sertifikasyon ve Standardizasyon: Uluslararası hidrojen ticaretinde Mutual Recognition Agreements (karşılıklı tanıma) konusu kritik olacaktır [156]. Türkiye, AB’nin yenilenebilir hidrojen tanımına ve garanti sistemi CertifHy gibi insiyatiflere uyum sağlamalıdır. İhraç edilecek hidrojenin “RFNBO – yenilenebilir biyolojik olmayan yakıt” kriterlerine uygun olduğunu belgeleyecek sistemler kurulmalıdır [146]. Avrupa ile ortak pilot sertifikasyon projeleri yürütülebilir. Örneğin Almanya’nın H2Global programı çerçevesinde yeşil hidrojen alımı yaparken aradığı sertifikasyon

koşullarını karşılayacak ölçüleme ve doğrulama mekanizmaları Türkiye’de tesis edilebilir. Bu alanda iş birliği yapmaya istekli Avrupa kurumları (DNV GL, TÜV vb.) ile Türk Standartları Enstitüsü ortak çalışma yürütebilir.

Bilgi Paylaşımı (Knowledge-Sharing) ve Eğitim: Avrupa’daki hidrojen hub’larıyla iş birliği sadece ticari değil, bilgi paylaşımı boyutunda da önemlidir. Rotterdam, Hamburg gibi limanlar, liman içinde hidrojen boru ağı kurmak, sanayiye dağıtmak, güvenlik protokolleri oluşturmak gibi konularda deneyim kazanacaktır. Bu birikimin TR22 limanlarına aktarılması için çalışma ziyaretleri, ortak seminerler düzenlenebilir. Örneğin Çanakkale veya Bandırma liman otoriteleri, Rotterdam Limanı’nın hidrojen departmanı ile sürekli iletişim hâlinde olup teknik gereksinimleri öğrenebilir.

TR22 bölgesi, Türkiye’nin bu alandaki yüzü olabileceği için, şimdiden uluslararası platformlarda tanıtılmalı ve güven oluşturmalıdır. IEA, Hydrogen Council, European Clean Hydrogen Alliance gibi oluşumların çalışmalarına Türkiye’den katılım sağlanması, TR22’nin adının duyurulmasına ve olası ortakların dikkatine sunulmasına yardım edecektir.

c) Kamu-Özel İş Birliği (PPP) Yapıları ve Modelleri

Hidrojen ekosisteminde başarılı projelerin hayata geçmesi için kamu ve özel sektörün etkin iş birliği şarttır. Hem büyük sermaye ihtiyacı hem de henüz ekonomik olarak tam rekabetçi olmayan bir teknoloji olması nedeniyle, geleneksel piyasa mekanizmaları tek başına yeterli olmayabilir. Bu noktada Public-Private Partnership (PPP) modelleri devreye girer. Kamu-özel iş birliği, altyapı projelerinde yaygın kullanılan çeşitli sözleşme ve ortaklık şekillerini içerir. Hidrojen özelinde dünyada yeni yeni örnekler görülmektedir. TR22’de kurulacak hidrojen üretim ve dağıtım üssü için aşağıdaki PPP yaklaşımları değerlendirilebilir:

Altyapı Yatırımlarında Risk Paylaşımı: Hidrojen üretim tesisleri, depolama tankları, boru hatları gibi yüksek maliyetli altyapılar için kamu ve özel sektör ortak yatırım yapabilir. Örneğin, Balıkesir’de 100 MW’lık bir elektroliz tesisinin kurulacağını varsayalım. Bu tesise kamu tarafı (örneğin TPAO veya TEİAŞ üzerinden devlet) %30 oranında sermaye koyarken, özel şirketler (yerli enerji şirketleri veya yabancı yatırımcılar) %70 sermaye koyabilir. Kamu tarafı sermaye katkısı sayesinde özel sektörün ilk yatırım maliyeti azalır ve getiri beklentisi makul seviyeye gelir. Buna karşılık özel sektör de teknolojik işletme becerisi ile projenin verimli yürümesini sağlar. PPP’nin bu biçimi ortak girişim (joint venture) şeklinde olabilir. Örneğin bir “Güney Marmara Hidrojen A.Ş.” şirketi kurularak, hisselerin bir kısmı kamu kurumlarına, kalanı özel yatırımcılara paylaştırılabilir.

Yap-İşlet veya Yap-İşlet-Devret Modelleri: Klasik PPP modellerinden olan Yap-İşlet (Build-Operate) modelinde kamu, özel sektöre belirli bir süre için işletme hakkı tanır. Hidrojen için örnek vermek gerekirse, Bandırma Limanı’nda bir yeşil amonyak ihracat terminali inşası düşünülüyorsa, devlet bu terminalin arazisini ve gerekli izinlerini sağlayıp özel bir şirkete 20 yıllığına işletme hakkı verebilir. Şirket terminali inşa edip işletir, sürenin sonunda devlete devreder (YİD durumunda) veya sözleşme yenilenir. Bu şekilde özel sektörün yatırımını korumak için uzun vadeli garanti verilirken, kamu da kritik bir altyapının nihai sahibi olur. Yap-İşlet modelinde ise devretme olmadan, sadece işletme dönemi geliri ile yatırım geri kazanılır.

Alım Garantili Sözleşmeler (Offtake Guarantee): Hidrojen projelerinde en büyük risk talep garantisi olmamasıdır. Kamu bu riski azaltmak için özel üreticilere alım garantisi verebilir. Örneğin devlet, TR22’deki üreticiden 5 yıl boyunca yılda 50 milyon Nm³ yeşil hidrojeni belirli bir fiyattan satın almayı taahhüt edebilir (tıpkı yenilenebilir enerjide alım garantili ihaleler gibi). Bu satın alınan hidrojen daha sonra devlet tarafından rafinerilere veya sanayiye satılabilir ya da ihraç edilebilir. Bu modelde kamu bütçesi bir yük altına girse de, piyasanın öğrenme eğrisi tamamlanana kadar süre kazanılmış olur. Contracts for Difference (CfD) mekanizması da bir tür alım garantisidir ve

burada devlet, yeşil hidrojen üreticisine maliyet ile piyasa fiyatı arasındaki farkı ödeyebilir, eğer piyasa fiyatı yüksek olursa üretici devlete fark ödeyebilir. AB, yeşil hidrojen için böyle bir CfD mekanizması (European Hydrogen Bank aracılığıyla) kurma hazırlığındadır [157]. Türkiye de benzer bir mekanizmayı PPP kapsamında uygulayabilir.

Kamu Altyapı Desteği: Kamu, hidrojen projelerine doğrudan para koymak yerine altyapı desteği de verebilir. Örneğin, Balıkesir OSB içinde bir hidrojen boru hattı döşenecekse, bunun kazı izinleri, güzergâh hazırlığı, emniyet tedbirleri kamu tarafından sağlanabilir. Veya hidrojen üretim tesisinin ihtiyaç duyduğu elektrik iletim hattı, trafo merkezi TEİAŞ tarafından inşa edilerek yatırıma aynı katkı yapılabilir. Bu tür destekler, PPP'nin hizmet ortaklığı boyutudur. Özel sektör üretim tesisine odaklanırken, kamu destekleyici altyapıyı sunabilir.

Kamu-Özel Ar-Ge Ortaklığı: Hidrojen teknolojileri hala gelişmekte olduğundan, Ar-Ge ve pilot projelerde kamu-özel işbirliği önemlidir. TÜBİTAK, üniversiteler ve özel şirketler TR22'de teknoloji geliştirme merkezleri kurabilir. Örneğin bir Hidrojen Teknoloji Geliştirme ve Test Merkezi Balıkesir'de kurulursa, bunun finansmanını hem kamu (TÜBİTAK fonları, kalkınma ajansı desteği) hem de özel sektör (cihaz üreticileri, enerji şirketleri) paylaşabilir. Bu merkezde elektrolizör verim testleri, yakıt pili araç testleri gibi çalışmalar yapılarak bölge bir çekim merkezi haline getirilebilir. Bu tip PPP, daha çok inovasyon ortaklığı olarak adlandırılır ve uzun vadede yerli teknoloji kapasitesi yaratmayı hedefler.

Eğitim ve İşgücü Geliştirme Ortaklıkları: Hidrojen sektörünün yetişmiş insan kaynağı ihtiyacı olacaktır. Kamu (üniversiteler, meslek yüksekokulları) ile özel sektör (sanayi firmaları) bir araya gelerek eğitim programları düzenleyebilir. Örneğin Balıkesir Üniversitesi'nde hidrojen teknikerliği programı açılıp müfredatı özel sektörle birlikte hazırlanabilir. Kamu, eğitim kurumu ile gençleri eğitirken özel sektör staj ve iş imkânı sunabilir.

PPP yapılarının avantajı, kaynak ve risk paylaşımıyla projelerin gerçekleşme ihtimalini artırmasıdır. Hidrojen ekosisteminde belirsizlikler yüksek olduğu için, kamu otoritesi planlama güvencesi ve gerektiğinde finansal destek sağlayabilir, karşılığında özel sektörün dinamizmi ve verimliliğinden yararlanır. Bu sebeple Türkiye'de hidrojen gibi yeni bir sektörde özel sektörün tek başına tüm finansmanı üstlenmesini beklemek gerçekçi olmayabilir. Bu nedenle TR22 hidrojen üssü projesi, ideal olarak merkezi hükümet, yerel yönetimler, kalkınma bankaları ve özel yatırımcıların dahil olduğu karma bir modelle yürütülmelidir.

5.3.3. Ekonomik Etki ve Değer Zinciri

TR22'de hidrojen üretim ve dağıtım üssü kurulmasının ekonomik etkileri çok boyutlu olacaktır. Bu bölümde bölgesel ekonomik kalkınma, istihdam, sanayi değer zinciri üzerindeki etkiler ve Türkiye genelinde yaratılacak katma değer ele alınmıştır. Ayrıca hidrojenin mevcut değer zincirlerine (enerji, sanayi, lojistik vb.) nasıl entegre olup onları genişleteceği değerlendirilmiştir.

a) Bölgesel Ekonomik Kalkınma ve İstihdam

Hidrojen yatırımları, TR22 bölgesine önemli bir ekonomik hareketlilik getirecektir. Öncelikle inşaat ve kurulum aşamalarında mühendislik, inşaat, imalat sektörlerinde geçici istihdam artışı olacaktır. 100 MW'lık bir elektroliz tesisi ve ilgili rüzgâr/solar santrallerinin inşası bile yüzlerce işçi ve uzmana ihtiyaç duyacaktır. Projelerin zirve inşaat dönemlerinde bölgedeki istihdam talebi ve hizmet sektörü canlanacaktır.

Orta ve uzun vadede ise hidrojen sektörünün kalıcı istihdamı söz konusudur. Elektroliz tesislerinin işletilmesi, bakım-onarımı için teknisyenler gerekecektir. Bir hidrojen üretim tesisi, büyüklüğüne bağlı olarak onlarca (hatta yüzlerce) personel çalıştırabilir (örneğin kimya mühendisleri, elektrik teknisyenleri, güvenlik personeli vs.). Ayrıca hidrojenin taşınması (tanker sürücüleri, gemi

personeli), dağıtımı ve kullanımı (yakıt istasyonları görevlileri, endüstriyel kullanımda operatörler) alanlarında yeni işler oluşacaktır. Hidrojen istasyonları kurulursa (özellikle ulaşım yakıtı için), bunlar yakıt ikmal görevlileri gibi rolleri beraberinde getirebilir. Kısacası, hidrojen ekonomisi yeni yeşil işler (green jobs) demetidir ve büyük kısmı yerel olarak istihdam edilebilir.

Ek olarak, bölgedeki üniversite ve araştırma kurumlarıyla bağlantılı yüksek nitelikli işler de artacaktır. Örneğin üniversitelerde hidrojen teknolojisi üzerine çalışan akademik pozisyonlar, AR-GE merkezlerinde araştırmacılar gibi nitelikli istihdam yaratılabilir. Bu da beyin göçünü tersine çevirmeye küçük de olsa katkı yapabilir ve genç nüfusa geleceğin sektöründe kariyer fırsatı sunar. Ekonomik büyüklük açısından bakıldığında, hidrojen sektörünün yaratacağı çarpan etkisi önemlidir. Bir araştırmadaki tahminlere göre Türkiye geneli için 2050'de hidrojenin sağlayacağı yıllık ekonomik fayda 6-8 milyar \$ olarak hesaplanmıştır [148]. TR22, bu pastadan önemli bir pay alabilir. Bölgede kurulacak tesisler sadece doğrudan gelir değil, dolaylı gelirler de getirecek. Yan sanayiler (elektrolizör parça üretimi, basınçlı tank imalatı gibi) gelişebilir, hizmet sektörü büyüyebilir. Hidrojen ihracatı başlaması durumunda bölgeye döviz girdisi olacak, bu da cari dengeye küçük de olsa olumlu yansıtacaktır.

Ayrıca hidrojen, dekarbonizasyon kaynaklı rekabet avantajı yaratacağından, bölgedeki mevcut sanayilerin uluslararası pazarlarda konumlarını korumasına yardımcı olacak. Örneğin bir çelik üreticisi, ihracat yaparken AB'nin karbon sınır vergisine maruz kalmamak için yeşil çelik üretmek zorundadır. Bunu başarabilmek için hidrojenle çelik üretimine geçmelidir. Eğer Marmara bölgesinde güvenilir bir yeşil hidrojen tedarik zinciri kurulmuşsa, şirketler üretimlerini burada tutup geliştirmeyi tercih edecektir. Aksi halde üretimi yurtdışına kaydırma veya yüksek vergiler ödeme riski oluşurdu. Bu şekilde hidrojen, sanayide rekabetçiliği koruyarak dolaylı ekonomik kayıpları önler.

Hidrojen sektörünün bölgeye çekeceği yatırımlar da başlı başına bir ekonomik etkidir. Yabancı yatırımcıların TR22'de projelere ortak olması, sermaye girişi demektir. Örneğin uluslararası bir konsorsiyumun gelip Balıkesir'de bir hidrojen-amonyak tesisi kurması, doğrudan yabancı yatırım istatistiklerine de yansır ve bölgenin ekonomik profilini yükseltir. Yabancı sermaye beraberinde yeni teknolojiler ve yönetim becerileri getirerek bölgesel kalkınmayı hızlandırabilir.

b) Değer Zinciri ve Sanayi Entegrasyonu

Hidrojen ekonomisinin gelişimi, mevcut enerji ve sanayi değer zincirlerine yeni halkalar ekleyecektir. TR22 özelinde bakıldığında, yenilenebilir enerji sektöründen başlayan ve nihai sanayi ürünlerine kadar uzanan bütüncül bir değer zinciri gelişimi mümkündür.

Yenilenebilir Enerji Değer Zinciri: Bölgedeki rüzgâr türbini ve güneş paneli kurulumlarının artması, zaten mevcut olan yenilenebilir enerji değer zincirini genişletecektir. Rüzgâr türbini kanat ve kule imalatı Balıkesir'de yapılmaya başlanabilir (Türkiye'de halihazırda bazı rüzgâr ekipman fabrikaları Ege bölgesinde mevcut, benzer yatırım TR22'ye çekilebilir). Güneş paneli montaj fabrikaları da bölgeye gelebilir. Bu yatırımlar hidrojen sayesinde ivme kazanacaktır çünkü hidrojen projeleri yeni rüzgâr/güneş kapasitesini tetikleyecektir.

Elektrolizör ve Ekipman İmalatı: Hidrojen değer zincirinin kritik ekipmanları arasında elektrolizörler, kompresörler, depolama tankları ve yakıt hücreleri sayılabilir. Türkiye henüz bu alanlarda üretici konumunda değil veya çok sınırlı kapasiteye sahiptir. Ancak TR22'de talep oluştuğça, üretici firmalar yatırım yapmayı düşünebilir. Örneğin dünya çapında elektrolizör üreticisi olan Nel, Siemens, Cummins gibi şirketler, Türkiye pazarına girip burada üretim yapmayı değerlendirebilir. 2024 itibarıyla İspanya ve Norveç'te büyük elektrolizör fabrikaları açılmıştır [157], Türkiye de coğrafi konumu ve mühendislik birikimiyle böyle bir yatırıma aday olabilir. TR22'nin sanayi altyapısı (örneğin Bandırma ve Bursa'daki organize sanayi bölgeleri) bu tür imalatlar için uygundur. Kamu, stratejik teşviklerle elektrolizör ve basınçlı kap imalatını teşvik ederse, hidrojen

değeri zincirine yerli üretim entegre edilebilir. Bu sayede katma değer ülkede kalır ve yurtdışına bağımlılık azalacaktır.

Kimyasal Üretimi ve Türevleri: Hidrojeni kullanarak üretilen yeşil amonyak, yeşil metanol, sentetik sıvı yakıtlar gibi türev ürünlerin üretimi tamamen yeni bir alt-sektör yaratacaktır. Örneğin TR22’de planlanan Sodyum Borhidür tesisi bu kapsamdadır ve bor madeninden katma değerli bir hidrojen taşıyıcısı kimyasal üretilmesi planlanmaktadır [149]. Bunun gibi, Balıkesir veya Bandırma’da bir yeşil gübre (amonyak/üre) fabrikası kurulabilir. Konvansiyonel gübre tesisleri doğalgazı ham madde olarak kullanırken, burada su ve hava (hidrojen ve azot) kullanılarak amonyak sentezi yapılabilir. Bu fabrikanın kurulması, bölgede tarımsal girdilerde dışa bağımlılığı azaltabilir ve belki ihracat kalemi oluşturabilir. Aynı şekilde yeşil metanol üretimi, deniz yakıtı olarak büyük talep göreceği için (uluslararası nakliyyede yeşil yakıt dönüşümü nedeniyle), Bandırma’daki petrokimya tesisleri entegre bir metanol fabrikasına dönüştürülebilir. Yeşil metanol için gereken CO₂, örneğin Bandırma’daki bir biyokütle santralinden yakalanabilir, hidrojenle birleştirilip metanol üretilir. Bu sayede döngüsel bir karbon değer zinciri oluşur.

İmalat Sanayinde Dönüşüm: Hidrojen kullanımının artmasıyla, bazı imalat sektörleri de teknoloji dönüşümüne girecektir. Örneğin cam ve seramik fırınları, brülörlerini hidrojen yakmaya uygun hale getiren yeni ekipmanlara ihtiyaç duyacak. Bu bir talep oluşturacaktır ve bölgedeki makine imalatçıları bu fırsatı değerlendirebilecektir. Hidrojen uyumlu brülör, kazan, ocak üretimi gibi alanlarda KOBİ’ler gelişebilir. Yine otomotivde yakıt hücreli araç komponentleri (yakıt hücresi, hidrojen tankı vb.) üretimi söz konusu olabilir. Bursa’daki otomotiv yan sanayi, içten yanmalı motor parçaları yerine yakıt hücresi parçaları üretmeye yönelebilir. Bu geçiş bir günde olmaz, ancak hidrojenin değer zincirine eklenmesiyle yavaş yavaş üretim hatları adapte edilebilir. Böylece geleneksel sanayiler ürün portföylerini genişleterek rekabet güçlerini korurlar.

Lojistik ve Hizmet Değer Zinciri: Hidrojen taşımacılığı, yeni lojistik hizmetleri gerektirmektedir. Basınçlı tüp taşımacılığı yapacak nakliyye filoları, sıvı amonyak taşıyacak tanker gemileri vb. devreye girecektir. Bu, lojistik şirketlerine yeni yatırım ve gelir alanı açabilir. Örneğin bir tanker filosu kurulması, gemi inşa sanayine sipariş demektir ve Yalova ve Tuzla’daki tersaneler bu tip gemilerin inşasında rol alabilir. Kara taşımacılığında ise, özel tasarımı hidrojen tankerleri veya tüplü treyler üretimi ve işletimi, bölgedeki lojistik firmalara iş imkânı sağlayabilir. Ayrıca, hidrojen ile ilgili bakım/onarım ve güvenlik hizmetleri doğacaktır. Basınçlı sistemlerin periyodik bakımı, sızdırmazlık kontrolü, yangın-güvenlik sistemleri gibi alanlarda uzman firmalar gelişebilir.

Yan Sektörlerde Canlanma: Hidrojen enerjisi, tamamen yeni bir sektör olduğu için ihtiyaç duyacağı malzeme ve hizmetler yan sektörleri tetikleyecektir. Örneğin demir çelik sektörü için yeni bir talep, elektrolizör ve boru imalatında kullanılan özel kalitede çeliklerdir ve Paslanmaz çelik ve nikel alaşımlı çelik üretimi artabilir. Yine kimya sektörü için yeni katalizör malzemeler (platin, iridyum gibi) ithalatı veya belki geri kazanımı (recycling) önem kazanır. Elektronik sektöründe, elektrolizör kontrol sistemleri, sensörler, yakıt hücreleri için membran ve gaz difüzyon katmanları gibi spesifik ürünlerde ticaret canlanabilir. Bu sayılanlar belki TR22’de üretilmez ama ülke genelinde bu değer zincirinin halkaları oluşur, sonuçta bölge ekonomisine de yansır.

Ekonomik etkiyi sayısallaştırmak gerekirse, bazı öngörüler yapılabilir: Örneğin 2030 yılına kadar TR22’de 1 GW elektroliz kapasitesi kurulmuş ve tam işletimde olduğu varsayılırsa 1 GW elektrolizör yılda yaklaşık 180 bin ton hidrojen üretebilir (tam yükte çalışırsa). Bunun ekonomik değeri hidrojenin kg fiyatına göre değişir ve eğer 2030’da maliyet 3 \$/kg ise, piyasa değeri yıllık ~540 milyon \$ olur. Bu hidrojenin yarısı iç piyasaya, yarısı ihracata gideceği düşünülürse, ihracat geliri 270 milyon \$, iç piyasada fosil yakıt ithalatının ikamesiyle tasarruf belki 200 milyon \$ (daha düşük fiyata satılabilir iç piyasada) olabilir ve 2030’da yüz milyonlarca dolarlık bir pazar büyüklüğü oluşabilir. 2050 perspektifinde SHURA’nın öngördüğü gibi 1.5-1.9 milyon ton ihracat potansiyeli

gerçekleşirse, o dönemki fiyatlarla belki yıllık birkaç milyar dolarlık yeni bir ihracat kalemi ortaya çıkacaktır [148]. Bu rakamlar TR22 bölgesinin GSYH'si içinde önemli pay teşkil edecektir.

Ayrıca hidrojen, enerji ithalat faturasını azaltarak makro-ekonomik fayda sağlar. Türkiye yıllık ~40-50 milyar \$ enerji ithalatı yapmaktadır. Yeşil hidrojen bu ithalatın bir kısmını (doğalgaz ve petrol ürünleri kısmını) zamanla ikame edebilirse, ülke cari açığı azalacaktır.

Çevresel ekonomi açısından da oluşacak etki unutmamalıdır. Yeşil hidrojen kullanımıyla emisyonlar azalacağı için, karbon vergisi gibi yükümlülüklerden kaçınılabılır veya azaltılabilir. Ayrıca hava kalitesi iyileşmesi, sağlık harcamalarında azalma gibi ikincil ekonomik faydalar da uzun dönemde görülebilir.

Değer zinciri genişlemesi ile yerel katma değer artması, hidrojen ham maddesinin bölgede işlenerek yüksek değerli ürünlere dönüştürülmesi manasına gelir. Bu, TR22'yi sadece bir "hidrojen" ihracatçısı değil, ileri teknoloji ürünler (yakıt hücreli cihazlar, sentetik yakıtlar, vs.) üreticisi yapma potansiyeli taşır. Bölgede kurulacak teknoloji geliştirme bölgeleri, fab-lab'ler, kuluçka merkezleri ile hidrojen uygulamaları üzerine start-up şirketleri çıkabilir. Örneğin hidrojen dronları, hidrojenli forkliftler, taşınabilir yakıt pilleri gibi ürünler geliştiren girişimler TR22'de ortaya çıkabilir ve bunlar ülkeye yeni markalar kazandırabilir.

Sonuç olarak, TR22'nin hidrojen üssü olması, ekonomik kalkınma ve sanayi dönüşümü adına çok yönlü pozitif etki yaratacaktır. Fakat bu etkilerin realize olması, yatırımların gerçekten yapılmasına ve sürdürülebilir iş modelleriyle desteklenmesine bağlıdır. Bu nedenle raporun son bölümünde söz konusu iş modelinin kurgusu ve uygulama yol haritası detaylandırılarak, bu ekonomik vizyonun gerçekleştirilmesi için somut adımlar ele alınmıştır.

5.3.4. İş Modeli Kurgusu ve Uygulama Yol Haritası

Bu bölümde, TR22 Güney Marmara Bölgesi'nde hidrojen üretim ve dağıtım üssü kurulması için önerilen iş modeli ve bunun hayata geçirilmesine yönelik yol haritası sunulmaktadır. İş modeli, paydaşların rolleri, gelir-gider yapısı, finansman ve işletme planını içermekte, yol haritası ise zamanlamayı, aşamaları ve gereklilikleri ortaya koymaktadır.

a) Önerilen İş Modelinin Bileşenleri

Önerilen iş modelinin vizyonu TR22 bölgesini 2030'a kadar ulusal ölçekte lider bir yeşil hidrojen üretim merkezi, 2040'a kadar da Avrupa'ya entegre bir hidrojen ihracat üssü haline getirmektir. Bu vizyon doğrultusunda iş modeli aşağıdaki temel bileşenlerden oluşmaktadır.

Üretim Kaynağı: Yeşil hidrojen üretimi için gereken elektrik, öncelikle bölgedeki yeni yenilenebilir enerji yatırımlarından sağlanacaktır. Model, minimum %90 yenilenebilir kaynak kullanımını hedeflemektedir. Başlangıçta şebeke elektriği ve yenilenebilir enerji sertifikaları ile esneklik sağlansa da, uzun vadede elektroliz tesislerinin doğrudan yenilenebilir santrallere bağlantısı sağlanacaktır. Örneğin, Balıkesir'de 500 MW rüzgâr santrali + 200 MW güneş santrali paketi, 200 MW'lık bir elektrolizöre tahsis edilebilir. Bu tesisler arasında uzun vadeli güç alım anlaşmaları (PPA) imzalanarak elektrolizöre sabit fiyatlı yeşil elektrik temini garanti edilmelidir.

Ürün ve Hizmetler: İş modeli yalnızca hidrojen gazı satışı değil, çeşitli ürün ve hizmetleri kapsamaktadır. Bu doğrultuda;

- Sıkıştırılmış gaz hidrojen (tube trailer dolumu şeklinde): özellikle yakın sanayi müşterilerine
- Sıvı veya kimyasal taşıyıcı formda hidrojen (amonyak, metanol): ihracat ve uzak müşteriler için
- Elektrik santralleri veya OSB'ler için hidrojen harmanlama hizmeti: doğalgaz şebekesine belirli oranda hidrojen ekleyerek yakma

- Elektrolizden çıkan yan ürün oksijen, bölgedeki hastanelere veya sanayiye satılabilir, atık ısı ise yakın tesislerin ısı ihtiyacına yönlendirilebilir
- Elde edilen deneyimle, hidrojen tesisi tasarımı, güvenlik, sertifikasyon gibi konularda danışmanlık/hizmet ihracı da iş modeline eklenebilir.

Müşteriler (Off-takers): İş modelinin başarısı için güçlü ve kredi güvenilirliğine sahip müşteriler gereklidir. Bu bağlamda birkaç kategori müşteri tanımlanmıştır.

- **Yerli Sanayi Müşterileri:** TÜPRAŞ İzmit Rafinerisi, Gübre Fabrikaları, Şişecam, Kale Seramik, Erdemir, İÇDAŞ, Limak Çimento, Eti Maden gibi büyük şirketler ile 5-10 yıllık hidrojen tedarik sözleşmeleri yapılması hedeflenebilir. Bu müşterilerle belirlenecek fiyat mekanizması, hidrojenin mevcut yakıt maliyetlerine göre makul primli olmasını sağlayacaktır (örneğin karbon maliyeti de hesaba katılarak)
- **Kamu Kurumları:** BOTAŞ (şebekeye hidrojen karıştırma amaçlı), TCDD (demiryolu yakıtı denemeleri), belediyeler (otobüs yakıtı) gibi kurumlar alıcı olarak sisteme dahil edilebilir. Özellikle kamu, başlangıçta piyasa fiyatının üstünde bir bedelle de olsa alım yaparak piyasayı oluşturabilir.
- **İhracat Müşterileri:** Avrupa'da hidrojen ithalatı için konsorsiyumlar (örn. H2Global Alman alım garantisi programı veya Rotterdam limanı konsorsiyumu) hedeflenebilir. Bu kuruluşlarla ihale veya doğrudan anlaşma yoluyla euro cinsinden uzun vadeli offtake kontratları imzalanabilir. H2Global programı, örneğin, 10 yıl boyunca belirli miktar yeşil amonyağı sabit fiyattan almayı taahhüt eden bir mekanizmadır ve Türk üreticiler bu ihalelere katılacak şekilde pozisyonlanmalıdır [157].

Fiyatlandırma ve Gelir Modeli: Yeşil hidrojenin bugünkü maliyeti yüksek olduğundan, gelir modeli destek mekanizmalarını içermektedir. Yerli satışlarda, karbon kredi gelirleri ve muhtemel yenilenebilir yakıt teşvikleri hesaba katılabilir. Örneğin bir ton yeşil hidrojen kullanarak X ton CO2 emisyonu engelleniyorsa, bunun karşılığı karbon piyasasında satılabilir. Türkiye'de 9 Temmuz 2025 tarihinde yayımlanan "İklim Kanunu" çerçevesinde T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı İklim Değişikliği Başkanlığı tarafından "Türkiye Emisyon Ticaret Sistemi Yönetmeliği Taslağı" yayımlanmış ve hazırlıkları devam eden bu emisyon ticaret sistemi özelinde hidrojen kullanımını teşvik edecek kredi imkânları sunabilir. İhracatta ise AB'nin karbon sınır mekanizması dolayısıyla, yeşil hidrojen ile üretilmiş ürünler (yeşil çelik, yeşil gübre gibi) karbon vergisi ödemeyeceğinden, ihracat müşterileri daha yüksek bedel ödemeye razı olabilirler. İş modelinde 2025-2030 arası için bir hibrit finansman öngörülmektedir. Burada piyasa satış gelirleri, kamu destekleri (örneğin Avrupa'dan hibe veya uygun kredi, Türkiye'den Ar-Ge desteği veya vergi indirimi) ve de yeşil sertifika/karbon kredisi satış gelirleri bileşimi ile nakit akışı sürdürülecektir. 2030 sonrasında hidrojen maliyetlerinin düşmesi ve karbon fiyatlarının yükselmesiyle, iş modelinin saf piyasa koşullarında kârlı hale gelmesi beklenmektedir [156].

Maliyet Yapısı: Başlıca maliyet kalemleri sermaye yatırımının geri ödemesi (elektrolizör, tesis, altyapı amortismanı), elektrik tedariki, işletme-bakım, lojistik (nakliye, depolama) ve insan kaynakları olacaktır. Sermaye yatırımlarının büyük kısmı uzun vadeli düşük faizli kredilerle finanse edilirse (örn. uluslararası kalkınma bankaları), yıllık maliyet yükü azaltılabilir. İşletme maliyetlerinde en büyüğü elektrik olacağı için, mümkün olan en ucuz yenilenebilir elektriği sağlamak kritiktir. Bu yüzden iş modelinde, ucuz kaynak saatlerinde üretim yapıp pahalı saatlerde durabilen esnek bir operasyon planlanmaktadır. Örneğin elektrolizörler gün ortasında güneş bolluğunda tam kapasite, akşam tepe talepte düşük kapasite çalışabilir, böylece elektrik maliyet ortalaması düşebilir. Lojistik maliyetleri için ise ihracat ölçek ekonomisi önemlidir ve tanker gemileriyle büyük hacimde sevkiyat yapıldığında birim taşıma maliyeti düşebilir. Bu nedenle belirli bir eşik üzerinde üretime çıkmak gerekebilir. Bu eşik değerlere ulaşına kadar belki karayolu ile yakın bölgelere satış hedeflenmelidir.

Paydaşlar ve Yönetişim: İş modelinde paydaşlar, üreticiler (enerji şirketleri), tüketiciler (sanayi), yatırımcılar (bankalar, fonlar), düzenleyiciler (kamu otoriteleri) ve destek kurumlardır (kalkınma ajansı, üniversite). Bu paydaşlar arasında şeffaf ve düzenli bir iletişim ve karar mekanizması kurulması önerilir. Örneğin Güney Marmara Hidrojen Yönlendirme Kurulu oluşturulabilir. Bu kurul, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Enerji Bakanlığı, GMKA, BOTAŞ, TEİAŞ, büyük yatırımcı firma temsilcileri ve belki Avrupa ortaklarının temsilcilerinden oluşabilir. Kurul, projenin gidişatını izler, engelleri tespit eder ve çözer, yeni fırsatları değerlendirir. İş modelinin uygulama sürecinde böyle bir yönetim yapısı, kamu-özel diyalogunu kurumsallaştırarak sorunları hızla çözmeye yarayacaktır.

Risk Yönetimi: Hidrojen projesinin riskleri teknoloji, piyasa ve düzenleme başlıklarında toplanabilir. Teknoloji riski (beklenen performansı yakalayamama, teknik arıza vs.) için garanti ve sigorta mekanizmaları devreye konulabilir, büyük elektrolizör tedarikçileriyle “performans garantisi” anlaşmaları yapılabilir. Piyasa riski (fiyat oynaklığı, talep düşüklüğü) için yukarıda bahsedilen alım garantileri ve esnek üretim stratejileri kullanılabilir. Düzenleyici risk (izinler, tarifeler, desteklerin değişimi) için ise kamu ile sürekli temas, uzun vadeli politika perspektifleri geliştirilmesi önemlidir ve mümkün mertebe süregelen destek mekanizmaları talep edilmelidir.

b) Uygulama Yol Haritası

İş modelinin hayata geçirilmesi için kademeli bir yol haritası takip edilecektir. Bu yol haritası kısa (2030'e kadar), orta (2035) ve uzun vadeli (2053) adımları içermektedir.

2025-2030 (Hazırlık ve Pilot Aşaması):

- Ön Fizibilite ve Planlama: 2025 yılında GMKA koordinasyonunda detaylı fizibilite çalışmaları yapılmalıdır (büyük ölçüde bu raporun kapsamı bu amaca yöneliktir). Teknik ve ekonomik model netleştirildikten sonra yer seçimi, kapasite, yatırım ihtiyaçları somutlaşacaktır. 2026'te yerli ve yabancı paydaşlarla istişareler yapılarak iş modeline taahhüt verebilecek kuruluşlar tespit edilmelidir. Örneğin Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile “Hidrojen Yol Haritası” mutabakatı sağlanmalı, TR22 projesi ulusal stratejiye entegre edilmelidir. Aynı dönemde çevresel etki değerlendirmeleri, su kaynakları planlaması (elektroliz için su temini önemli, gerekirse deniz suyu arıtma planlanmalı) yapılmalıdır.
- Pilot Projelerin Devreye Alınması: 2023 yılında HYSouthMarmara projesi başlamıştır [149]. Bu proje kapsamında 500 ton/yıl üretim hedefine ulaşılması, hidrojenin bölgedeki 4 sanayi tesisinde kullanımı sağlanacaktır. Bu proje sonuçları yakından izlenmelidir. Elde edilecek verim, maliyet ve operasyonel deneyim, daha büyük ölçek için fikirler verecektir. Paralel olarak, lojistik için pilot proje yapılması önerilir. Örneğin 2030'a kadar Bandırma'dan Tekirdağ'a tüplü treyler ile hidrojen taşıma denemesi yapılabilir, ya da Çanakkale'den İtalya Trieste Limanı'na küçük ölçekli amonyak ihracat testi (ISO tanker konteyner ile) gerçekleştirilebilir. Bu pilot ölçekli taşımalar uluslararası prosedürlerin prova edilmesini sağlar. Ayrıca 2030'a kadar belediye otobüsü pilot çalışması (Balıkesir veya Çanakkale'de birkaç hidrojen otobüsü ve küçük bir hidrojen dolun istasyonu) gerçekleştirilebilir. Bu sayede kamuoyu farkındalığı da artırılmış olacaktır. Ayrıca Balıkesir ve Çanakkale gibi adalara sahip ve deniz ulaşımının aktif olduğu illerde, şehir içi deniz taşımacılığı için de hidrojenli ulaşım alternatifleri değerlendirilmelidir. Özellikle Çanakkale Boğazı'nda çalışan yolcu ve araç feribotlarında hidrojenle çalışan hibrit ya da tam hidrojenli deniz araçları pilot uygulamalar için uygun bir zemin sunmaktadır. Bu sayede hem karbon emisyonlarının azaltılması hem de alternatif yakıt teknolojilerinin kamuya tanıtımı sağlanabilir. Uygulama sonuçları, deniz taşımacılığı için hidrojenin teknik ve ekonomik fizibilitesine dair önemli veriler sunacaktır.
- Finansman ve Konsorsiyum Oluşturma: 2025-2030'da uluslararası finansman başvuruları yapılmalıdır. Özellikle AB'nin Innovate UK, Horizon Europe, CEB (Council of Europe Bank), EBRD gibi fonlarına proje sunulabilir. Beklenen hidrojen projelerine Türkiye'den katılım fırsatı

varsa, başvuru yapılmalıdır. Yatırım konsorsiyumu da bu dönemde şekillenecektir. Enerji şirketleri ile belki ADNOC, ACWA Power gibi yabancı ortaklar bir araya getirilerek 2030 sonunda “Yatırım Kararı (FID)” alınmalıdır. IEA'nın 2024 raporunda küresel hidrojen projelerinin sadece %7'sinin FID almış olduğu, daha çoğunun finansman beklediği belirtilmiştir [157]. TR22 projesi bu %7'lik dilime giren kararlı bir yatırım olarak öne çıkarılmalıdır.

2035 (İlk Ölçekli Uygulama ve Büyüme Aşaması):

- İnşaat ve Kurulum: 2030 başında ilk büyük ölçekli elektrolizör tesisinin inşaatına başlanabilir. Örneğin Balıkesir Organize Sanayi Bölgesi yakınlarında 50 MW elektrolizör, 100 MW güneş santrali kurulumu 2030-31'de tamamlanabilir. Aynı zamanda Bandırma veya Karabiga'da bir 100 MW rüzgâr çiftliği + 50 MW elektrolizör projesi de hayata geçebilir. 2035 sonuna kadar hedef, toplam 100-150 MW elektroliz kapasitesini işletmeye almaktır. Bu kapasite yılda yaklaşık 15-20 bin ton hidrojen üretme potansiyeline sahiptir.
- Dağıtım Altyapısının Kurulumu: Bu dönemde karayolu ve denizyolu taşımacılığı altyapısı gelişecektir. Bandırma limanında hidrojen tüplü treyler dolun merkezi kurulabilir. Çanakkale'de bir iskelede amonyak yükleme sistemi inşa edilebilir (ilk etapta ISO konteynerlerle gemiye yükleme olabilir). Ayrıca bölge içinde hidrojenin güvenli dağıtımı için karayolları boyunca ikmal ve güvenlik tesisleri planlanmalı (acil tahliye alanları, sensör ağları vb.).
- İlk İhracat: Yol haritasının önemli bir kilometre taşı, ilk yeşil hidrojen ve türevlerinin ihracatının gerçekleşmesidir. 2033 yılı civarında, örneğin Bandırma'dan Rotterdam'a bir kargo yeşil amonyak gönderilebilir. Bu belki 5-10 bin tonluk bir deneme sevkiyatı olacaktır. Böylece Türkiye, hidrojen ihracatçıları arasında yerini alır. Eğer H2Global gibi bir programa kabul olunmuşsa, bu ihracatın ekonomik getirisi de önceden garanti edilmiş olur. Hamburg'da 2026'da kurulacak amonyak terminali de Türkiye'den kargo kabul etmeye başlayabilir [6] ve Alman hükümeti Suudi Arabistan ve Avustralya gibi ülkeler yanında Türkiye'den de tedarik isterse, 2033-2035 arası sevkiyatlar yapılabilir.
- İç Pazarda Büyüme: 2025 sonrası dönemde iç pazarda da talep artışı beklenmektedir. TÜPRAŞ, 2030 gibi rafinerilerinde %5-10 yeşil hidrojen kullanmak isteyebilir; bu durumda TR22'den yılda onbinlerce tonluk hidrojen veya amonyak tedariki gündeme gelir. Yol haritası, 2035'a kadar en az 3 büyük sanayi tesisinin fosil hidrojen yerine yeşil hidrojen kullanmasını hedeflemelidir (örn. 1 rafineri, 1 gübre fabrikası, 1 cam fabrikası). Bu dönüşüm için gerekli modifikasyon yatırımları, kamu destekleriyle bu dönemde yapılmalıdır. Örneğin cam fırınları için Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı özel hibe programı başlatabilir.
- Düzenleyici Adımlar: 2025-2030 arasında Türkiye'nin hidrojenle ilgili yasal çerçevesi oluşturulmalıdır. 2026'da bir kapsamlı Ulusal Hidrojen Stratejisi yayınlanmalı, 2027'de hidrojenin enerji piyasalarına entegrasyonu için EPDK gerekli düzenlemeleri yapmalıdır. Bu adımlar, TR22 projesinin önünü açacak kritik kararlar olacaktır. Özellikle güvenlik standartları, taşıma yönetmelikleri, vergi teşvikleri gibi konular netleşmelidir. Aksi halde saha uygulamalarında belirsizlikler devam edebilir.
- Takip ve Düzeltme: Yol haritası esnek olmalıdır, 2025-2035 arası elde edilen deneyimlere göre gerekirse rotada düzeltme yapılır. Örneğin piyasa hidrojen yerine daha çok amonyak talep ediyorsa, yeni yatırımlar hidrojen yerine amonyak sentezine kaydırılabilir. Veya teknoloji beklenenden hızlı geliştirse (mesela yeni bir elektroliz teknolojisi çıkması, %20 daha ucuz), planlar buna adapte edilebilir. Bu amaçla 2029'da bir ara değerlendirme raporu hazırlanmalı ve 2030 sonrası için ikinci aşama planı revize edilmelidir.

2035-2053 (Olgunlaşma ve Entegrasyon Aşaması):

- Ölçek Büyütme: 2030'da dünyada hidrojen piyasası artık daha olgun hale gelmiş olacaktır. AB'nin 10 milyon ton ithalat hedefi o dönemde revize edilip belki 2040'a 20-30 milyon tonlara

çıkabilir. Bu bağlamda TR22 de kapasitesini büyütme devam etmelidir. 2035'e kadar hedef, en az 1 GW elektroliz kapasitesine ulaşmak olmalıdır. Bu da yıllık ~180 bin ton üretim demektir. Bunun önemli kısmı ihracata gidebilir. 2035'lerin ortasında, talep durumuna göre, belki boru hattı ihracatı da devreye girebilir. Avrupa Hidrojen Omurgası (European Hydrogen Backbone) planına göre 2035 sonrasında Türkiye-Avrupa hidrojen bağlantısı öngörülüyor olabilir. O zaman, TR22'deki hidrojen Marmara üzerinden Trakya'ya iletilip Avrupa şebekesine gönderilebilir.

- Tam Entegrasyon: 2035'lerin sonunda TR22 hidrojen ekosistemi tam entegre bir yapıya kavuşmalıdır. Yani yenilenebilir santraller, elektroliz tesisleri, hidrojen depoları, boru hatları, sanayi tüketim noktaları ve liman ihracat terminali hepsi bağlanmış olmalıdır. Bir yerde üretim aksarsa, başka bir yerden denge sağlanabilir ve esneklik artar. Bölge içi hidrojen boru hattı ağı 2035'lerin ortasında gerçekçi hale gelecektir. Örneğin Balıkesir-Bandırma-İzmit arasında bir hat veya Çanakkale-Biga-Bandırma arası mini bir şebeke kurulabilir. Bu şebeke, hem iç tüketicilere hidrojen dağıtır hem de ihracat terminaline besleme yapabilir.
- Rekabetçi Üretim ve Maliyet İyileşmesi: 2035'lerin sonunda yeşil hidrojenin üretim maliyetinin düşük karbon politikalarıyla daha ucuza inmesi beklenir [156]. Bu olduğunda artık sübvansiyon gereği azalacaktır ve TR22'deki tesisler serbest piyasada kâr eden işletmeler haline gelecektir.
- Yeni Teknolojilerin Entegrasyonu: Uzun vadede, belki füzyon enerjisi veya küçük modüler nükleer reaktörler (SMR) devreye girerse, hidrojen üretimine yeni temiz elektrik kaynakları eklenebilir. Veya yüksek sıcaklıklı termo-kimyasal hidrojen üretimi gibi yenilikler gelirse, TR22 bunları pilot olarak test eden bölge olabilir. Bu sebeple yol haritası, esnek bir çerçevede yeni teknolojilere açık olmayı planlamalıdır.
- Uluslararası Liderlik: 2053'lere gelindiğinde Türkiye, belki de hidrojen ihracatçıları arasında saygın bir yere ulaşacaktır. TR22'nin hikayesi, diğer bölgelere de örnek teşkil edebilir (örneğin Orta Anadolu'da güneş-hidrojen hub'ı, Doğu Anadolu'da hidrojen depolama projeleri gibi). Bu noktada TR22'nin işletme modeli ihracat dışında know-how ihracı da yapabilir. Konsorsiyum, yurt dışında hidrojen proje ihalelerine girebilir (MENA bölgesinde vs.). Böylece Türkiye sadece ürün değil uzmanlık ihraç eder konuma gelebilir.

c) Başarı Kriterleri ve İzleme

Yol haritasının başarıyla uygulanması için belirli başarı kriterleri tanımlanmıştır ve bunların düzenli olarak izlenmesi gerekmektedir. Örneğin:

- 2030 sonu en az 5 MW elektroliz kapasitesi devrede, yılda ~800 ton yeşil hidrojen üretimi gerçekleşmiş olmalıdır. Hidrojen vadisi projesinde hedeflenen 500 ton/yıl üretim başarıyla tamamlanmalıdır. En az 2 farklı endüstriyel tesiste (ör. cam ve seramik) hidrojen kullanımı test edilmiş olmalı. İlk küçük ölçekli amonyak ihracatı denemesi yapılmış olmalıdır.
- 2035'te toplam >150 MW elektroliz kapasitesi kurulmuş olmalı (yıllık ~20 bin ton H₂ üretimi). Bunun %50'si yurt içinde tüketilirken %50'si amonyak/metanol formunda ihraç ediliyor ve Bölgedeki sanayi tesislerinde fosil hidrojene talep %10 oranında yeşil hidrojenle ikame edilmiş olmalıdır. Rotterdam veya Hamburg'a düzenli amonyak sevkiyatı başlamış ve Türkiye, AB'nin 10 milyon tonluk ithalat hedefinin bir parçası olacak seviyeye gelmelidir. Hidrojen maliyeti ~4-5 \$/kg bandına düşmüş, karbon kredileri ile birlikte ekonomik olarak cazip hale gelmeye başlamış olmalıdır.
- 2040'ta >500 MW elektroliz kapasitesi devrede olmalıdır (yıllık ~75 bin ton H₂). Marmara Bölgesi'nde bölgesel hidrojen boru hattı hayata geçirilmeli, en az bir yerli boru hattı segmentinde %100 hidrojen taşınması test edilmiş olmalıdır. European Hydrogen Backbone'a Türkiye'nin entegrasyonu sağlanmalı, TR22 çıkışlı hidrojen Bulgaristan üzerinden Avrupa şebekesine veriliyor (eğer boru bağlantısı kurulmuşsa) veya denizyoluyla yılda >0,5 milyon

ton amonyak ihracatı yapıyor olmalıdır. Bölgedeki sanayide hidrojen kullanım oranı %25'i geçecek seviyeye gelmelidir. Yeşil hidrojenin maliyeti karbon fiyatları dahilinde gri hidrojenle eşitlenecek düzeye gelmiş olmalıdır (~2-3 \$/kg efektif).

- 2053'te ≥ 1 GW elektroliz kapasitesi (yıllık ~150 bin ton H₂) ile TR22 tam anlamıyla bir hidrojen hub'ı haline gelmiş, üretilen hidrojenin önemli bir kısmı yüksek katma değerli ürünlere (yeşil çelik, yeşil kimyasallar) dönüştürülerek ihraç ediliyor ve Türkiye'nin hidrojen ihracatı yıllık 1 milyon ton mertebesine yaklaşmış olmalıdır (2053 hedefi doğrultusunda) [148]. Bu sayede TR22 modeli, Türkiye'nin diğer bölgelerinde de benzer merkezlerin kurulmasına öncülük etmiş ve bölge ekonomisi içinde hidrojen ve türevlerinin payı %10'lar düzeyine ulaşmış, binlerce kişiye istihdam sağlanıyor olmalıdır.

Bu metrikler ve zaman çizelgesi, düzenli aralıklarla gözden geçirilmeli ve gerektiğinde revize edilmelidir. İzleme için her yıl ilerleme raporu, her 5 yılda bir stratejik değerlendirme yapılması önerilir. Örneğin 2030, 2035, 2053 yıllarında bağımsız denetçiler veya akademisyenlerce projenin başarısı, çevresel performansı, ekonomik etkileri değerlendirilip kamuoyuyla paylaşılmalıdır. Bu şeffaf izleme, güvenilirliği artıracak ve yatırımların devamını teşvik edecektir.

5.3.5. Sonuç ve Öneriler

TR22 Güney Marmara Bölgesi'nin hidrojen üretim ve dağıtım üssü olarak geliştirilmesi, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefi ve enerji dönüşümü yolculuğunda stratejik bir hamledir. Mevcut durum analizi, bölgenin yüksek yenilenebilir kapasitesi, sanayi altyapısı ve lojistik avantajlarıyla bu role uygun olduğunu göstermiştir. Pazar erişimi açısından hem yakın bölgelerle entegrasyon hem de Avrupa ile iş birliği mümkündür; özellikle Rotterdam, Hamburg gibi hub'lara ihracat potansiyeli güçlüdür. Ekonomik analiz, hidrojen sektörünün bölgeye yeni yatırımlar, istihdam ve değer zinciri genişlemesi getireceğini ortaya koymaktadır. Başarılı bir uygulama için kamu-özel iş birliği modellerinin akıllıca tasarlanması, risklerin paylaşılması ve kademeli bir yol haritasının izlenmesi şarttır. Bu rapor çerçevesinde geliştirilen iş modeli ve yol haritası, somut adımları ve sorumluları tanımlamıştır. Buna göre kısa vadede pilot projelerin sonuçlandırılması, orta vadede ölçekli yatırımlara geçilmesi ve uzun vadede uluslararası entegre bir hidrojen merkezi olunması hedeflenmektedir. Bu hedeflere ulaşmak için önerilen bazı kritik aksiyonlar şunlardır:

- Türkiye çapında kapsamlı bir Ulusal Hidrojen Stratejisi'nin vakit kaybetmeden yayımlanması ve TR22'nin pilot bölge olarak desteklenmesi
- Yatırım finansmanı için AB, uluslararası finans kuruluşları ve özel sektörle koordinasyonun sağlanması ve gerekirse yedek finansman planları hazırlanması
- Hidrojen değer zincirindeki düzenlemelerin (güvenlik, sertifikasyon, şebeke entegrasyonu vb.) ivedilikle tamamlanması
- TR22'deki projelerin ilerlemesi için yerel paydaşlar (valilik, belediyeler, üniversiteler) arasında düzenli koordinasyon mekanizması oluşturulması
- Kamuoyunun ve bölge halkının bilinçlendirilmesi, sosyal kabulün artırılması, örneğin halka yönelik bilgilendirme toplantıları, yerel istihdam önceliği gibi adımlarla projelerin sosyal sürdürülebilirliğinin sağlanmasıdır.

Sonuç olarak, Güney Marmara'da bir hidrojen üssü kurulması, Türkiye'nin enerji tarihinde yeni bir sayfa açabilir. Bu sayfa, fosil yakıtlardan arınmış, yüksek katma değerli ve dışa bağımlılığı azalmış bir endüstriyel büyüme hikâyesidir. Rotterdam'ın 1600'larda ticaretle başlayan, 1900'larda petrol ile büyüyen serüvenine benzer şekilde, Bandırma-Çanakkale hattı da 21. yüzyılda yeşil hidrojen ile anılan bir kalkınma koridoru haline gelebilir. Bu raporda sunulan analiz ve öneriler, söz konusu vizyonun gerçekleştirilmesi yolunda bir rehber niteliğindedir. Önemli olan, tüm paydaşların ortak

irade ve iş birliğiyle bu yol haritasını hayata geçirmek için vakit kaybetmeden çalışmaya başlamasıdır.

5.4. Sanayinin Temiz Dönüşümüne Yönelik Mevcut Uluslararası Teşvik Sistemleri ve Yeni Teşvik Mekanizmaları Önerileri

5.4.1. Sanayinin Temiz Dönüşümüne Yönelik Mevcut Uluslararası Teşvik Sistemleri

Sanayinin temiz enerjiye geçişini hızlandırmak ve temiz hidrojen gibi düşük karbonlu çözümleri yaygınlaştırmak amacıyla dünya genelinde çok çeşitli teşvik mekanizmaları uygulanmaktadır. Hidrojen, özellikle çelik, kimya gibi karbon yoğun sektörlerin ve ağır taşımacılığın karbondan arındırılmasında kilit rol oynamaktadır. Küresel ölçekte hidrojen projelerine yönelik kamu ve özel sektör yatırımlarının 2030 yılına kadar 300 milyar ABD dolarını aşacağı öngörülmektedir [158]. Birçok ülke ve bölge, doğrudan sübvansiyonlar, vergi indirimleri, hibe programları ve düzenleyici kolaylıklar gibi araçlarla temiz hidrojen üretim ve kullanımını teşvik etmektedir. İlerleyen bölümlerde, uluslararası, ulusal ve bölgesel düzeylerde öne çıkan teşvik sistemleri ve destek unsurları incelenmiştir.

a) Avrupa Birliği'nde Temiz Hidrojen Teşvikleri

Avrupa Birliği (AB), 2050'ye kadar iklim nötr olma hedefi doğrultusunda temiz hidrojeni kritik bir bileşen olarak konumlandırmıştır. AB, 2030 yılına kadar 10 milyon ton yeşil hidrojen üretilip 10 milyon ton ithal etmeyi planlamakta ve bu doğrultuda 86-126 milyar € arasında bir altyapı yatırımına ihtiyaç duyulacağını öngörmektedir [159]. Bu hedeflere ulaşmak için AB düzeyinde çok sayıda finansman programı ve girişim devreye alınmıştır. Özellikle AB Hidrojen Stratejisi ile hidrojenin enerji dönüşümündeki rolü vurgulanmış; araştırma, üretim, altyapı ve tüketim ayağında kapsamlı destek politikaları belirlenmiştir [160].

AB çapındaki teşvik mekanizmaları, hibe programları, kredi destekleri ve piyasa bazlı araçlar kombinasyonu ile ilerlemektedir. Örneğin Ufuk Avrupa (Horizon Europe) programı altında kurulan Clean Hydrogen Partnership (Temiz Hidrojen Ortaklığı), kamu-özel sektör iş birliğiyle hidrojen AR-GE projelerini fonlamaktadır [159]. İnovasyon Fonu, Emisyon Ticaret Sistemi gelirleriyle desteklenen dünyanın en büyük temiz teknoloji fonlarından biri olup yenilikçi düşük karbonlu hidrojen üretim projelerine hibe sağlamaktadır [159]. 2023 itibarıyla İnovasyon Fonu bünyesinde Avrupa Hidrojen Bankası inisiyatifiyle, yenilenebilir hidrojen üreticilerine 10 yıla kadar işletme primi ödemek üzere ilk AB çaplı hidrojen ihalesi başlatılmıştır. Bu ihale mekanizması, üretilen yeşil hidrojen için kg başına sabit bir prim ödeyerek fiyat farkını kapatmayı hedefleyen bir tür sözleşme karşılığı fark ödemesi modelidir.

Büyük ölçekli ve riskli projeleri desteklemek üzere AB, Important Projects of Common European Interest (IPCEI) girişimini hayata geçirmiştir. IPCEI çerçevesinde Temmuz 2022'de onaylanan Hy2Tech projesi kapsamında 15 ülkede 41 hidrojen teknolojisi projesine 5,4 milyar € kamu desteği sağlanacak olup bu sayede 8,8 milyar € ilave özel yatırımın önü açılacaktır [159]. Eylül 2022'de onaylanan ikinci IPCEI (Hy2Use), 13 ülkede 35 projeye 5,2 milyar € kamu desteği ile 7 milyar € özel yatırım hedeflemektedir [159]. Bu kapsamlı projeler, elektrolizör üretimi, yakıt hücresi inovasyonu, hidrojen altyapısı gibi alanlarda sınır-ötesi iş birliklerini içererek ölçek ekonomisi yaratmayı amaçlamaktadır.

AB'nin altyapı odaklı fonları da temiz hidrojene yönelmiştir. Connecting Europe Facility (CEF) enerji ve ulaştırma bileşenleri, sınır ötesi hidrojen boru hatları, depolama tesisleri ve ulaştırmada hidrojen ikmal istasyonları projelerini destekleyebilmektedir [159, 160]. InvestEU programı ve European Investment Bank (EIB), daha riskli görülen hidrojen projelerine kredi ve garanti desteği sunarak özel finansmanı harekete geçirmektedir. Özellikle EIB, hidrojen altyapısı ve elektrolizör tesisleri için düşük faizli krediler ve danışmanlık desteği vermektedir.

AB'nin Rekabetçilik ve Yapısal Fonları da temiz enerji dönüşümünü gözeterek hidrojen projelerini desteklemektedir. Üye ülkelerin yeşil dönüşümünü hızlandırmak amacıyla ayrılan

NextGenerationEU kurtarma fonları ve European Regional Development, Cohesion Fund Fonu kaynaklarından, birçok üye ülke ulusal hidrojen projelerine bütçe ayırmıştır. Örneğin İtalya, İspanya ve Fransa, COVID-19 sonrası toparlanma programları kapsamında elektrolizör kurulumları, hidrojen yakıtlı ulaştırma ve sanayide yeşil hidrojen kullanımı projelerine milyar avro ölçeğinde hibeler tahsis etmiştir. AB'nin Just Transition Fund ve Modernisation Fund gibi araçları da fosil yakıtlardan çıkış sürecinde zorlanan bölgelerde hidrojen ve yenilenebilir enerji projelerini desteklemeye yönelik olduğu görülmektedir.

Üye ülkeler düzeyinde de kayda değer teşvik programları bulunmaktadır. Almanya, Ulusal Hidrojen Stratejisi kapsamında temiz hidrojene 9 milyar € kamu yatırım paketi açıklamıştır [161]. Bu bütçenin 2 milyar €'su uluslararası hidrojen ortaklıklarına ayrılmış, 7 milyar € ile yurtiçinde yeşil hidrojen üretim kapasitesinin 2030'a kadar 5 GW'tan 10 GW'a çıkarılması hedeflenmiştir. Almanya, ayrıca H2Global adlı mekanizma ile yeşil hidrojen ve türevlerinin ithalatını desteklemek için ihale bazlı bir fiyat garantisi sistemi kurmuştur. Bu sistem, Alman hükümet fonlarından desteklenen bir vakıf aracılığıyla yeşil hidrojen tedarikçileri ile sanayi müşterileri arasında uzun vadeli sözleşmeler yapıp fiyat farklarını karşılayarak uluslararası projeleri teşvik etmektedir. Fransa, benzer şekilde, 2020'de başlattığı hidrojen planına 2030'a kadar 7,2 milyar € kamu kaynağı ayırmıştır [162]. Bu kaynakla 6,5 GW elektrolizör kapasitesi kurulumu, sanayide kullanılan gri hidrojenin yeşil hidrojenle ikamesi ve yakıt hücreli ağır vasıta filolarının geliştirilmesi hedeflenmektedir. Hollanda, SDE++ sübvansiyon programı ile karbon emisyonu azaltımını esas alarak elektrolizörle hidrojen üretimini yıllık bazda desteklerken; İspanya ve Portekiz, zengin yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak yeşil hidrojen ihracatçısı olma vizyonu ile vergi teşvikleri ve altyapı yatırımları planlamaktadır. Birleşik Krallık da AB dışındaki Avrupa örneği olarak 2021'de Ulusal Hidrojen Stratejisini açıklamış; 2030 için 10 GW düşük karbonlu hidrojen üretim hedefi koyarak Net Sıfır Hidrojen Fonu (240 milyon £) ve yakında devreye girecek bir Hidrojen İş Modeli (fiyat garantili alım anlaşmaları tarzında) ile üreticilere destek hazırlamıştır.

Genel olarak Avrupa'da kamu destekleri (hibe, kredi, yatırım teşviki) ile düzenleyici önlemler (yenilenebilir yakıt kotaları, emisyon fiyatlandırması, karbon sınır mekanizması) birlikte uygulanarak temiz hidrojen piyasasının oluşturulması amaçlanmaktadır. Örneğin AB'nin 2023'te yürürlüğe koyduğu Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), karbon yoğun ürün ithalatına maliyet getirerek Avrupa sanayisini yeşil hidrojene ve düşük karbonlu üretime geçmeye teşvik edecektir [160]. Ayrıca AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) kapsamındaki karbon fiyatları, fosil hidrojen (gri hidrojen) kullanımını pahalı hale getirdiğinden, dolaylı yoldan yeşil hidrojen gibi alternatifleri ekonomik açıdan daha cazip kılmaktadır. Tüm bu araçlar, sanayinin temiz dönüşümünü hızlandırmak üzere bir ekosistem yaklaşımıyla devrededir.

b) ABD ve Kuzey Amerika'daki Teşvikler

Amerika Birleşik Devletleri (ABD) son yıllarda temiz hidrojen alanında en iddialı teşvik paketlerinden birini uygulamaya koymuştur. 2021'de kabul edilen Alt Yapı Yatırım ve İstihdam Yasası (IIJA), hidrojen ekonomisine yönelik büyük çaplı kamu yatırımlarını başlatmıştır. Bu yasa kapsamında temiz hidrojen üretim merkezleri (Hydrogen Hubs) için 8 milyar \$, karbon yakalama projeleri için 8 milyar \$ ve elektrolizör AR-GE ve üretimi için 2 milyar \$ olmak üzere toplam ~20 milyar \$ fon ayrılmıştır [161]. Ekim 2023'te ABD Enerji Bakanlığı, ülke genelinde yedi bölgesel hidrojen merkezi kurulumu için bu fonlardan ilk dilimi tahsis etmiş ve her bir merkezde üretilecek hidrojenin, tesis bölgelerinde temiz yakıt ve hammadde olarak kullanılmasını hedeflemiştir. Örneğin Kaliforniya merkezli ARCHES hidrojen hub'ı, 1,2 milyar \$ federal destek alarak yenilenebilir kaynaklardan yılda onbinlerce ton yeşil hidrojen üretmeyi ve bunu toplu taşıma ile ağır taşımacılıkta kullanarak yılda 2 milyon ton CO₂ emisyonunu azaltmayı planlamaktadır [162]. Bu merkezler, devlet-özel sektör ortaklıklarıyla hayata geçirilmekte ve uzun vadede hidrojen arz-talep altyapısını oluşturup maliyetleri düşürmeyi amaçlamaktadır.

ABD'de 2022'de yürürlüğe giren Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) ise temiz hidrojen üretimi ve kullanımına yönelik en güçlü mali teşvikleri içermektedir. IRA kapsamında sağlanan 45V Maddesi

Temiz Hidrojen Üretim Vergi Kredisi, karbon yoğunluğuna bağlı olarak üretilen hidrojen başına kg başına 3,00 \$'a varan destek sağlamaktadır [163]. Bu kredi, tesis faaliyete geçtikten sonraki 10 yıl boyunca geçerli olup 2033 sonuna kadar inşaata başlayan yeni veya retrofit tesisler faydalanabilecektir [163]. 45V kredisi, sera gazı emisyonu 0,45 kg CO₂/kg H₂ altına inen (yeşil hidrojen) üreticilere en yüksek tutarı vermekte, daha yüksek emisyonlu mavi hidrojen gibi yöntemlere kademeli olarak daha düşük bir kredi sağlamaktadır [163]. Bu ölçüt sayesinde, hidrojen üreticilerinin daha temiz yöntemlere yönelmesi teşvik edilmektedir. Söz konusu üretim kredisi "açık uçlu" olup üretilen miktar sınırı bulunmaksızın hak edilebilir; bu yönüyle dünyadaki en cömert hidrojen teşviklerinden biri olarak değerlendirilmektedir. IRA ayrıca fosil kaynaklı hidrojen üretiminde karbon yakalamayı özendirmek amacıyla 45Q Karbon Yakalama Kredisini ton başına 50 \$ seviyesine yükselterek 2033'e kadar uzatmıştır [160]. Bu sayede doğal gaz veya kömürden hidrojen üreten tesislerin karbon emisyonlarını depolaması için mali teşvik sunulmaktadır. Bunlara ek olarak, IRA kapsamında temiz enerji yatırımlarına yönelik %30 yatırım kredisi (ITC), temiz yakıtlı ticari araç kredileri (45W, ağır vasıtalar için 40 bin \$'a kadar), alternatif yakıt dolmuş istasyonu kredisi (30C, istasyon başına 100 bin \$'a kadar) gibi birçok destek unsuru da güncellenmiş veya yeni oluşturulmuştur [163]. Örneğin hidrojen yakıt ikmal istasyonları, artık 2032'ye kadar yatırım maliyetinin %30'u oranında vergi kredisi alabilecektir. Yine yakıt hücreli elektrikli araçlar, IRA ile birlikte bireysel tüketici için 7.500 \$'lık vergi kredisinden (30D) ve filolar için araç başına 40 bin \$'a varan ticari araç kredisinden yararlanabilir hale gelmiştir [163].

ABD'deki teşvikler sadece federal düzeyle sınırlı değildir. Eyalet yönetimleri de kendi destek programlarını uygulamaktadır. Özellikle Kaliforniya, hidrojen ve yakıt hücreli araçlar için en aktif eyaletlerden biridir. Kaliforniya eyaletinin Sıfır Emisyonlu Araç (ZEV) Programı, 2035 itibarıyla yeni içten yanmalı motorlu araç satışını yasaklayarak elektrikli ve yakıt hücreli araçların önünü açmıştır. Ayrıca Kaliforniya'nın The Low Carbon Fuel Standard (LCFS) kapsamında yeşil hidrojene karbon kredileri verilmesi, hidrojenin ulaşım yakıtı olarak ekonomik değerini artırmaktadır. Bunun yanı sıra birçok eyalet, hidrojen üretim tesisleri ve dolmuş altyapısı için yatırım kredileri, işletme sübvansiyonları veya kamu-özel ortaklığı modelleri geliştirmiştir. Örneğin New York, Teksas gibi eyaletler yakıt hücreli forklift, otobüs gibi uygulamalara hibe programları sunarken; Hawaii ve Ohio gibi eyaletler hidrojen karışımı gaz türbinleri ve depolama projelerine destek fonları ayırmıştır. ABD genelinde mevcut eyalet teşviklerini takip etmek üzere Enerji Bakanlığı, The Alternative Fuels Data Center (AFDC) ve DSIRE veri tabanlarını sürekli güncelleyerek yatırımcılara bilgi sağlamaktadır [163].

Kanada da hidrojen desteklerinde önemli adımlar atmaktadır. Federal hükümet 2022'de temiz hidrojen üretimine yönelik %40'a varan bir vergi kredisi oluşturmuş ve 5 milyar CAD tutarında bir Temiz Yakıt Fonunu devreye sokmuştur. Ayrıca Kanada'nın stratejisi, petrol ve gaz sektörünün dönüşümüne yönelik hidrojen projelerine sübvansiyonlar ve Alberta gibi eyaletlerde karbon depolama altyapısına yatırımları içermektedir. Örneğin Air Products şirketi, Alberta'da kurulacak devasa mavi hidrojen tesisi için Kanada devletinden hem doğrudan yatırım desteği hem de karbon yakalama kredilerinden faydalanmaktadır.

Genel olarak Kuzey Amerika'da vergi kredileri ve hibe programları, temiz hidrojen üreticilerine uzun vadeli bir finansal avantaj sağlamaya odaklanmıştır. ABD ve Kanada, yenilikçi özel sektör girişimleriyle de iş birliği içinde olarak hidrojen ekonomisini ölçeklendirmeyi amaçlamaktadır. Bunun bir örneği, ABD Enerji Bakanlığı'nın 2024 başında duyurduğu özel sektör ortaklığıyla yürütülecek talep garantileme programıdır; bu program, üretilen temiz hidrojen için alıcı garantileri oluşturarak projelerin finansmanını kolaylaştırmayı hedeflemektedir [164]. Böylece kamu desteği, sadece arz tarafında değil talep tarafında da güvence sunarak özel yatırımların önünü açmaktadır.

c) Asya-Pasifik Ülkelerinde Teşvik Mekanizmaları

Japonya

Japonya, temiz hidrojen ekonomisinin geliştirilmesinde öncü ülkelerden biridir. 2017'de yayınladığı Temel Hidrojen Stratejisi ve sonraki yıllarda güncellediği yol haritaları ile 2030 ve 2050 hedeflerini

netleştirerek kapsamlı bir teşvik çerçevesi oluşturmuştur. Japon hükümeti, 2030'a kadar hidrojen maliyetlerini önemli ölçüde düşürmek ve yıllık 3 milyon tonluk hidrojen pazarı oluşturmak amacıyla 2 trilyon Yen'lik (yaklaşık 18 milyar \$) Yeşil İnovasyon Fonu'nu devreye almıştır [7]. Bu fon kapsamında büyük ölçekli elektrolizör projeleri, uluslararası hidrojen tedarik zinciri demonstrasyonları (ör. Avustralya'dan sıvı hidrojen ithalatı gibi) ve karbonsuz amonyak kullanım projeleri desteklenmektedir [165].

Japonya'nın teşvik politikaları hem üretim hem tüketim tarafını kapsamaktadır. 2023 yılında yürürlüğe giren Hydrogen Basic Act ile hükümet, temiz hidrojen üreticilerine fiyat farkı sözleşmesi (CfD) tarzı sübvansiyonlar sağlamaya hazırlanmaktadır [166]. JOGMEC adlı enerji güvenliği kurumu aracılığıyla işletilecek bu mekanizma, yeşil hidrojenin piyasa fiyatı ile hedef maliyet arasındaki farkın kamu tarafından karşılanmasını öngörmektedir [166]. Nitekim 2023 sonunda duyurulan 20 milyar \$ bütçeli hidrojen destek programına, yerli ve uluslararası birçok firma başvuruda bulunmuş ve talep beklentinin çok üzerinde gerçekleşmiştir. Bu kapsamda ilk sübvansiyon tahsislerinin 2025 itibarıyla yapılması ve hem yurt içi üretime hem de ithal amonyak gibi hidrojen türevlerine destek verilmesi planlanmaktadır.

Ar-Ge ve pilot projeler Japonya'nın önemli destek unsurlarındandır. METI (Ekonomi, Ticaret ve Sanayi Bakanlığı) ve NEDO gibi kuruluşlar, her yıl yakıt hücresi, elektrolizör, hidrojen depolama ve taşıma teknolojilerine yönelik çağrılar açarak hibe programları yürütmektedir. Japonya, uluslararası ortaklıklara da yatırım yapmaktadır; Avustralya, Brunei gibi ülkelerle hidrojen tedarik zinciri projeleri, ayrıca Hydrogen Energy Ministerial gibi çok taraflı girişimler aracılığıyla bilgi paylaşımı yapmaktadır.

Hidrojenin ulaşım sektöründe benimsenmesi için Japonya cömert teşvikler sunmuştur. 2010'ların ortasından itibaren yakıt hücreli binek araç (Toyota Mirai vb.) satın alımları için 2 milyon Yen'e varan devlet sübvansiyonları verildi. Hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının yaygınlaştırılması amacıyla işletmeciler firmalara sermaye desteği (%50'ye varan hibe) ve işletme maliyeti desteği sağlandı. Son dönemde Japonya, özellikle ticari taşıtlara (otobüs, kamyon) odaklanarak hidrojen kullanımını arttırmaya çalışmaktadır. 2025 yılı itibarıyla hükümet, seçilen 6 bölgedeki (Tokyo, Aichi vb.) yakıt hücreli otobüs ve kamyon filolarına uygun altyapıyı kurmak üzere istasyon bazlı teşviklere başlamıştır [167]. Bu kapsamda hidrojen yakıt fiyatını dizel ile rekabetçi kılmak için, yakıt dolum maliyetinin %75'ine kadar devlet sübvansiyonu sağlanacak; bu da hidrojenin litre eşdeğeri fiyatını yaklaşık 700 Yen/kg (4,8 \$/kg) düşürerek taşımacılık şirketlerini yakıt hücreli araçlara geçişe özendirilecektir [167]. Büyük bir hidrojen kamyonunun tam dolumunda yaklaşık 21.000 Yen (144 \$) tasarruf edilmesi öngörülmektedir [167]. Bu teşvik, Japon üreticiler (Toyota, Hino, Isuzu vb.) tarafından geliştirilen hidrojen kamyonlarının pazara girişini hızlandıracak ve 2030'a kadar 17.000 adet ticari hidrojenli araç hedefinin tutturulmasına yardımcı olacaktır.

Japonya ayrıca hidrojen yakıt hücreli güç üretimi ve ısıtma uygulamalarını desteklemektedir. ENE-FARM programı ile konut tipi yakıt hücresi sistemlerinin yaygınlaşması için kullanıcı başına sübvansiyonlar verilmiş; havalimanları, limanlar gibi alanlarda hidrojen yakıtlı forklift, ulaşım araçları pilotları fonlanmıştır. 2023'te hükümet, termik santrallerde amonyak birlikte yakma ve gelecekte %100 amonyak yakıtlı termik santral demosu için de mali destek planladığını açıklamıştır. Tüm bu adımlar, Japonya'nın 2050'de yılda 20 milyon ton hidrojen tüketim hedefini ve enerji arzının %10'unu hidrojen/amonyakla karşılama planını destekleyici niteliktedir.

Güney Kore

Güney Kore, 2020 yılında çıkardığı Hidrojen Ekonomisi Teşvik ve Hidrojen Güvenliği Yasası ile dünyada hidrojen konusunda kapsamlı bir yasal çerçeve oluşturan ilk ülke olmuştur. Bu yasa ve bağlı stratejiler (Hidrojen Ekonomi Yol Haritası gibi) çerçevesinde Kore hükümeti, 2040'a kadar 6 milyon yakıt hücreli araç, 1200 hidrojen istasyonu ve elektrik üretiminde 15 GW yakıt hücre kapasitesi hedeflerini ortaya koymuştur. Bu iddialı hedefleri desteklemek için çeşitli teşvik unsurları devrededir:

Öncelikle, hidrojenle ilgili Ar-Ge ve yatırımlar “ulusal stratejik teknoloji” kategorisine alınmıştır [158]. Su elektrolizi, yakıt hücresi, karbon yakalama gibi kritik teknolojiler bu kapsamda belirlendiğinden, özel şirketler bu alanlardaki Ar-Ge harcamaları ve tesis yatırımları için arttırılmış vergi kredileri almaktadır [158]. Örneğin, ulusal stratejik teknoloji statüsü sayesinde büyük firmalar, ilgili yatırımlarının %30-40'ına varan vergi indirimi alabilmektedir. Bu sayede Hyundai, SK, Posco gibi devlerin hidrojen projelerine önemli mali kolaylık sağlanmıştır.

Güney Kore, araç ve altyapı teşviklerinde de agresif bir politika izlemektedir. Devlet, bireysel yakıt hücreli araç alıcılarına yaklaşık ₩30 milyon (25.000 \$) düzeyinde sübvansiyon vermekte; bu sayede hidrojenli araçların fiyatı benzinli muadillerine yaklaştırılmaktadır. Benzer şekilde hidrojen otobüsleri şehir filolarına kazandırmak için merkezi hükümet ve yerel yönetimler %50-80 oranında araç hibe desteği sunmaktadır. Hidrojen dolum istasyonları, Kore'de yüksek maliyetli yatırımlar olduğundan, her bir istasyon için inşa maliyetinin ₩1,5-3 milyarının (~1-2 milyon \$) devlet tarafından karşılandığı programlar yürütülmektedir. Bu sayede 2023 sonu itibarıyla ülkede 200'ün üzerinde hidrojen istasyonu faaliyete geçmiştir.

Sanayi ve elektrik üretimi tarafında ise Kore, hidrojen kullanımını artırmak için piyasa bazlı mekanizmalar geliştirmektedir. 2022'de duyurulan Hidrojen Portföy Standardı (HPS) taslağı, elektrik üreticilerine belirli oranda yeşil hidrojen veya amonyak kullanma yükümlülüğü getirmeyi öngörmektedir. Ayrıca halihazırda uygulanmakta olan Yenilenebilir Portföy Standardı'na hidrojenin dahil edilmesiyle, hidrojenle çalışan yakıt hücreli santrallere yenilenebilir enerji sertifikaları (REC) verilmekte ve bu da ek gelir sağlamaktadır. Nitekim Güney Kore, halihazırda dünyadaki en büyük yakıt hücreli elektrik santraline (Busan Fuel Cell Park, 440 MW) sahip olup burada üretilen elektriğe alım garantisi ve bonus REC teşviki vermektedir.

Güney Kore hükümeti ayrıca Hidrojen Fonları ve kamu finansmanı yoluyla sektöre sermaye akışı sağlamaktadır. Hidrojen Ekonomisi Yasası kapsamında kurulan Hidrojen Ekonomi Fonu, kamu ve özel sermayeden oluşan 500 milyon \$ büyüklüğünde bir yatırım fonudur; hidrojen start-up'larına, altyapı projelerine sermaye desteği verir. Kamu bankaları da (Korea Development Bank gibi) hidrojen projelerine uygun faizli kredi programları açıklamıştır. Özetle Güney Kore, hem doğrudan mali teşviklerle hem de zorunlu kullanım standartlarıyla hidrojeni sanayi ve ulaşım sistemine entegre etmeye yönelik çok boyutlu bir strateji izlemektedir.

Çin

Çin, hidrojen teknolojilerini ulusal stratejilerinde öncelikli konumlandıran bir diğer büyük ekonomidir. Çin merkezi hükümeti, henüz tek bir ulusal hidrojen stratejisi belgesi yayımlamasa da, 14. Beş Yıllık Plan (2021-2025) çerçevesinde hidrojenin temiz enerji sistemindeki rolünü tanımlamış ve yerel yönetimlere bu alanda adımlar atmaları için yol göstermiştir. Çin'de teşvikler büyük ölçüde bölgesel ve yerel düzeyde uygulanmaktadır: bir dizi pilot “Hidrojen Şehir/Koridor” programı ile şehir kümelerine finansal destekler sunulmaktadır.

Çin hükümeti, geçmişte yakıt hücreli elektrikli araçlar (FCEV) için yüksek alım sübvansiyonları vermiş ve 2015-2020 arasında binlerce hidrojen otobüsü ve kamyonunun piyasaya girmesini sağlamıştır. 2020 itibarıyla doğrudan araç sübvansiyonlarını revize eden Çin, bunun yerine şehirlere yönelik bir ödül mekanizması getirmiştir. Belirli sayıda FCEV ve istasyonu devreye alan şehir kümelerine merkezi bütçeden 1,5 milyar Yuan'a (~200 milyon \$) varan ödül fonları tahsis edilmektedir. Örneğin Pekin ve Şanghay liderliğindeki iki ayrı bölgesel pilot program, hedeflerine ulaşmaları halinde tam fonu alacak şekilde tasarlanmıştır. Bu model, yerel yönetimleri ve endüstriyi iş birliğine teşvik etmektedir. Sonuç olarak Çin, 2025'e kadar 50.000 adet FCEV hedefi koymuş ve 2023 itibarıyla 270'ten fazla hidrojen istasyonu ile dünyada ilk sıraya yerleşmiştir.

Ar-Ge ve inovasyon desteği, Çin'in teşvik sisteminde önemli yer tutar. Merkezi hükümet, üniversiteler ve şirketler eliyle yakıt hücresi yığınları, elektrolizör malzemeleri, hidrojen depolama (sıvı hidrojen, metal hidrid vb.) gibi konularda büyük araştırma programlarını fonlamaktadır. Özellikle hidrojen üretiminde karbon ayakizini azaltmak için CCUS (Karbon Yakalama, Kullanma ve Depolama) teknolojilerine yatırım yapılmaktadır [158]. Çin'in hedefi, mevcut kömür ve doğal

gazdan hidrojen üretim tesislerine karbon yakalama üniteleri ekleyerek “mavi hidrojen” üretimini ölçeklendirmek ve bir geçiş dönemi çözümü olarak kullanmaktır. Bu amaçla 2022’de açıklanan bir programla, çeşitli bölgelerde karbon yakalamalı hidrojen pilotlarına hükümet hibeleri sağlanmıştır. Çin’de vergi teşvikleri de mevcuttur: Yakıt hücresi sektöründeki şirketler yüksek teknoloji işletmesi olarak %15 kurumsal vergi oranından yararlanabilir (standart %25 yerine). Hidrojen üretimi için kullanılan yenilenebilir enerjiye bazı bölgelerde şebeke kullanım ücreti muafiyetleri getirilmektedir. Ayrıca hidrojenin taşıma maliyetlerini düşürmek için özel taşıma izinleri ve tehlikeli madde yönetmeliklerinde kolaylaştırmalar uygulanmaktadır.

Bunların yanı sıra, Çin’in devlet destekli sanayi politikaları kapsamında büyük kamu şirketleri hidrojen projelerine yatırım yapmaya teşvik edilmektedir. Örneğin Sinopec, CNPC gibi enerji devleri, yeşil hidrojen tesisleri (örneğin Sincan bölgesinde güneş enerjisiyle çalışan elektroliz tesisleri) inşa etmektedir. Bu projeler genellikle merkezi otoritelerin onayı ve finansmanı ile yürüdüğünden, doğrudan teşvik yerine kamu yatırımı şeklinde gerçekleşmektedir.

Özetle Çin, hidrojen ekosistemini büyütmek için çok katmanlı bir teşvik yaklaşımı benimsemiştir: merkezi hükümet Ar-Ge ve genel çerçeveyi desteklerken, yerel yönetimler somut sübvansiyon ve ödül programlarıyla uygulamayı hızlandırmaktadır. Bu sayede hem iç pazarını geliştirmekte hem de Çin firmalarının teknoloji kazanımlarını artırmaktadır.

ç) Hindistan

Hindistan, son dönemde Ulusal Yeşil Hidrojen Misiyonu (NGHM) ile hidrojen ekonomisine güçlü bir giriş yapmıştır. Ocak 2023’te onaylanan bu misyon, 2030’a kadar yıllık 5 milyon ton yeşil hidrojen üretim kapasitesi oluşturmayı ve Hindistan’ı uygun maliyetli yeşil hidrojen üretim üslerinden biri haline getirmeyi amaçlamaktadır [11]. Misiyonun toplam bütçesi 19.744 crore rupi (yaklaşık 2,4 milyar \$) olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda Hindistan hükümeti bir dizi teşvik mekanizmasını hayata geçirmektedir:

En önemli bileşen, Strategic Intervention for Green Hydrogen Transition (SIGHT) programıdır. SIGHT iki alt programdan oluşur: (1) Elektrolizör Üretimine Yönelik Teşvik ve (2) Yeşil Hidrojen Üretimine Yönelik Üretim Destekleri. Birinci bileşende, yerli elektrolizör imalat kapasitesini artırmak için üreticilere kademeli teşvikler verilecektir (üretim bağlı teşvik – Production Linked Incentive (PLI) sistemi) [168]. İkinci bileşende ise yeşil hidrojen üreticileri için ters ihale yoluyla mali destek sağlanacaktır; yani firmalar ihtiyaç duydukları minimum sübvansiyonu teklif edecek, en düşük teklifliler destek almaya hak kazanacaktır. Bu mekanizma, devlet desteğinin maliyet etkin şekilde dağıtılmasını hedeflemektedir.

Ayrıca Hindistan, vergi ve gümrük indirimleri ile de yatırımları teşvik ediyor. Elektrolizör ve yakıt hücresi ekipmanlarının ithalatında gümrük vergisi muafiyeti veya indirimi, yeşil hidrojen üretiminde kullanılan yenilenebilir enerji ekipmanlarında %5’lik indirimli KDV oranı gibi kolaylıklar sağlanmıştır. Bu sayede gerekli teknoloji ve bileşenlerin daha ucuza temin edilmesi öngörülmektedir.

Hindistan hükümeti, Viability Gap Funding yaklaşımını da benimsemektedir. Özellikle çelik üretimi, gübre (amonyak) üretimi, rafineri gibi karbon yoğun sektörlerde yeşil hidrojen kullanımını başlatmak üzere pilot projelere VGF desteği verilecektir. Bu, ilgili projelerin ilk yatırım maliyetlerinin veya işletme zararlarının bir kısmının devletçe karşılanması anlamına gelir ve şirketlerin yeni teknolojilere geçiş riskini azaltır.

Bunların yanında karbon piyasası ve sertifika mekanizmaları da devreye alınmaktadır. 2022’de Enerji Koruma Yasası’nda yapılan değişiklikle Hindistan, bir karbon kredi ticaret mekanizması oluşturmanın yasal zeminini hazırlamıştır [168]. Yeşil hidrojen üreticilerinin, fosil yakıtlı üretime kıyasla sağladıkları emisyon azaltımı ölçüsünde karbon kredi kazanarak bunu satabilmeleri mümkündür. Ayrıca yenilenebilir enerji sertifikaları (REC) sistemine yeşil hidrojen dahil edilmiş; elektroliz için kullanılan yeşil elektrik miktarı karşılığında üreticilere REC verilmesi planlanmıştır.

Hindistan, düzenleyici tarafta da adımlar atmaktadır. Taslak olarak ilan edilen Hidrojen Kullanım Yükümlülüğü (HPO), belirli sanayi kollarına enerji tüketimlerinin belli bir yüzdesini yeşil

hidrojenden karşılama zorunluluğu getirmeyi değerlendiriyor. Örneğin gübre üreticilerinin kullandığı hidrojenin %5'inin yeşil olması gibi hedefler gündemdedir. Bu tür bir düzenleme, doğrudan bir teşvik olmasa da yeşil hidrojene talep yaratacağı için dolaylı bir destek unsuru sayılabilir.

Özetle Hindistan, hem mali teşvikler (hibe, PLI, vergi indirimleri) hem zorunlu kullanım hedefleri hem de altyapı yatırımları ile entegre bir program uygulayarak hidrojen sektörünü filizlendirmektedir. Özellikle uygun maliyetli güneş enerjisi bolluğunu yeşil hidrojene dönüştürerek hem iç piyasasında sanayinin temiz dönüşümünü sağlamak hem de uzun vadede ihracat potansiyeli yaratmak Hindistan'ın stratejik hedefidir.

d) Avustralya

Avustralya, bol yenilenebilir enerji kaynaklarını avantaja çevirerek küresel yeşil hidrojen tedarikçisi olma hedefini güden bir ülkedir. 2019 Ulusal Hidrojen Stratejisi ile başlayan hamleler, 2020'lerde çeşitli eyalet girişimleriyle hız kazanmıştır. Federal düzeyde Avustralya, büyük ölçekli yeşil hidrojen projelerine sermaye hibeleri vermektedir. Örneğin 2021'de açıklanan Hidrojen için Fonlu Projeler kapsamında, farklı eyaletlerde elektrolizör kurulumları ve hidrojen ihracat limanı tesisleri için toplam A\$1.4 milyar (Avustralya Doları) destek taahhüdünde bulunulmuştur. Bu projeler arasında 10+ GW'lık güneş ve rüzgâr santraliyle entegre dev elektrolizör parkları da yer almakta, bu sayede yeşil hidrojen veya amonyak üretilip Asya pazarına ihraç hedeflenmektedir.

Avustralya'da eyalet hükümetleri de güçlü teşvikler sunar. Örneğin Queensland, Yeni Güney Galler ve Batı Avustralya eyaletleri, kendi hidrojen stratejilerini yayınlayarak arazi tahsisi, kolaylaştırılmış izin süreçleri ve eş finansman hibeleri sağlamaktadır. Queensland, Gladstone bölgesinde bir hidrojen üretim tesisine 100 milyon A\$ hibe verirken; Yeni Güney Galler, "Hidrojen Hub'ları" kurmak üzere 70 milyon A\$'lık bir program yürütmektedir [158]. Bu hub'lar, sanayi kümelerinin (örn. Newcastle) hidrojen altyapısına geçişini desteklemek için kullanılmaktadır. Ayrıca eyalet bazında hidrojen projelerine elektrik şebeke bağlantı indirimleri, su kullanım haklarında öncelik ve vergi muafiyetleri gibi çeşitli kolaylıklar da tanınmaktadır.

Avustralya, uluslararası iş birliklerini teşvik mekanizmasının parçası haline getirmiştir. Japonya, Güney Kore, Almanya gibi ülkelerle yeşil hidrojen ticareti konusunda hükümetlerarası anlaşmalar yaparak gelecekteki ihracatın önünü açmaya çalışmaktadır [158]. Bu anlaşmalar kapsamında pilot projelere ortak finansman, bilgi paylaşımı ve standartların uyumlulaştırılması gibi destekleyici adımlar atılmaktadır. Örneğin 2022'de Almanya ile imzalanan enerji anlaşması, Avustralya'dan Almanya'ya yeşil hidrojen sevkiyatı için fizibilite çalışmalarına hibe desteği içermektedir.

Son olarak, Avustralya Kalkınma Bankası (CEFC gibi kurumlar) ve çeşitli yatırım fonları, özel sektörün hidrojen projelerine katılımını finansal enstrümanlarla kolaylaştırmaktadır. Düşük faizli yeşil krediler, risk sermayesi fonları ve kamu-özel ortaklığı modelleri sayesinde, devasa ölçekli projeler için gereken sermayenin bir kısmı özel kesimden sağlanmakta, kamu da bunu teşviklerle tamamlamaktadır. Örneğin Asian Renewable Energy Hub gibi mega projeler, konsorsiyumlar aracılığıyla milyarlarca dolarlık sermaye toplayabilmiştir.

e) Diğer Ülkeler ve Bölgesel Girişimler

Orta Doğu ve Körfez Ülkeleri

Suudi Arabistan ve Birleşik Arap Emirlikleri (BAE) gibi Körfez ülkeleri, temiz hidrojen üretiminde lider olma hedefiyle büyük yatırımlar planlamaktadır. Suudi Arabistan, özellikle NEOM projesi kapsamında dünyanın en büyük yeşil hidrojen tesislerinden birini inşa etmektedir [158]. NEOM'daki proje, 4 GW güneş ve rüzgâr enerjisiyle yılda 650 ton yeşil hidrojen bazlı amonyak üretmeyi hedeflemekte ve bu projeye Suudi kamu fonları yanında uluslararası şirketler (Air Products gibi) yatırım yapmaktadır. Bu ülkede devlet, arazi tahsisi, altyapı kurulumu ve uzun vadeli alım garantileri ile projeyi desteklemektedir. Örneğin Suudi devlet kuruluşu ACWA Power, bu proje için düşük maliyetli sermaye ve enerji alım anlaşmaları ile görevlendirilmiştir.

BAE, 2021'de açıklanan hidrojen stratejisiyle farklı renklerde (yeşil, mavi) hidrojen üretimine başlamıştır. BAE liderliği, Abu Dabi ve Dubai emirliklerinde büyük ölçekli elektrolizör tesisleri için kamu-özel ortaklıklarını teşvik etmektedir. Ülke, arazi ve altyapı desteği sağlayarak uluslararası firmaları çekmeye çalışmakta; örneğin Abu Dabi'deki 200 MW'lık yeşil hidrojen projesine bedelsiz sanayi arazisi ve güneş enerjisi bağlantısı sunulmuştur. BAE aynı zamanda finansman kolaylıkları da sağlamaktadır: Emirates Development Bank, hidrojen projelerine uygun maliyetli kredi paketleri açıklamış; Masdar gibi devlet şirketleri özel sermaye ile ortak girişimler kurarak risk paylaşımına gitmiştir. BAE'nin hedefi, 2030'a kadar 1 milyon ton/yıl hidrojen üretim kapasitesine ulaşmak ve bunu ihracata yönlendirmektir. Bu doğrultuda, Japonya ve Almanya gibi alıcı pazarlarla niyet anlaşmaları imzalanmış ve ilk deneme transferleri (mavi amonyak şeklinde) yapılmaya başlanmıştır.

Katar, Umman, Bahreyn gibi Körfez ülkeleri de hidrojen planları hazırlamaktadır. Özellikle Umman, yeşil hidrojen üretimini yeni bir ekonomik sektör olarak konumlandırıp özel ekonomik bölgelerde vergisel teşvikler ve yabancı yatırımcıya %100 mülkiyet hakkı gibi avantajlar sunmuştur. Umman'ın 2030'a kadar 1 GW elektrolizör kapasitesi kurma hedefi bulunmakta ve bu amaçla Avrupa ve Asya'lı konsorsiyumlarla anlaşmalar yapılmıştır. Katar ise bol doğal gaz kaynaklarını kullanarak karbon yakalama ile mavi hidrojen üretim tesisleri üzerinde çalışmakta, bu alanda Japonya ile ortak Ar-Ge projelerine yatırım yapmaktadır.

Latin Amerika Örneği: Şili

Şili, Latin Amerika'da yeşil hidrojen konusunda en stratejik adımları atan ülke olarak öne çıkmaktadır. 2020 yılında Ulusal Yeşil Hidrojen Stratejisi'ni açıklayan Şili hükümeti, 2030'a kadar en ucuz yeşil hidrojen üreticilerinden biri olmayı ve 2050'ye doğru önemli bir ihracatçı haline gelmeyi hedeflemiştir. Şili'nin yaklaşımı, muazzam güneş ve rüzgâr potansiyelini değerlendirerek düşük maliyetli elektrikle hidrojen üretmektir. Bu hedefleri desteklemek için çeşitli teşvik unsurları devredilmiştir:

Öncelikle Şili, hidrojen projelerine doğrudan mali destek sağladı. Stratejinin hemen ardından açılan ilk yarışmada, beş büyük ölçekli yeşil hidrojen projesine toplam 50 milyon \$ hibe verilmesi kararlaştırıldı. Bu hibeler, elektrolizör kurulumu ve ilk faaliyet yıllarındaki operasyon giderlerini destekleyerek projelerin fizibil olmasını amaçlıyordu. Devamında, vergi teşvikleri de gündeme geldi; 2023'te kabul edilen bir düzenleme ile yeşil hidrojen üretim tesislerinin 10 yıl süreyle emlak vergisinden muaf olabileceği ve amortisman hızlandırma gibi avantajlardan yararlanabileceği belirtildi.

Şili hükümeti, düzenleyici kolaylıklar getirerek de yatırım ortamını iyileştirdi. Yeşil hidrojen projelerinin Çevresel Etki Değerlendirme süreçlerinde öncelikli ele alınması, proje izinlerinin hızlı verilmesi için özel bir çalışma grubu oluşturuldu. Ayrıca elektrik şebekesi genişleme planlarında yeşil hidrojen üretim bölgelerine (ör. Atacama Çölü civarı) kapasite ayrılması, böylece elektrolizörlerin kesintisiz yenilenebilir besleme alabilmesi sağlandı.

Uluslararası yatırım çekmek adına Şili, yabancı şirketlerle işbirliklerini teşvik etmektedir. Almanya, Belçika, Japonya gibi ülkelerle yeşil hidrojen kullanım ve ticaretine dair mutabakat anlaşmaları imzalamıştır. Bu anlaşmalar, ilgili ülkelerin şirketlerinin Şili'deki projelere yatırım yapmasını kolaylaştırıcı finansman ve alım garantisi unsurlarını içermektedir. Nitekim 2022'de Belçikalı bir konsorsiyum, Şili'de ihracat amaçlı yeşil amonyak tesisi kuracağını duyurmuş ve bunun arkasında iki ülke hükümetinin desteği bulunmaktadır.

Şili özelinde dikkat çekici bir başka husus da rekabetçi ihaleler yoluyla maliyet düşürme stratejisidir. Hükümet, yenilenebilir enerji ihalelerine ek olarak yakında yeşil hidrojen alım ihaleleri düzenlemeyi planlamaktadır. Örneğin ulusal petrol şirketi ENAP'ın, ithal doğal gaz yerine rafinerilerinde yeşil hidrojen kullanımı için ihtiyaç duyacağı hidrojen tedariki, devlet desteğiyle ihale edilecektir. En düşük fiyatı teklif eden üreticiler, uzun vadeli alım sözleşmeleri kazanacak ve bir miktar fiyat farkı sübvansiyonu alacaktır. Bu model, piyasa temelli bir teşvik olup özel sektör rekabetiyle maliyetleri aşağı çekerken aynı zamanda üreticiye gelir garantisi sunmaktadır.

Latin Amerika'da Şili dışında Brezilya ve Uruguay gibi ülkeler de hidrojen stratejileri üzerinde çalışmakta, ancak bunların teşvik çerçeveleri henüz başlangıç aşamasındadır. Brezilya, Petrobras vasıtasıyla pilot projelere yatırım yaparken, Uruguay yenilenebilir elektrik fazlasını değerlendirmek üzere yabancı yatırımcıları çekmeye çalışmaktadır.

f) Özel Sektör Destek Mekanizmaları ve Kamu-Özel İş Birlikleri

Sanayinin temiz dönüşümünde özel sektörün finansal desteği ve katılımı oldukça önemlidir. Kamu teşvikleri, genellikle gereken sermayenin yalnızca bir kısmını karşılayabildiğinden, büyük ölçekli dönüşüm yatırımlarının başarısı için özel sermayenin harekete geçirilmesi gerekir. Bu doğrultuda, son yıllarda kamu desteğinin "özel sektörü tetikleyici" şekilde tasarlanmasına özen gösterilmektedir. Örneğin AB'nin IPCEI projelerinde sağlanan 10 milyar € civarı kamu finansmanı, yaklaşık 15 milyar € seviyesinde özel yatırımın önünü açmıştır [159]. Benzer şekilde ABD'deki hidrojen hub'larına verilen 7 milyar \$ hibeye karşılık, ilgili konsorsiyumların 40 milyar \$ üzerinde eş finansman sağlaması beklenmektedir. Bu göstergeler, kamu-özel ortaklığının (PPP) temiz enerji projelerinde oynadığı kritik rolü ortaya koymaktadır.

Özel sektörün desteği farklı şekillerde gerçekleşmektedir:

- **Birincil Sermaye Yatırımları:** Büyük enerji şirketleri, otomotiv firmaları ve sanayi kuruluşları kendi dönüşümleri veya yeni iş fırsatları için hidrojen projelerine doğrudan yatırım yapmaktadır. Örneğin petrol şirketi Shell, Rotterdam'da yeşil hidrojen tesisi kurarken; otomotiv üreticisi Toyota, Japonya'da hidrojen tedarik altyapısına ortak olmaktadır. Bu yatırımlar genellikle şirketlerin AR-GE bütçeleri veya karbon nötr olma taahhütleri çerçevesinde, kamu teşviklerinden de faydalanarak yapılmaktadır.
- **Özel Yatırım Fonları ve Bankalar:** Son yıllarda birçok özel sermaye fonu hidrojen ve ilgili temiz teknolojilere yönelik portföyler oluşturmuştur. Örneğin Avrupa'da kurulan FiveT Hydrogen Fund, küresel hidrojen altyapısına 1 milyar \$ yatırım hedefiyle kurulmuş bir özel girişim sermayesi fonudur. Benzer şekilde Breakthrough Energy Catalyst programı, Bill Gates öncülüğünde, yeşil hidrojen gibi teknolojileri desteklemek için hem kamu hem özel kaynakları bir havuzda birleştirmektedir. Ticari bankalar da yeşil projelere kredi verme konusuna olumlu bakmaktadır: 2023'te Fransız Lhyfe firmasının yeşil hidrojen tesisleri için Crédit Agricole ve HSBC bankalarından 28 milyon €'luk proje finansmanı sağlaması, bankaların bu sektöre girdiğinin bir işareti olarak algılanmaktadır.
- **Yeşil Finansman Araçları:** Özel sektör, temiz enerji projeleri için yeşil tahvil ve sürdürülebilirlik bağlantılı kredi gibi finansman araçlarını kullanmaktadır. Şirketler, projelerinin çevresel faydasını belgeleyerek daha düşük maliyetli fonlama sağlayabilmektedir. Örneğin Şili'de planlanan bir yeşil hidrojen tesisi, 2021'de Latin Amerika'nın ilk yeşil hidrojen tahvil ihracı ile kısmen finanse edilmiştir. Bu tip araçlar, yatırımcılara çevresel getiri sunarken şirketlerin sermaye maliyetini düşürmektedir.
- **Uzun Vadeli Alım Sözleşmeleri:** Özel sektörün temiz hidrojen projelerine güvenle yatırım yapabilmesi için off-take anlaşmaları kritik rol oynar. Büyük sanayi şirketleri veya lojistik firmaları, henüz inşa aşamasındaki hidrojen tesisleriyle gelecekteki hidrojen veya türevi yakıt (amonyak, metanol) alımı için sözleşmeler imzalayabilmektedir. Bu, üreticiye gelir garantisi sağlayarak projenin finansmanını kolaylaştırır. Örneğin Avustralyalı Fortescue Metals, yeşil çelik üretimi hedefiyle yeşil hidrojen tedarik anlaşmaları yapmış; hava yolu şirketi ANA, 2020'lerin sonunda kullanmak üzere yeşil yakıt (e-yakıt) alım sözleşmeleri imzalamıştır. Bu tür anlaşmalar, piyasa talebini güvence altına alarak dolaylı bir teşvik işlevi görür.
- **Karbon Fiyatı ve Sertifikalar:** Özel sektör, karbon fiyatlandırması sayesinde de destek görmektedir. ETS gibi sistemlerde yüksek karbon fiyatları, fosil bazlı üretimin maliyetini artırdığından, temiz hidrojen gibi alternatiflere piyasa avantajı sağlar. Ayrıca yeşil hidrojen sertifikaları geliştirilmektedir. AB'nin planladığı yenilenebilir hidrojen sertifikaları veya mevcut GO sistemi sayesinde, yeşil hidrojenin düşük karbon kimliği belgelenip alıcılara premium

fiyattan satılabilmektedir [158]. Bu da üreticilere ek bir gelir kaynağı yaratır ve özel yatırımı teşvik eder.

- **Kamu-Özel Ar-Ge İşbirlikleri:** Özel şirketler ve kamu araştırma kurumları, hidrojen teknolojilerinde inovasyonu hızlandırmak için ortak laboratuvarlar ve pilot tesisler kurmaktadır. Örneğin Almanya'da Thyssenkrupp şirketi ve Fraunhofer Enstitüsü ortaklığında yeşil çelik üretimi denemeleri yapılmakta, masraflar kamu ve şirket arasında paylaşılmaktadır. Bu sayede özel sektör, yeni teknolojilerin riskini kamu ile paylaşarak daha rahat yatırım yapabilir.

Tüm bu mekanizmalar sonucunda, küresel hidrojen yatırımları hızla artmaktadır. Hydrogen Council verilerine göre 2030'a kadar duyurulan hidrojen proje yatırımları 570 milyar \$ düzeyine ulaşmıştır [162]. Ancak bu projelerin sadece %7'si (39 milyar \$) nihai yatırım kararına (FID) bağlanabilmiştir [162]. Bu durum, özel sektörün harekete geçmesi için politika istikrarı ve talep güvencesinin önemini göstermektedir. Hükümetlerin sağladığı teşviklerin uzun vadeli olacağı ve temiz hidrojen talebinin yaratılacağı beklentisi, özel sermayenin ölçekli şekilde devreye girmesini sağlayacaktır. Nitekim ABD'de IRA sonrası temiz hidrojen projelerinde patlama yaşanmış ancak uygulama yönetmeliklerinin belirsizliği nedeniyle bir kısmı beklemede kalmıştır. Bu sıkıntıları aşmak için 2024'te ABD'de başlatılan talep-garanti programı gibi yenilikçi çözümlerle, özel sektörün yatırımlarını güvence altına almak hedeflenmektedir [162].

Sonuç olarak, sanayinin temiz dönüşümüne yönelik teşvik ekosistemi, kamu ve özel aktörlerin ortak çabası ile şekillenmektedir. Uluslararası kuruluşlardan ulusal hükümetlere, yerel yönetimlerden şirketlere kadar geniş bir yelpazedeki paydaş, finansal araçlar ve politikalar yoluyla temiz hidrojeni ve diğer temiz teknolojileri ölçeklendirmeye çalışmaktadır. Bu teşvikler; doğrudan hibeler ve vergi indirimlerinden piyasa bazlı karbon fiyatlandırmasına, AR-GE desteklerinden kamu-özel ortaklıklarına uzanan kapsamlı bir paket oluşturularak, enerji ve sanayi sektörlerinde düşük karbonlu bir dönüşüm için gerekli zemini hazırlamaktadır. Sanayinin karbon ayak izini azaltma hedefinde, küresel rekabet avantajı elde etmek isteyen ülkeler teşvik mekanizmalarını sürekli güncelleyip genişletmekte, aynı zamanda uluslararası iş birlikleriyle iyi uygulamaları paylaşmaktadır. Bu dinamik alanda güncel kalmak, gerek politika yapımcılar gerekse işletmeler için önem arz etmektedir; zira doğru teşviklerden yararlanarak erken pozisyon alanlar, temiz enerjiye geçişte hem ekonomik hem çevresel kazanç sağlayacaklardır.

5.4.2. Sanayinin Temiz Dönüşümüne Yönelik Yeni Teşvik Mekanizmaları Önerileri

Küresel enerji dönüşümünde temiz hidrojen ve türevleri (örneğin yeşil amonyak, metanol, sentetik yakıtlar) kritik bir rol üstlenmektedir. Özellikle sanayi, ağır taşımacılık ve enerji depolama gibi karbonsuzlaştırılması zor sektörlerde temiz hidrojen, fosil yakıtların yerini alabilecek çok yönlü bir enerji taşıyıcısı olarak öne çıkmaktadır. Hidrojenin fosil kaynaklı olmaksızın yenilenebilir enerji ile üretilmesi durumunda (yeşil hidrojen), kullanım sürecinde sera gazı emisyonu neredeyse sıfırlanmakta ve bu sayede net-sıfır hedeflerine ulaşmak mümkün hale gelmektedir. Ancak temiz hidrojen ekonomisinin gelişebilmesi için yüksek maliyetler, altyapı eksikleri ve piyasa belirsizlikleri gibi önemli engellerin aşılması gerekmektedir. Bu noktada, dünyada pek çok ülke teşvik mekanizmaları ve destek politikaları ile hidrojen piyasasını canlandırmaya çalışmaktadır. 2023 yılı itibarıyla küresel ölçekte temiz hidrojen için kamusal yatırım taahhütleri 308 milyar \$'a ulaşmış ve bunun büyük bölümü üretim tarafına ayrılmıştır. Öte yandan, yalnızca arz odaklı teşviklerin yeterli olmadığı, talep tarafının da eşzamanlı desteklenmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Nitekim 2023 itibarıyla dünya genelinde açıklanan toplam temiz hidrojen üretim hedefleri 27-35 milyon ton iken, aynı dönemde temiz hidrojen talep hedefleri yalnızca ~14 milyon tonda kalmıştır. Avrupa Birliği'nde (AB) 2030 için planlanan yenilenebilir hidrojen arzı 20 milyon ton iken, öngörülen talep 8,5 milyon ton civarındadır. Bu arz-talep asimetrisi, temiz hidrojen piyasasının gelişimi için tüketim tarafında da destekleyici politikalara ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır [169].

Türkiye, 2053 net-sıfır emisyon hedefi doğrultusunda hidrojen teknolojilerini stratejik bir alan olarak görmeye başlamıştır. Henüz resmî bir ulusal hidrojen stratejisi açıklanmamış olsa da son yıllarda düzenlenen çalıştaylar ve raporlar, hidrojenin enerji dönüşümünde oynayacağı role dikkat çekmektedir [170]. Örneğin, Türkiye Hidrojen Teknolojileri Derneği'nin yol haritası önerisi, 2020'lerde doğalgaz şebekesine hidrojen karıştırma pilotlarının başlatılmasını, 2030'a kadar boru hatlarında %10 hidrojen karışımına ulaşılmasını ve devamında çeşitli sektörlerde hidrojen kullanımının yaygınlaştırılmasını öngörmüştür. Bu çerçevede, Türkiye'de hidrojen piyasasını oluşturmak üzere hükümet teşviklerinin başlatılması gereği vurgulanmıştır. Gerçekten de, hidrojen ekonomisinin henüz emekleme aşamasında olduğu göz önüne alınırsa, kamu desteği olmadan sadece piyasa dinamikleriyle arz-talep dengesinin kurulması zordur. Nitekim dünya genelinde son dönemde açıklanan hidrojen projelerinin pek çoğu, devletlerin finansal destekleriyle mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla Türkiye'de ve özellikle Güney Marmara Bölgesi'nde sanayinin temiz enerjiye dönüşümünü hızlandırmak için, uluslararası eğilimlerle uyumlu teşvik ve destek mekanizmalarının tasarlanması kritik önem taşımaktadır. AB'nin Yeşil Mutabakat kapsamında uygulamaya hazırlandığı Sınırdan Karbon Düzenlemesi Mekanizması (CBAM) da bu aciliyeti artırmaktadır. Türkiye ihracatının yaklaşık %50'sinin yöneldiği AB pazarında karbon içerikli ürünlere ilave maliyetler getirecek CBAM, Güney Marmara gibi ihracata yönelik üretim yapan bölgelerdeki firmalar için rekabet baskısı yaratacaktır [171]. Bu nedenle, sanayide temiz dönüşümü teşvik edecek yeni destek unsurlarının hızla devreye alınması, hem iklim taahhütleri hem de ticari rekabet gücü açısından bir zorunluluktur.

Bu kapsamda ilerleyen bölümlerde, Güney Marmara Bölgesi özelinde, temiz hidrojen ve türevlerinin üretim, dağıtım, tüketim ve ihracatına yönelik yeni teşvik mekanizmaları ve destek unsurları için somut politika önerileri sunulmaktadır. Öneriler geliştirilirken, uluslararası ve ulusal düzeyde halihazırda uygulanan teşvik sistemleri incelenmiş; dünya genelinde başarılı olmuş modellerden çıkarılan derslerle bölgeye uygulanabilecek yenilikçi politika, fon ve destek tasarımlarına odaklanılmıştır. Güney Marmara Bölgesi'nin mevcut sanayi yapısı, yenilenebilir enerji potansiyeli ve lojistik avantajları dikkate alınarak, bölgenin hidrojen ekosistemine geçişini hızlandıracak teşvik araçları bütüncül bir çerçevede değerlendirilmiştir.

a) Güney Marmara Bölgesinde Hidrojen Dönüşümü İçin Mevcut Durum ve Potansiyel

Güney Marmara Bölgesi, temiz hidrojen ekosisteminin geliştirilmesi açısından Türkiye'de en avantajlı bölgelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Balıkesir ve Çanakkale illerini kapsayan bölge, hem kara hem denizde ülkenin en zengin yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip olup Düzey-2 bölgeleri arasında ~3 GW kurulu rüzgâr+güneş kapasitesi ile lider konumdadır [169]. Türkiye'nin 2035 hedefleri içinde yer alan 5 GW denizüstü rüzgâr ve 5 GW elektrolizör kapasitesi göz önüne alındığında, Ege Denizi ve Marmara Denizi'ne toplam 1000 km kıyısı olan Güney Marmara'nın bu hedeflere en fazla katkı yapacak bölge olacağı öngörülmektedir [162]. Yani bölge, yeşil hidrojeni uygun maliyetle üretebilecek yenilenebilir enerji altyapısını geliştirme potansiyeline fazlasıyla sahiptir. Nitekim bölgede 2022 yılında başlatılan Bandırma Enerji Üssü pilot projesi, yenilenebilir elektrikten yeşil hidrojen üretimini Türkiye'de ilk kez gösteren uygulamalardan biri olmuştur. Enerjisa Üretim şirketinin Bandırma'daki tesisinde kurulan pilot elektrolizör, ürettiği yeşil hidrojeni kombine çevrim santralinin işletmesinde kullanmaya başlamıştır. Bu proje ile elde edilen deneyimler, bölgede daha büyük ölçekli yeşil hidrojen yatırımları için önemli bir temel teşkil etmektedir. Ayrıca Enerjisa, Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA), Eti Maden, TÜBİTAK MAM ve Aspilsan Enerji arasında imzalanan iş birliği protokolüyle Bandırma'da daha kapsamlı bir Hidrojen Vadisi kurulması için çalışmalar başlatmıştır. Bu girişim, kamu, özel sektör ve araştırma kurumlarını bir araya getiren örnek bir kamu-özel iş birliği modeli olarak dikkat çekmektedir.

Bölgenin sanayi profili incelendiğinde, hidrojen kullanımına uygun birçok sektör ve tesis bulunduğu görülür. Bandırma ve çevresinde faaliyet gösteren gübre (amonyak) fabrikaları, kimya tesisleri, orta ölçekli demir-çelik işletmeleri ve seramik fabrikaları halihazırda hidrojen veya türevlerini hammadde ya da yakıt olarak kullanabilecek durumdadır. Örneğin Bandırma'daki gübre tesisleri

(azotlu gübre üretimi için amonyak kullanılır) ileride yeşil hidrojenle üretim yaparak fosil doğal gazı bağımlılığı azaltabilir. Benzer şekilde, bölgedeki demir-çelik sektöründe hurda çelik eritmeye dayalı elektrik ark ocakları yaygın olsa da, doğrudan indirgenmiş demir (DRI) gibi süreçler için hidrojen kullanılabilmesi söz konusu olacaktır. Ayrıca Bandırma ve çevresinde yeni kurulmakta olan Organize Sanayi Bölgeleri (OSB) bulunmaktadır. Bu OSB'lerin enerji altyapısına yeşil hidrojenin entegre edilmesi, bir "Yeşil Endüstri Bölgesi" modelinin geliştirilmesini mümkün kılacaktır. Nitekim GMKA tarafından yürütülen çalışmalar kapsamında Güney Marmara Yeşil Endüstri Bölgesi fizibilitesi de hazırlanmış olup bu alanda Türkiye'nin ilk adımları atılmaktadır [171]. Bölgede ayrıca bor cevheri ve kimyasalları alanında dünyanın sayılı üreticilerinden Eti Maden'in tesisleri bulunmaktadır; bu da hidrojen depolama teknolojileri (örneğin sodyum borhidrür) konusunda bölgenin Ar-Ge merkezi olabileceğini göstermektedir.

Lojistik ve liman altyapısı bakımından da Güney Marmara, hidrojen stratejisi için önemli avantajlara sahiptir. Marmara Denizi'nin güney kıyıları ve Çanakkale Boğazı hattı üzerinde Bandırma, Karabiga, Erdek, Çanakkale gibi çeşitli ölçeklerde limanlar bulunmaktadır. GMKA'nın vizyon belgelerinde, bölgede yer alan bu liman işletmelerinin yakın gelecekte yeşil hidrojen ve türevlerinin üretim-ihracat üslerine dönüşebileceği belirtilmektedir. Gerçekten de Avrupa'nın Rus doğal gazına alternatif olarak dış kaynaklardan yeşil hidrojen ve türevleri ithal etmeye hazırlanması, Güney Marmara'yı Avrupa'ya deniz yoluyla açılan stratejik bir ikmal noktası haline getirebilir. Örneğin Bandırma veya Çanakkale limanlarında kurulacak yeşil amonyak terminalleri, deniz yakıtı olarak amonyak kullanacak gemilere ikmal hizmeti sunabileceği gibi, Avrupa'ya yeşil amonyak ihracatında da köprü rolü oynayabilir. AB'nin 2022 tarihli REPowerEU planı, 2030'a kadar yılda 10 milyon ton yenilenebilir hidrojen ithalatı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda AB, komşu bölgelerle hidrojen tedariki için iş birliklerini ve altyapı yatırımlarını başlatmıştır. Güney Marmara, coğrafi yakınlığı ve güçlü sanayi altyapısı sayesinde bu tedarik zincirinde önemli bir halka olma potansiyeline sahiptir. Özetle, Güney Marmara Bölgesi hem iç talebe yönelik sanayi dönüşümü hem de ihracata yönelik üretim açısından elverişli bir ekosistem sunmaktadır. Bölgenin bu potansiyelini hayata geçirmek için, aşağıda detaylandırılan yeni teşvik mekanizmaları ve destek unsurlarının devreye alınması önerilmektedir.

b) Küresel Düzeyde Temiz Hidrojen Teşvik Mekanizmaları ve Başarılı Modeller

Dünya genelinde son birkaç yıl içinde temiz hidrojenin geliştirilmesi amacıyla birçok ülke kapsamlı stratejiler, yol haritaları ve teşvik paketleri açıklamıştır. Özellikle büyük ekonomiler, hidrojen sektörünü ölçeklendirmek için benzeri görülmemiş büyüklükte finansal mekanizmaları devreye almaktadır. Bu mekanizmalar arasında doğrudan hibe ve sübvansiyonlar, vergi teşvikleri, rekabetçi ihale (yarışma) modelleri, sözleşmeye dayalı fark ödemeleri (CfD) ve kamu-özel fonlama insiyatifleri yer almaktadır [172]. Aşağıda, önde gelen bazı ülkelerin temiz hidrojen için uyguladığı başlıca teşvik araçları özetlenmiştir:

- **Amerika Birleşik Devletleri (ABD):** 2022'de yürürlüğe giren Enflasyonu Düşürme Yasası (IRA) kapsamında ABD, temiz hidrojen üretimine yönelik oldukça cömert vergi kredileri sağlamaya başlamıştır. Karbon yoğunluğuna bağlı kademeli olarak değişmek üzere, yeşil hidrojen üretimine kg başına 3 ABD Doları'na kadar doğrudan mali destek verilmektedir [172]. Bu üretim kredisi, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir kaynaklara geçmişte verilen teşviklere benzer biçimde, elektrolizörle hidrojen üreten tesislerin işletme maliyetini düşürmeyi hedeflemektedir. Bunun yanı sıra 2021 tarihli altyapı yasası ile Hidrojen Merkezleri (Hydrogen Hubs) programı için 8 milyar \$ fon ayrılmış; ülke genelinde en az 4 bölgesel temiz hidrojen merkezi kurulması planlanmıştır [169]. ABD Enerji Bakanlığı ayrıca AR-GE ve pilot projeler için milyarlarca dolarlık kaynak tahsis ederek elektrolizör teknolojileri, yakıt hücreleri ve hidrojen depolama konularında inovasyonu desteklemektedir. Tüm bu adımlar, ABD'nin 2030'da 10 milyon ton, 2050'de ise 50 milyon ton yıllık temiz hidrojen üretim kapasitesine ulaşma hedefini gerçekleştirmeye yöneliktir. Özetle, ABD yaklaşımı arz tarafına güçlü mali

teşvikler vererek özel sektör yatırımlarını hızlandırmak üzerinedir. Nitekim IRA sonrası iki yıl içinde ABD’de temiz hidrojen alanında duyurulan proje sayısında adeta patlama yaşanmıştır. Ancak bu hızlı arz artışı karşısında, hidrojen talebini güvence altına almak üzere ABD hükümeti talep yönlü bazı adımlar da atmaktadır.

- **Avrupa Birliği (AB):** AB, 2020 yılında açıkladığı “İklim-Nötr Bir Avrupa için Hidrojen Stratejisi” ile hidrojen alanında kapsamlı bir eylem listesi ortaya koymuştur. 2030 için 40 GW elektrolizör ve 10 milyon ton yenilenebilir hidrojen üretimi hedefi benimsenmiş, ancak 2022’de Rusya krizi sonrasında REPowerEU Planı ile bu hedefe 10 milyon ton ithalat eklenerek toplam 20 milyon ton talep düzeyine ulaşılması planlanmıştır [169]. AB, hidrojen piyasasını canlandırmak için bir dizi finansal destek mekanizmasını eşzamanlı işletmektedir. Bunların başında, 2023 yılında duyurulan Avrupa Hidrojen Bankası gelmektedir. Her ne kadar “banka” ismi taşısa da esasında bu girişim, temiz hidrojen üreticilerine belirli bir süre boyunca ürünleri için prim ödemesi yapacak bir ihale mekanizmasıdır. İlk ihale çağrısı için 800 milyon € bütçe ayrılmış olup, bu kapsamda yeşil hidrojen üreticilerine açık eksiltme usulüyle talep ettikleri asgari fiyat primini sunmaları için davet yapılmıştır [172]. Yoğun ilgi gören bu programda AB Komisyonu, üreticilere verilecek azami prim tutarını 4,5 €/kg seviyesine yükseltmiştir [172]. Bu değer, bir karşılaştırma yapmak gerekirse, ABD teşvikinin euro karşılığı olan ~2,7 €/kg seviyesinden daha yüksektir ve AB’nin hidrojene ABD’den bile güçlü bir destek vermeye hazır olduğunu göstermektedir. Avrupa Hidrojen Bankası mekanizması, ilk etapta AB içindeki üreticileri desteklemeye odaklanırken, ileride AB dışı yeşil hidrojen ihracatçıları kapsayacak ikinci bir mekanizma oluşturulması da planlanmaktadır. Böylece AB, kendi temiz hidrojen talebini hem iç üretim hem de ithalat yoluyla garanti altına almak üzere çift yönlü bir teşvik modeli geliştirmektedir. Buna paralel olarak AB, “IPCEI” inisiyatifi ile üye ülkelerin sınır ötesi büyük hidrojen projelerine toplam 13 milyar € kamu finansmanı ve 17 milyar € özel sektör yatırımı mobilize edecek bir çerçeve sunmuştur. IPCEI kapsamına alınan 76 proje, üretimden depolamaya ve kullanım uygulamalarına kadar tüm değer zincirini kapsamaktadır. AB bünyesindeki bir diğer önemli mekanizma da Temiz Hidrojen Ortaklığı (önceki adıyla Yakıt Pilleri ve Hidrojen Birliği) olup, 2020’lerin ortasına kadar en az 9 adet “Hidrojen Vadisi” kurulması için yaklaşık 105 milyon €’ya varan hibe destekleri sağlamaktadır. Bu hidrojen vadileri, belirli bir bölgede üretici-tüketici iş birliklerini ve yerel değer zincirini tesis etmeye yönelik bütüncül projelerdir. AB, bu projeler aracılığıyla verilen kamu desteğinin en az 5 katı özel sektör finansmanını harekete geçirmeyi beklemektedir. Nitekim hidrojen vadileri konsepti, halihazırda Güney Marmara dahil olmak üzere Türkiye’den de bazı projelerin AB fonlarından yararlanmasına imkân tanımıştır (örn. HYSouthMarmara projesi). Son olarak, AB’nin düzenleyici alanda da talep yaratmaya dönük adımlar attığını vurgulamak gerekir. 2023’te güncellenen Yenilenebilir Enerji Direktifi (RED) kapsamında AB üyesi ülkelere, 2030 itibarıyla sanayide kullanılan hidrojenin en az %42’sinin yenilenebilir kaynaklı olması hedefi getirilmiştir. Ayrıca ulaştırma sektörü için 2030’a kadar nihai enerji tüketiminin %5,5’inin yenilenebilir hidrojen ve türevlerinden sağlanması yönünde hedef belirlenmiştir. Bu tür zorunlu kullanım kotaları, hidrojen talebinin hızlanmasına yönelik önemli politika araçlarıdır ve AB üyesi ülkelere ulusal düzeyde uygulanacaktır.
- **Birleşik Krallık ve Almanya:** Bu iki ülke, hidrojenin sanayide kullanımını teşvik etmek üzere Carbon Contracts for Difference modelini uygulamaya koyan ilk örneklerdir. Bu modelde, devlet ile yatırımcı arasında yapılan sözleşme ile düşük karbonlu üretim süreçlerinin maliyeti ile geleneksel fosil bazlı üretim maliyeti arasındaki fark, devlet tarafından karşılanmaktadır [172]. Örneğin Almanya 2022’de çelik ve kimya gibi sektörler için karbon sözleşmeleri ihalesi başlatmış; yeşil hidrojen kullanarak çelik üretecek projelere 15 yıl boyunca karbon fiyat farkı ödemeyi taahhüt etmiştir. Benzer şekilde Birleşik Krallık, Net Sıfır Hidrojen Fonu kapsamında yeşil hidrojen üretim tesisleriyle 15 yıllık CfD sözleşmeleri imzalamaya hazırlanmaktadır. Bu

mekanizma, özellikle nihai ürünün fiyatına yansıtılmayan yüksek maliyet farklarının kamu desteğiyle kapatılmasını sağlayarak, ilk örnek projelerin hayata geçmesini amaçlamaktadır. Ayrıca Birleşik Krallık, hidrojen dağıtım altyapısını geliştirmek için de hibe programları uygulamakta; örneğin H2Mobility UK girişimiyle hidrojen yakıt ikmal istasyonlarının yaygınlaştırılması için kamu-özel sektör ortak yatırımlarını desteklemektedir. Almanya tarafında ise, ulusal hidrojen stratejisi kapsamında ulaşım ve ısı sektöründe hidrojen kullanacak nihai tüketicilere yönelik çeşitli sübvansiyonlar devreye alınmıştır. Örneğin Almanya, yakıt hücreli ağır vasıta alımlarında %80'e varan oranlarda devlet desteği sunmakta; hidrojenle çalışan trenler ve otobüsler için de kamu alım garantileri vermektedir.

- **Diğer Ülkeler:** Japonya, Çin, Güney Kore, Kanada, Avustralya, Hindistan gibi ekonomiler de kendi koşullarına uygun hidrojen teşvik programları geliştirmektedir. Japonya 2017'de dünyada ilk ulusal hidrojen stratejisini açıklayan ülke olmuş, 2030'a kadar 3 milyon ton, 2050'de ise 20 milyon ton hidrojen tüketimi hedefleyerek bu doğrultuda 10 trilyon ¥ (yaklaşık 80 milyar \$) yatırım çekmeyi planladığını duyurmuştur. Japonya başlangıçta fosil kaynaklardan elde edilen hidrojenin (mavi hidrojen) kullanımıyla yola çıkmışsa da, son dönemde yenilenebilir (yeşil) hidrojene öncelik vermeye başlamıştır. Ülke, Avustralya'dan sıvı hidrojen ve Ortadoğu'dan amonyak ithalatı gibi projeleri kamu destekli konsorsiyumlar aracılığıyla hayata geçirmektedir. Hindistan, 2023'te Ulusal Yeşil Hidrojen Misyonu'nu ilan ederek 2030'a kadar 5 milyon ton yeşil hidrojen üretim kapasitesi kurmak için 2,4 milyar \$ bütçe ayırmıştır. Bu program ile Hindistan, bir yandan petrole bağımlılığını azaltmayı diğer yandan da elektrolizör ve ekipman imalatında küresel bir tedarik merkezi olmayı hedeflemektedir. Çin, halihazırda yıllık 33 milyon ton ile dünyanın en büyük hidrojen üreticisidir (büyük kısmı fosil kaynaklı olsa da) [169]. 2022'de açıklanan Hidrojen Endüstrisi Gelişim Planı ile 2025'e kadar 50 bin yakıt hücreli araç ve yılda 100-200 bin ton yeşil hidrojen üretimi hedeflenmiştir [169]. Çin, eyalet bazında kapsamlı teşvikler (vergi indirimleri, elektrik tarifesi sübvansiyonları vb.) sağlayarak hidrojen ekosistemini içeride güçlendirmeye çalışmaktadır. Avustralya ise 2019 Ulusal Hidrojen Stratejisi'ni, ABD IRA etkisiyle güncelleyerek "Hydrogen Headstart" adlı yeni programla iki büyük ölçekli elektrolizör projesine 1,4 milyar A\$ sübvansiyon ayırmıştır [159]. Özetle, pek çok ülke kendi koşullarına göre yatırım teşvikleri, Ar-Ge destekleri, altyapı yatırımları ve piyasa oluşturma mekanizmaları tasarlamıştır. Bu küresel deneyimler, Güney Marmara Bölgesi için geliştirilecek yeni teşvik modellerine ışık tutmaktadır.

c) Türkiye'de ve Güney Marmara'da Mevcut Teşvik ve Destek Uygulamaları

2022 yılında açıklanan Türkiye Ulusal Enerji Planı'nda hidrojenin enerji dönüşümündeki rolüne dikkat çekilerek 2035 yılına kadar 2 GW elektrolizör kapasitesi kurulması hedeflenmiş, 2023'te yayımlanan Net Sıfır Emisyon Hedefi ve Yeşil Kalkınma Strateji Belgesi'nde ise yeşil hidrojen üretimi ve kullanımının geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu yüksek düzeyli hedeflerin gerçekleşebilmesi için önümüzdeki dönemde somut ve kapsamlı teşvik araçlarının tasarlanması beklenmektedir. Şu ana kadar alınan bazı önemli aksiyonlar şunlardır:

- **Ar-Ge ve Pilot Projeler Desteği:** TÜBİTAK ve ilgili kurumlar, hidrojen teknolojilerine yönelik araştırma projelerini desteklemeye başlamıştır. Örneğin TÜBİTAK 1004 Mükemmeliyet Merkezi programı kapsamında "Yeşil Hidrojen" temalı çağrılar açılmış; elektrolizör geliştirme, hidrojen depolama malzemeleri, yakıt hücreleri gibi konularda üniversite-sanayi iş birlikleri fonlanmıştır. Ayrıca Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2022'de Bandırma'da kurulacak Hidrojen Vadisi projesine Kalkınma Ajansı kanalıyla destek sağlayacağını açıklamıştır. Nitekim GMKA koordinasyonunda yürütülen Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu projesi, bu bölgesel yaklaşımın bir ürünüdür. Avrupa'dan sağlanan 8 milyon € hibe ile desteklenen HYSouthMarmara Hidrojen Vadisi projesi de Türkiye'nin ilk bölgesel hidrojen projesi olarak

dikkat çekmektedir. Bu tür projeler, doğrudan mali teşvik olmasa da altyapı ve bilgi birikimi oluşturma açısından kamusal desteğin kritik bir örneğidir.

- **Düzenleyici Adımlar:** Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), 2021’de doğal gaz şebekesinde hidrojen karıştırma denemelerine ilişkin mevzuat hazırlıklarına başlamıştır. Doğal gaz ile hidrojeni belirli oranlarda harmanlayarak dağıtma fikri, ilk aşamada %5-10 oranlarında pilot uygulamalar olarak düşünülmektedir [170]. Bu, hidrojen talebi yaratmaya yönelik önemli bir sinyal olarak değerlendirilebilir. Ayrıca Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, elektrikli ve hidrojen yakıt hücreli araçların kullanımını yaygınlaştırmak için bazı teşvikler öngörmektedir (örneğin hidrojenli otobüs alımlarında finansman kolaylığı, yakıt istasyonu kurulumunda bürokratik süreçlerin kolaylaştırılması gibi). Henüz uygulama safhasında olmasa da, hazırlıkları tamamlanan ve yayımlanan İklim Kanunu’nda hidrojen alanında iklim değişikliği ile mücadeleye yönelik projelerin geliştirilmesi konuları yer almaktadır.
- **Yerel ve Bölgesel Girişimler:** Güney Marmara gibi öncü bölgelerde kalkınma ajansları vasıtasıyla bazı bölgesel destekler uygulanmaktadır. Örneğin GMKA, 2018’den bu yana “hidrojen ekonomisi” temalı uzman raporları yayımlayarak farkındalık yaratmış ve 2022’de bölgede hidrojen teknoparkı kurulması için fizibilite desteği vermiştir. Yine Balıkesir ve Çanakkale illerinin 2024-2028 kalkınma planlarında, yeşil hidrojen yatırımının çekilmesi bir öncelik olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, bölgedeki OSB’lerde yenilenebilir enerji yatırımı yapan firmalara ilave arsa tahsisi, emlak vergisi muafiyeti gibi kolaylıklar sağlanması gündemdedir. Bu kapsamda ilk olarak Türkiye’de yerel ve bölgesel kalkınmayı sağlamak, bölge içi ve bölgeler arası gelişmişlik farklarını azaltmak amacıyla, bölgelerin potansiyellerinin değerlendirilmesi, atıl kaynakların kullanılması, yerel ihtiyaçların karşılanması ve sektörel önceliklerin gözetilmesi gibi hedeflerle Yerel Kalkınma Hamlesi Programı 17 Temmuz 2025 tarihinde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından ilan edilmiştir. İlan edilen Yerel Kalkınma Hamlesi Teşvik Programı doğrultusunda Balıkesir’de yeşil hidrojen üretiminin yatırım konuları arasına alındığı görülmektedir. Yerel Kalkınma Hamlesi kapsamında yeşil hidrojen üretimi için yatırımcılara çeşitli destekler sunulacaktır. Bu destekler arasında %50 vergi indirimi ve %15 yatırım tutarı oranında, 240 milyon TL’ye kadar nakdi destek veya %20 oranında, yine 240 milyon TL’ye kadar faiz/kâr payı desteği bulunmaktadır. Ayrıca KDV istisnası, yatırım yeri tahsisi, gümrük vergisi muafiyeti gibi avantajlar sağlanmaktadır. Bu destekler ile yatırımların artması hedeflenmektedir.

ç) Güney Marmara Bölgesi Özelinde Yeni Teşvik Mekanizmaları ve Destek Önerileri

Bu bölümde, Güney Marmara’nın temiz hidrojen ekosistemine geçişini hızlandırmak amacıyla önerilen politika araçları yatırım teşvikleri, tüketim teşvikleri, ihracat odaklı teşvikler ve kamu-özel iş birliği modelleri başlıkları altında incelenmektedir. Öneriler geliştirilirken hem arz tarafını (üretim ve altyapı yatırımları) hem de talep tarafını (sanayi ve ulaşımda tüketim) harekete geçirecek bütüncül bir yaklaşım benimsenmiştir. Bu mekanizmalar birbirini tamamlayıcı nitelikte olup, eşzamanlı uygulanmaları halinde bölgenin hidrojen ekonomisine geçişini hızlandıracağı düşünülmektedir.

5.4.3. Yatırım Teşvikleri (Üretim ve Dağıtım İçin)

Amaç: Temiz hidrojenin üretimi, depolanması ve dağıtımını için gerekli tesis ve altyapı yatırımlarının gerçekleşmesini hızlandırmak, bu alandaki yüksek sermaye maliyetlerini azaltarak özel sektöre yatırıma teşvik etmek.

Öneri 1.1: “Yeşil Hidrojen Yatırım Teşvik Paketi” Oluşturulması: Güney Marmara Bölgesi’nde kurulacak elektrolizör tesisleri, hidrojen depolama üniteleri, boru hattı ve dolum istasyonları gibi yatırımlara özel bir teşvik paketi tanımlanmalıdır. Halihazırda Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

tarafından ilan edilen Yerel Kalkınma Hamlesi Teşvik Programı doğrultusunda Balıkesir'de yeşil hidrojen üretiminin yatırım konuları arasına alındığı görülmektedir. Mevcut teşvik paketinin Güney Marmara Bölgesini kapsayacak şekilde genişletilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda mevcut teşvik programına ek olarak önerilen yeşil hidrojen yatırım teşvik paketi kapsamında:

- **Sabit Sermaye Yatırım Desteği** (yatırımın %30-50'sine kadar hibe veya %0 faizli uzun vadeli kredi),
- **Vergi İndirimi** (bu yatırımlardan elde edilecek kazançlar için ilk 10 yıl kurumlar vergisinde muafiyet veya indirim),
- **Gümrük Vergisi Muafiyeti** (elektrolizör, kompresör, yakıt hücresi vb. ithal ekipman için),
- **Arsa Teşviki** (kamu arazilerinin sembolik bedellerle tahsisi) ve
- **İşletme Desteği** (ilk 5 yıl üretilen hidrojenin birim başına belirli oranda sübvansiyonu) gibi unsurlar yer almalıdır.

Bu tür entegre bir teşvik seti, yatırımcıların ön yükleme maliyetlerini önemli ölçüde düşürecek ve projelerin fizibilitesini artıracaktır. Örneğin, ABD'nin sağladığı kg başına 3\$'lık üretim kredisi benzeri bir destek, yatırımcıların gelir projeksiyonlarını iyileştirerek finansman bulmalarını kolaylaştırmaktadır [172]. Benzer şekilde Hollanda ve Danimarka gibi ülkeler, hidrojen üreticilerine ürettikleri hidrojen miktarı başına sabit ödemeler yaparak ilk tesislerin kurulmasını teşvik etmektedir. Türkiye de, Yerel Kalkınma Hamlesi Teşvik Programı kapsamında Balıkesir ili özelinde yeşil hidrojen üretimi desteği açıklansa da Güney Marmara genelinde kapsamlı ve benzeri bir üretim desteği mekanizmasını devreye alınabilir.

Öneri 1.2: Elektrolizör ve Ekipman Üretimine Yönelik Teşvikler: Hidrojen değer zincirinin kritik ekipmanlarında yerli kapasitenin geliştirilmesi, uzun vadede dışa bağımlılığı ve maliyetleri azaltacaktır. Bu amaçla, Güney Marmara'da elektrolizör imalatı, yakıt hücresi üretimi, hidrojen tankı ve kritik malzeme (ör. membran, katalizör) fabrikaları kurulmasını özendirmek için özel teşvikler sunulmalıdır. Mevcut "Proje Bazlı Teşvik Sistemi" kapsamında bu yatırımlar stratejik yatırım statüsüne alınabilir ve %100 vergi indirimi, 10 yıla varan SGK primi desteği, enerji desteği gibi avantajlar sağlanabilir. Ayrıca hidrojen teknolojileri alanında Teknoloji Geliştirme Bölgeleri (Teknopark) kurulup burada üretim yapacak firmalara gelir vergisi muafiyeti, KDV istisnası gibi Ar-Ge teşvikleri genişletilmelidir. GMKA'nın vizyonunda yer alan Sodyum Borhidür (NaBH_4) gibi yenilikçi hidrojen depolama malzemelerinin üretimi de bu kapsamda desteklenmelidir. Türkiye, güçlü olduğu bor kimyasalları alanında bu tür katma değerli ürünlerle dünya pazarında söz sahibi olabilir. Sonuç olarak, "Güney Marmara Temiz Hidrojen Teknoloji Merkezleri" oluşturularak, bölgenin hem bir üretim üssü hem de bir inovasyon üssü haline gelmesi hedeflenmelidir.

Öneri 1.3: Altyapı Yatırımları İçin Kamu-Özel Finansmanı (PPP) Modelleri: Hidrojenin üretim noktalarından tüketim noktalarına taşınması için boru hatları, dağıtım şebekeleri, liman terminalleri, dolum istasyonları gibi altyapı yatırımları kritik önem taşır. Bu altyapının kurulumu genellikle yüksek maliyetli olup, kısa vadede tam ticari getirisi belirsiz olabilir. Bu nedenle, kamu-özel sektör iş birliği (PPP) modelleri devreye sokulmalıdır. Örneğin, Bandırma ile Bursa OSB'leri arasında veya Bandırma Limanı ile hinterlandındaki sanayi tesisleri arasında döşenecek bir hidrojen boru hattı projesi, yap-işlet-devret modeliyle gerçekleştirilebilir. Devlet, ilk yıllarda hattın kapasite kullanımını garanti edebilir ya da inşa eden şirkete belirli bir kullanım bedeli ödeme taahhüdü verebilir. Bu sayede özel sektör, uzun vadeli talep güvencesiyle projeye çekilecektir. Benzer şekilde, limanlarda kurulacak sıvı hidrojen/amonyak depolama ve dolum terminalleri için (özellikle ihracat amaçlı) devlet, gerekirse bir Varlık Fonu veya kalkınma bankası aracılığıyla eş finansman sağlayabilir. Özellikle ihracat altyapısında zamanlama kritiktir; Avrupa'nın hidrojen ithalat planları devreye girmeden önce Türkiye'nin hazır kapasite sunabilmesi rekabet avantajı yaratacaktır. Bu nedenle, kamu desteğiyle Bandırma veya Çanakkale'de bir Yeşil Yakıt İhracat Terminali inşası stratejik bir yatırım olarak değerlendirilmelidir. Özetle, üretim ve dağıtım altyapısına yönelik yatırım teşvikleri kamu teşviki ve özel girişimi bir araya getiren yenilikçi

finansman modelleriyle desteklenirse, Güney Marmara kısa sürede bir hidrojen üretim ve lojistik merkezi haline gelebilir.

5.4.4. Tüketim Teşvikleri (Talep Yaratılması İçin)

Amaç: Sanayi, ulaşım ve diğer sektörlerde temiz hidrojen ve türevlerinin kullanımını özendirerek talep yaratmak, böylece arz-talep dengesini kurup ölçek ekonomileriyle maliyetleri düşürmek. Talep tarafında oluşacak güvence, üretim yatırımlarının riskini azaltacak ve hidrojen ekosisteminin bütünleşik gelişimini sağlayacaktır.

Öneri 2.1: Sanayi Sektörü İçin “Temiz Hidrojen Kullanım Destekleri”: Güney Marmara Bölgesi’ndeki enerji yoğun sanayi tesislerinin (ör. rafineriler, gübre fabrikaları, cam/seramik fırınları, demir-çelik haddehaneleri, çimento klinker fırınları) fosil yakıt yerine yeşil hidrojen kullanmalarını teşvik etmeye yönelik kullanım destekleri sağlanmalıdır. Bu kapsamda, Tüketim Sübvansiyonu mekanizması önerilmektedir: Sanayi kuruluşlarına, tükettikleri her birim (ör. her Nm³ hidrojen veya hidrojen eşdeğeri) yeşil hidrojen için belirli bir parasal destek verilebilir. Destek miktarı, temiz hidrojenin mevcut fiyatı ile eşdeğer fosil yakıtın fiyatı arasındaki farkın bir kısmını kapatacak şekilde dinamik olarak belirlenmelidir. Örneğin güncel durumda yeşil hidrojen üretim maliyeti gri hidrojene kıyasla en az 2-3 kat fazladır [160]. Bu maliyet farkı karbon fiyatları veya gönüllü piyasalarla telafi edilemediği müddetçe, devlet desteğiyle makul seviyelere çekilmelidir. Bu amaca yönelik olarak Almanya ve Birleşik Krallık’ın başlattığı Carbon Contracts for Difference (CCfD) modeli de uygulanabilir (yukarıda açıklandığı üzere). Türkiye’de kamu otoritesi (örneğin Bakanlık veya bir fon) sanayi tesisleriyle ihaleye dayalı CCfD sözleşmeleri yaparak, örneğin yeşil hidrojen kullanarak üretecekleri birim ürün (çelik, gübre vs.) başına gerekli prim tutarını taahhüt edebilir. Böyle bir model, sanayicilerin önlerini görmesini sağlayarak dönüşüm yatırımlarını hızlandıracaktır. Nitekim Birleşik Krallık ve Almanya’daki uygulamalar, çelik fabrikaları ve kimya tesislerinin bu sayede hidrojen bazlı teknolojilere yatırım kararı aldıklarını göstermektedir [172]. Güney Marmara’da da özellikle gübre (amonyak) üreticileri için yeşil hidrojen kullanımı kritik bir dönüşüm adımıdır; zira amonyak üretimi Türkiye’de doğalgaza bağımlı ve yüksek emisyonlu bir süreçtir. Bu tesislere verilecek tüketim sübvansiyonu, bir yandan CBAM ile gelebilecek mali yükleri azaltacak, diğer yandan uzun vadede rekabetçi kalmalarını sağlayacaktır. Benzer şekilde, seramik, cam gibi doğal gaz yoğun sektörlerde hidrojenin yakıt olarak kademeli karıştırılması pilotları teşvik edilmelidir. GMKA’nın pilot projeleri arasında yer alan hidrojenle çalışan hibrit seramik fırını bu açıdan önemli bir örnektir [171]. Bu pilot projelerin ticarileşmesi için şirketlere hibe ve geri ödemesiz kredi desteği verilebilir.

Öneri 2.2: Ulaşım Sektöründe Talep Yaratıcı Teşvikler: Güney Marmara, coğrafi konumu gereği karayolu, denizyolu ve demiryolu taşımacılığının kesiştiği bir bölgedir. Özellikle ağır taşımacılık filoları (kamyonlar, otobüsler), belediye toplu taşıma araçları, feribotlar ve liman içi ekipmanlar hidrojen yakıt hücresi teknolojisine uygun adaylardır. Bu alanda talep yaratmak için:

- **Araç alım teşvikleri:** Belediye ve özel sektörün yakıt hücreli otobüs, kamyon alımlarında %50’ye varan hibe desteği sağlanabilir. Bu yöntem, halihazırda bazı AB ülkelerinde uygulanmaktadır (ör. Almanya 2021’de 80 adet hidrojenli otobüs alımını %80 oranında sübvansiyonla desteklemiştir).
- **Yakıt teşviki:** Hidrojen yakıt ikmali için birim başına indirim veya kredi mekanizması sunulabilir. Örneğin şehirlerarası taşımacılık yapan ve hidrojen kullanan kamyon firmalarına her km başına belirli bir tutar destek verilebilir.
- **Altyapı ve operasyonel kolaylıklar:** Hidrojenli araç kullanan şirketlere otoyol ve köprü geçişlerinde indirim, limanlarda öncelik ve indirimli hizmet, şehir merkezlerine giriş kolaylığı (düşük emisyon bölgelerine serbest giriş gibi) avantajları tanınabilir. Bu tür pozitif ayrımcılık, lojistik firmalarını fosil araçlardan uzaklaşmaya yönlendirecektir.

- **Kamu alım garantisi:** Bölgedeki belediyeler, ulaşım filolarını yenilerken belirli sayıda hidrojen yakıtlı otobüs ve hizmet aracı almayı taahhüt edebilir. Kamu tarafından yaratılacak bu başlangıç pazarı, üreticileri ve tedarik zincirini bölgeye çekecektir.
- **Yeşil Koridorlar:** Balıkesir-Bursa arasında veya Çanakkale güzergâhında “hidrojen yakıt ikmal koridoru” oluşturulabilir. Bu koridorda belli aralıklarla hidrojen dolum istasyonları kurularak hidrojenli araçların güvenle seyahat etmesi sağlanır. AB’de H2 Mobility programı benzeri bu yaklaşım, özel sektör istasyon yatırımını da teşvik edecektir. Sonuç olarak, ulaşımında bu tip teşvikler sayesinde hem hava kalitesi iyileşecek, hem de bölgede hidrojen talebinin önemli bir kısmı oluşturulacaktır. Özellikle karayolu taşımacılığında fosil yakıtların %10’unun hidrojenle ikamesi, bölgede ciddi bir talep tabanı yaratabilir.

Öneri 2.3: Yenilenebilir Gazlar İçin Pazar Garantisi – “Yeşil Gaz Sertifika Sistemi”: Hidrojenin doğrudan son kullanımının yanı sıra, doğal gaz şebekesine karıştırılması da önemli bir tüketim alanıdır. Güney Marmara, Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş. (BOTAŞ) doğalgaz iletim hatlarına yakınlığı sayesinde, üretilen hidrojenin karışım yoluyla geniş bir coğrafyaya dağıtımına imkân verebilir. Bu kapsamda, devlet tarafından Garanti Belgesi (Guarantee of Origin) ve Yeşil Gaz Sertifikası sistemi kurulmalıdır. Üreticiler, belirli sürdürülebilirlik kriterlerini sağlayan yeşil hidrojeni şebekeye verdiklerinde sertifika alacak; son kullanıcılar (örneğin sanayi tesisleri) bu sertifikaları satın alarak tüketimlerini yeşil hidrojen olarak kaydedebilecektir. Bu mekanizma, Avrupa’da elektrikte kullanılan yenilenebilir enerji sertifikalarının bir benzeri olarak gaz piyasasına uygulanabilir. Sertifika ticareti sayesinde, yeşil hidrojen kullanan şirketler marka değerlerini artırırken, karbon ayak izlerini düşürdükleri için CBAM gibi düzenlemelere uyumlu hale gelirler. Devlet başlangıçta sertifikalara taban alım fiyatı garantisi vererek piyasayı canlandırabilir. Örneğin her 1 MWh eşdeğeri yeşil hidrojen sertifikası için kamu fonu üzerinden 50 € taban değer taahhüt edilebilir (eğer piyasada daha yüksek fiyat oluşmazsa, devlet aradaki farkı öder). Bu sayede hidrojen üreticileri için ek bir gelir kaynağı oluşur, tüketiciler için de harcadıkları farkın bir kısmı geri dönmüş olur. Orta vadede gönüllü karbon piyasaları ve uluslararası şirketlerin talebiyle bu sertifikaların zaten değer kazanması muhtemeldir. Türkiye’nin bu sisteme erken geçiş yapması, Güney Marmara üreticilerinin AB pazarına yeşil hidrojen ihracını da kolaylaştıracaktır, zira AB’nin kendi hidrojen bankası ve ithalat mekanizmaları benzer sertifikasyon isteyecektir.

Öneri 2.4: Farkındalık, Eğitim ve İşgücü Geliştirme Destekleri: Talep tarafını canlandırmak için yalnızca finansal teşvikler değil, aynı zamanda teknik ve sosyal bariyerlerin aşılması da gereklidir. Hidrojen teknolojilerinin güvenliği ve uygulanabilirliği konusunda kamuoyu ve sanayi nezdinde çekinceler bulunabilir. Bu nedenle, Güney Marmara’da planlanan Hidrojen Eğitim ve Test Merkezi (Yeşil Deniz Endüstrisi Ar-Ge, Test ve Eğitim Merkezi) hızla faaliyete geçirilmeli ve burada sanayi çalışanlarına, yöneticilere hidrojenin güvenli kullanımı konusunda eğitim programları düzenlenmelidir. Kamu, bu merkezde eğitim alan firmalara eğitim teşvik kredisi verebilir veya eğitim masraflarını karşılayabilir. Ayrıca pilot uygulamalara yerel halkın ve paydaşların katılımını sağlamak için şeffaf iletişim stratejileri izlenmelidir. Örneğin bir OSB’de hidrojen kazan dönüşümü yapılacaksa, işçiler ve çevre halk bilgilendirilmeli, emniyet prosedürleri açıkça ortaya konmalıdır. Kabul edilebilirlik ve toplum desteği, uzun vadede talep tarafının gelişmesi için olmazsa olmazdır. Bu bağlamda kamu otoritesi, hidrojen projelerinde şeffaflık ve güvenlik denetimlerini en üst düzeyde tutarak toplumsal güveni inşa etmelidir. Son olarak, talep yönlü en önemli teşvik unsurlarından biri olacak karbon fiyatlandırması mekanizmasının ülke çapında uygulamaya konması da temiz hidrojen talebini dolaylı olarak artıracaktır. Ulusal düzeyde planlanan Emisyon Ticaret Sistemi veya karbon vergisi uygulamaya girerse, fosil yakıt kullanımı finansal olarak dezavantajlı hale gelecek ve yeşil hidrojen gibi alternatifler rekabet avantajı kazanacaktır. Bu nedenle, Güney Marmara’da pilot bir bölgesel karbon piyasası denemesi dahi yapılabileceği değerlendirilmektedir. Örneğin bölgedeki belli başlı sanayi tesisleri için gönüllü bir

karbon piyasası oluşturulup, emisyon azaltımı sağlayan hidrojen kullanımının kredi olarak ticareti sağlanabilir.

5.4.5. İhracat Odaklı Teşvikler

Amaç: Güney Marmara’da üretilecek yeşil hidrojen ve türevlerinin uluslararası pazarlara (özellikle Avrupa’ya) ihracatını kolaylaştırmak, bölgenin bir yeşil yakıt ihracat merkezi haline gelmesini teşvik etmek. Bu doğrultuda hem üreticilerin rekabetçiliğini artıracak hem de gerekli ihracat altyapısını oluşturacak destekler planlanmalıdır.

Öneri 3.1: Yeşil Hidrojen İhracat Konsorsiyumu ve Fiyat Destek Mekanizması: AB ve diğer talep bölgelerine yeşil hidrojen ihracı, önümüzdeki on yıllarda Güney Marmara ekonomisi için önemli bir fırsat olacaktır. Ancak şu an için uluslararası hidrojen fiyatları belirsiz ve rekabetçi bir piyasa oluşmamıştır. Bu durumda, Türkiye’nin aktif rol alarak ihracatçıları desteklemesi stratejik çıkarınadır. Almanya’nın uyguladığı H2Global modeli, örnek alınabilecek bir mekanizmadır. Bu modelde Alman hükümeti destekli bir konsorsiyum, bir yandan uluslararası üreticilerle uzun vadeli hidrojen türevi alım sözleşmeleri (yüksek fiyatla), diğer yandan Alman tüketicilerle satış sözleşmeleri (daha düşük fiyatla) yaparak aradaki farkı kamu bütçesinden karşılamaktadır [172]. Böylece ihracatçıların önünü görebilmesi ve projelerin finansman bulması sağlanmıştır. Türkiye de benzer şekilde bir “Yeşil Hidrojen İhracat Konsorsiyumu” kurabilir. Bu konsorsiyum (örneğin enerji bakanlığı koordinasyonunda EÜAŞ, BOTAŞ, TPAO gibi kamu şirketleri ile özel sektör üreticileri ortaklığında) Avrupa’daki alıcılara ve Güney Marmara’daki üreticilerle eşzamanlı anlaşmalar yapabilir. Konsorsiyum, üreticilere belli bir taban fiyat (örneğin 4 €/kg) garanti ederken, AB pazarında oluşacak daha düşük fiyatla satışı gerçekleştirir; aradaki farkı uluslararası fonlar ve kamu katkıları ile kapatır. AB’nin de benzer bir ihracat odaklı program başlatma niyeti olduğu bilinmektedir; dolayısıyla Türkiye-AB arasında finansmanı paylaşılmış ortak bir H2Global benzeri mekanizma geliştirilebilir. Bu öneri, kamu-özel sektör iş birliği içinde ihracatı mümkün kılan yenilikçi bir finansman modeli olarak öne çıkmaktadır. Türkiye’nin 2050’de yılda 1,5-1,9 milyon ton yeşil hidrojen ihracat potansiyeli bulunduğu hesaplanmıştır. Bu potansiyelin gerçeğe dönüşmesi, büyük ölçüde böyle mekanizmalarla ilk projelerin gerçekleşmesine bağlı olacaktır.

Öneri 3.2: İhracat Altyapısına Yönelik Yatırım Kolaylıkları: Güney Marmara limanlarının yeşil hidrojen ve türevleri ihracatına hazırlanması için gereken yatırımlar (sıvı hidrojen tankları, amonyak terminalleri, özel yükleme iskeleleri, gemi yakıt ikmal tesisleri vb.) stratejik altyapı ilan edilerek desteklenmelidir. Bu kapsamda, bu yatırımları yapacak şirketlere uzun vadeli işletme hakları, yatırım teşvik belgeleri (KDV istisnası, vergi indirim gibi) verilebilir. Özellikle Bandırma Limanı’nın genişleme planlarında yeşil yakıt terminaline yer ayrılması sağlanmalıdır. Benzer şekilde Karabiga veya Çanakkale’de ihracat odaklı sanayi-etkin liman entegre projeleri geliştirilebilir (örneğin bir hidrojen üretim tesisi ile bitişik ihracat iskelesi kompleksi). Devlet, bu tür projelerde ÇED ve ruhsat süreçlerini hızlandırmak için özel birim kurabilir. Ayrıca ihracat sürecinde önemli bir unsur olan sertifikasyon ve standartlar konusunda firmalara teknik destek verilmelidir. AB pazarına yapılacak ihracatta hidrojenin karbon ayak izini belgeleyen Guarantee of Origin sertifikaları ve sürdürülebilirlik kriterleri aranacaktır. Türk ihracatçıları bu konuda şimdiden hazırlamak üzere TSE ve ilgili kurumlar iş birliğinde bir Yeşil Hidrojen Sertifikasyon Programı başlatılmalıdır. Bu program, üreticilere ölçüm, raporlama ve doğrulama süreçlerinde rehberlik edecek; gerekirse maliyetlerin bir kısmını kamu üstlenecektir. Böylece “Türkiye Menşeli Yeşil Hidrojen” markası oluşturularak uluslararası alıcılarda güven tesis edilebilir.

Öneri 3.3: Uluslararası İş Birlikleri ve Diplomatik Girişimler: İhracatın sürdürülebilir ve ölçekli olabilmesi için Türkiye’nin uluslararası hidrojen iş birliklerinde aktif rol alması gerekir. Bu doğrultuda:

- AB ile müzakerelerde (Gümrük Birliği güncellemesi vb.) yeşil hidrojen ticareti kolaylaştırıcı hükümler eklenmesi gündeme getirilebilir. Örneğin, AB'nin gelecekte uygulayacağı CBAM mekanizmasında Türk ürünlerinin karbon içeriğini düşürmek için yeşil hidrojen kullanımını teşvik edecek finansal araçlar talep edilebilir.
- Almanya, Japonya, Güney Kore gibi potansiyel büyük ithalatçılarla hükümetlerarası Mutabakat Anlaşması (MoU) anlaşmaları imzalanabilir. Bu anlaşmalarda belirli bir miktar yeşil hidrojen/yeşil amonyak alımı için niyet beyanları ve finansman destekleri (alıcı kredileri, ortak fonlar vb.) yer alabilir. Örneğin Almanya hali hazırda bazı Ortadoğu ülkeleriyle yeşil hidrojen tedarigi için ikili anlaşmalar yapmıştır; benzeri bir yaklaşım Türkiye ile de geliştirilebilir.
- Güney Marmara Bölgesi'ndeki pilot projelere uluslararası hibe ve kredi sağlanması için girişimler artırılmalıdır. Dünya Bankası, EBRD, Avrupa Yatırım Bankası gibi kuruluşlar hidrojen projelerini fonlamaya başlamıştır. Bu kurumlarla görüşülerek Bandırma veya Çanakkale'deki ölçekli projelere uygun koşullu krediler sağlanabilir. Özellikle "iklim finansmanı" başlığı altında düşük faizli uzun vadeli kaynaklar temin edilebilir.
- Son olarak, boru hatlarıyla ihracat seçeneği de stratejik planda tutulmalıdır. Bugün teknik olarak zor görünse de, gelecekte Türkiye'den Avrupa'ya uzanacak bir hidrojen boru hattı (veya TANAP gibi mevcut doğal gaz hatlarına hidrojen karıştırılması) söz konusu olabilir. Bu ihtimale yönelik mühendislik ve fizibilite çalışmaları şimdiden başlatılmalıdır. Hatta gerekirse AB'nin "Avrupa Hidrojen Omurgası" planına Türkiye'nin de dahil edilmesi diplomatik düzeyde gündeme getirilmelidir. Böylelikle Güney Marmara'dan Avrupa'ya uzanan fiziksel bağlantılar mümkün olduğunda, Türkiye hazır konumda olacaktır.

5.4.6. Kamu-Özel Sektör İş Birliği Modelleri

Amaç: Temiz hidrojen ekosisteminin gelişimi için gerekli yatırımların ve projelerin etkin şekilde hayata geçirilmesi amacıyla kamu ve özel sektörün riskleri ve finansmanı paylaşacağı modeller geliştirmek. Hidrojen gibi yeni bir alanda, sermaye yükünü ve operasyonel riskleri sadece özel sektörün taşıması beklenmemeli; kamu otoritesi de uygun araçlarla sürece ortak olmalıdır.

Öneri 4.1: Hidrojen Vadisi Konsorsiyumu'nun Kurumsallaştırılması: Güney Marmara'da halihazırda uygulama aşamasında olan Hidrojen Vadisi projesi, fiilen çok paydaşlı bir konsorsiyum tarafından yürütülmektedir. Bu yapının kurumsal bir çerçeveye kavuşturularak Güney Marmara Hidrojen Ajansı veya Platformu şeklinde sürekli bir yönetim mekanizmasına dönüştürülmesi önerilmektedir. Bu platformda valilikler, belediyeler, kalkınma ajansı, üniversiteler, özel sektör firmaları ve sivil toplum temsilcileri bulunacaktır. Platform, bölgede hidrojen alanındaki tüm projelerin eşgüdümünü sağlayacak, ihtiyaç duyulan ortak altyapıları planlayacak ve finansman için ulusal/uluslararası kaynaklara başvuracaktır. Örneğin Avrupa'daki hidrojen vadileri programı kapsamında hibeler bu tip konsorsiyumlara verilmektedir ve Güney Marmara platformu da 8 milyon € AB hibesi kazanarak başarısını kanıtlamıştır. Bu yapının devamlılığı, gelecekte daha büyük fonların (Horizon Europe vb.) bölgeye çekilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca platform bünyesinde bir Yatırımcı Danışma Kurulu oluşturularak özel sektörün görüşleri düzenli alınmalı, bürokratik engeller tespit edilerek çözümler üretilmelidir. Kamu-özel diyalogunun sürekliliği, hızla karar alınıp uygulanmasına imkân verecektir.

Öneri 4.2: Kamu Alım ve Yatırım Garantileri: Kamu, hidrojen ekosisteminin belirli bileşenlerinde garantili alıcı veya yatırımcı rolü üstlenebilir. Örneğin Bandırma'daki kombine çevrim santralinde üretilecek yeşil hidrojeni belirli bir fiyattan satın alma garantisi verilebilir (kamu elektrik üreticisi EUAS üzerinden). Bu, hidrojen üreticisine doğrudan pazar güvencesi sunar. Benzer şekilde TCDD Taşımacılık, 2030'a kadar alacağı lokomotiflerin belli bir kısmını hidrojen yakıtlı olarak tercih edeceğini ilan edebilir. Bu ilan, üretici firmalara ön sinyal olurken, devlet de gerekirse fiyat farkını sübvans ederek alımı gerçekleştirir. Bir diğer enstrüman, kredi garantileridir. Özel sektörün

alacağı proje finansmanı kredilerinde, Hazine kısmi risk garantisi verebilir. Bu sayede finansman maliyeti düşer ve projelerin bankabilitesi artar. PPP modellerinde de benzer şekilde, örneğin bir hidrojen boru hattı projesinde asgari gelir garantisi sunulabilir. Bu model Türkiye’de şehir hastaneleri, otoyollar vb. için uygulanmıştır; uygun tasarım ile hidrojen altyapısında da kullanılabilir. Kamu garantilerinin güvence altına alınması için, hidrojen projeleri Yatırım Programına alınarak devlet bütçesinde pay ayrılması sağlanmalıdır.

Öneri 4.3: Ortak Girişimler ve Yatırım Fonları: Kamu ve özel sektörün birlikte sermaye koyarak şirket kurması veya fon oluşturması, hidrojen alanında risk paylaşımı açısından değerlidir. Örneğin Eti Maden gibi bölgeye özgü bir kamu kuruluşu, yeşil hidrojen veya türevi üretecek bir tesise ortak olabilir. Eti Maden’in mevcut bor kimyasalları tesisleri yanında kurulacak bir yeşil amonyak üretim tesisinde %30 kamu ortaklığı olması, özel ortak için güven unsuru olacaktır. Aynı şekilde BOTAŞ, doğalgazdaki tecrübesini hidrojen depolama ve iletimine taşıyarak Güney Marmara’da bir H2 dağıtım şirketi ortak girişimine katılabilir. Bu ortak girişim OSB’lere hidrojen dağıtır, limanlara yakıt sağlar. Finansman tarafında ise, örneğin Türkiye Kalkınma ve Yatırım Bankası (TKYB) öncülüğünde bir Yeşil Hidrojen Fonu kurulabilir. Bu fon, kamu kaynakları ve uluslararası iklim finansmanını bir araya getirerek bölgedeki projelere özsermaye veya uzun vadeli kredi sağlayabilir. Özel sektör de bu fona yatırımlarından pay alarak katılabilir. Özetle, ortak yatırım mekanizmaları yüksek sermaye gerektiren hidrojen projelerinde hem sermaye havuzu oluşturmak hem de risk bölüşümü için etkili olacaktır.

Öneri 4.4: Eğitim, Ar-Ge ve İnovasyon İş Birlikleri: Kamu-özel iş birliğinin bir diğer boyutu, bilgi ve insan kaynağı geliştirmektir. Bölgede kurulacak Hidrojen Mükemmeliyet Merkezi, üniversite ve sanayi ortaklığıyla işletilmeli; müfredatlar ve araştırma programları birlikte tasarlanmalıdır. Sanayi şirketleri, araştırma projelerine hem finansman hem de uygulama ortamı sağlayarak dahil olmalıdır. TÜBİTAK ve üniversiteler, özel sektörün ihtiyacına yönelik prototip geliştirmeye öncelik vermelidir. Bu sayede bölgeden çıkan yenilikçi fikirler (örneğin daha ucuz elektrolizör, yeni depolama malzemesi vb.) hızla ticarileşebilir. Savunma sanayi şirketlerinin dahi yer aldığı mevcut konsorsiyum yapısı korunarak, farklı sektörlerin sinerjisi devam ettirilmelidir. Kamu ise bu Ar-Ge iş birliklerini Teknopark, SANTEZ, BIGG gibi programlarla fonlamaya devam etmelidir.

5.4.7. Sonuç

Güney Marmara Bölgesi, güçlü sanayi temeli, zengin yenilenebilir enerji kaynakları ve stratejik lojistik konumuyla Türkiye’nin temiz hidrojen merkezine dönüşme potansiyeline sahiptir. Bu potansiyelin gerçekleştirilebilmesi, uygulamaya konulacak doğru teşvik mekanizmalarına ve destek politikalarına bağlıdır. Bu raporda uluslararası başarılı örnekler ışığında, bölge özelinde tasarlanmış bir teşvik çerçevesi sunulmuştur ve yukarıda detayı verilen önerilerin özeti Tablo 12’de özetlenmiştir. Öneriler, yatırım teşvikleri yoluyla hidrojen üretim ve dağıtım altyapısının hızla kurulmasını, eşzamanlı tüketim teşvikleri ile sanayi ve ulaşımda temiz hidrojen kullanımının yaygınlaşmasını ve ihracat destekleri ile Güney Marmara’nın küresel hidrojen tedarik zincirine entegrasyonunu hedeflemektedir. Bu politikaların hayata geçirilmesinde kamu-özel sektör iş birliği kritik rol oynayacaktır. Hem finansmanın sağlanması hem de bilgi birikiminin paylaşılması açısından ortaklık modelleri, risklerin dengeli dağılımını mümkün kılacaktır.

Tablo 12. Güney Marmara Bölgesi Özelinde Yeni Teşvik Mekanizmaları Ve Destek Önerileri

Teşvik Mekanizmaları ve Destek Önerileri		Amaç
Yatırım Teşvikleri (Üretim ve Dağıtım)	"Yeşil Hidrojen Yatırım Teşvik Paketi" Oluşturulması	Güney Marmara'da elektrolizör, depolama vb. tesis yatırımlarını hızlandırmak için entegre teşviklerle yatırım maliyetini düşürmek
	Elektrolizör ve Ekipman Üretimine Yönelik Teşvikler	Hidrojen değer zincirindeki kritik ekipmanların yerli üretimini teşvik ederek dışa bağımlılığı ve maliyetleri azaltmak
	Altyapı Yatırımları İçin Kamu-Özel Finansmanı (PPP) Modelleri	Hidrojenin üretim noktalarından tüketim noktalarına taşınması için gereken pahalı altyapıyı PPP modelleriyle hayata geçirmek
Tüketim Teşvikleri (Talep Yararılması)	Sanayi Sektörü İçin Temiz Hidrojen Kullanım Destekleri	Sanayide yeşil hidrojen kullanımının önünü açmak için fosil yakıtla olan maliyet farkını devlet desteğiyle azaltarak talep oluşturmak
	Ulaşım Sektöründe Talep Yaratıcı Teşvikler	Taşımacılıkta hidrojenli araç kullanımını artırmak için araç alımı, yakıt ve altyapı konularında teşvik ve kolaylıklar sunarak talep yaratmak
	Yenilenebilir Gazlar İçin Pazar Garantisi – "Yeşil Gaz Sertifika Sistemi"	Yeşil hidrojenin doğal gaz şebekesine karıştırılmasını teşvik edip kaynağını belgelendirmek ve üreticilere ek gelir imkânı sunmak
	Farkındalık, Eğitim ve İşgücü Geliştirme Destekleri	Hidrojen teknolojilerine yönelik bilgi, güvenlik ve becerileri artırarak talep tarafındaki sosyal-teknik engelleri aşmak; ayrıca karbon fiyatlamasıyla yeşil hidrojenin rekabet gücünü artırmak
İhracat Odaklı Teşvikler	Yeşil Hidrojen İhracat Konsorsiyumu ve Fiyat Destek Mekanizması	Yeşil hidrojen ihracatçılarına uzun vadeli fiyat garantisi sağlayarak ilk projelerin finansmanını ve ihracatın başlamasını mümkün kılmak
	İhracat Altyapısına Yönelik Yatırım Kolaylıkları	Bölgenin yeşil hidrojen ihracat altyapısının gelişmesi için yatırımcılara kolaylık ve teşvikler sağlamak; ayrıca ihracat için gerekli sertifikasyon ve standartlara uyumu temin etmek
	Uluslararası İş Birlikleri ve Diplomatik Girişimler	Yeşil hidrojen ihracatını sürdürülebilir kılmak için uluslararası iş birlikleri ve anlaşmalarla pazar garantisi, finansman ve altyapı entegrasyonu sağlamak
Kamu-Özel Sektör İş Birliği Modelleri	Hidrojen Vadisi Konsorsiyumu'nun Kurumsallaştırılması	Bölgede hidrojen projelerinin etkili yürütülmesi için kamu-özel tüm paydaşları bir araya getiren kalıcı bir yönetim mekanizması oluşturmak
	Kamu Alım ve Yatırım Garantileri	Kamu alım ve kredi garantileriyle hidrojen projelerine pazar ve finansman güvencesi sağlayarak özel sektörü yatırıma teşvik etmek
	Ortak Girişimler ve Yatırım Fonları	Kamu ve özel sektörün birlikte sermaye koyduğu ortak girişimler ve fonlarla yüksek sermaye gerektiren hidrojen projelerinde risk paylaşımı ve finansman sağlamak
	Eğitim, Ar-Ge ve İnovasyon İş Birlikleri	Kamu-özel Ar-Ge ve eğitim iş birlikleriyle hidrojen alanında nitelikli işgücü yetiştirip yenilikçi teknolojilerin hızla geliştirilmesini sağlamak

Güney Marmara'ya özgü geliştirilen bu teşvik ve iş modeli önerileri, aslında Türkiye'nin geneli için de bir pilot uygulama niteliğindedir. Bölgeden elde edilecek deneyimler, ulusal hidrojen stratejisinin şekillenmesine katkı sunacak; başarılı bulunan mekanizmalar ülke çapında ölçeklendirilebilecektir. Orta ve uzun vadede, bölgede yeşil hidrojen kullanımı sayesinde sanayide önemli ölçüde karbon emisyon azaltımı sağlanması, bu sayede AB'nin sınırda karbon vergisi gibi uygulamalarının bölge ihracatçılarına etkisinin minimize edilmesi beklenmektedir. Ayrıca yeni oluşacak hidrojen ekonomisi etrafında yerel istihdam ve teknolojik uzmanlık alanları doğacaktır. Rüzgâr ve güneşten hidrojen üretimine, oradan yeşil yakıt ihracatına uzanan değer zinciri boyunca, Güney Marmara birçok ilke imza atmaya başlamıştır Türkiye'nin ilk yeşil hidrojen tesisleri, ilk yeşil endüstri bölgesi, ilk hidrojen eğitim merkezi gibi adımlar bölgeden çıkmaktadır.

Bu atılımın sürdürülebilir olması ve ölçeklenebilmesi için kamu otoritelerinin ve özel sektörün güçlü bir irade ortaya koyarak önerilen teşvik paketlerini uygulamaya sokması gerekmektedir. Sonuç olarak, temiz hidrojen ve türevleri, Güney Marmara için bir sanayi dönüşümü ve kalkınma fırsatıdır. Bu fırsatın gerçeğe dönüşmesi, doğru politika araçlarının zamanlı ve kararlı şekilde uygulanmasına bağlıdır. Dünya hidrojen yarışında Türkiye'nin ve Güney Marmara'nın ön sıralarda yer alabilmesi için, bugünden atılacak adımlar yarının düşük karbonlu ekonomisinin temelini oluşturacaktır. Gerekli finansal destekler ve düzenleyici kolaylıklar sağlandığında, bölge sanayisi temiz hidrojene geçiş yaparak rekabet gücünü koruyacak, aynı zamanda Türkiye'yi küresel hidrojen tedarikçilerinden biri konumuna yükseltecektir.

5.5. Mevzuatsal Gerekliliklerin Belirlenmesi ve Yasal Çerçeveye Yönelik Öneriler

Temiz hidrojen, küresel ölçekte düşük karbonlu ekonomiye geçişin kilit unsurlarından biri olarak görülmekte ve birçok ülke hidrojen konusunda uzun vadeli stratejiler ve düzenleyici çerçeveler oluşturmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği (AB), yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil hidrojenin tanımını ve sürdürülebilirlik kriterlerini netleştiren kapsamlı düzenlemeler benimsemiştir. 2023 yılında AB Komisyonu, yeşil hidrojenin "Renewable Fuels of Non-Biological Origin" (RFNBO) olarak sınıflandırılması ve buna ilişkin sera gazı hesaplama yöntemleri konusunda iki Yetkilendirilmiş Tüzük (CDR 2023/1184 ve 2023/1185) yayımlamıştır [173]. Bu düzenlemeler, AB içinde üretilen veya ithal edilecek hidrojenin "temiz" sayılabilmesi için gerekli teknik ve sürdürülebilirlik kriterlerini ortaya koymaktadır. Örneğin, hidrojenin tamamen yenilenebilir elektrikten üretilmesi, birim hidrojen başına düşen karbon ayak izinin belirli bir eşiğin altında kalması ve üretimde katkısallık (additionality), zaman ve coğrafi eşleştirme gibi ilkelerin sağlanması aranmaktadır [173]. Bu kriterler, AB pazarına hidrojen tedarik etmek isteyen tüm aktörler için bağlayıcı hale gelmekte olup özellikle Türkiye gibi potansiyel ihracatçılar için de belirleyici olacaktır.

Benzer şekilde Amerika Birleşik Devletleri (ABD) de hidrojen alanında güçlü teşvik mekanizmaları ile ilerlemektedir. 2021 tarihli Altyapı Yatırım ve İstihdam Yasası kapsamında 8 milyar dolarlık bütçe ile Hidrojen Merkezleri (Hydrogen Hubs) programı başlatılmış; 2022 tarihli Enflasyon Azaltma Yasası (IRA) ise temiz hidrojen üretimine kilogram başına vergi destekleri sağlayarak özel sektörü yatırımlara özendirmiştir [174]. Bu sayede ABD'de temiz hidrojen üretim maliyetlerinin hızla düşmesi ve projelerin artması beklenmektedir. Japonya, Çin, Güney Kore, Birleşik Krallık gibi ülkeler de kendi hidrojen stratejilerini ilan ederek teknolojik Ar-Ge destekleri, altyapı yatırımları ve teşvikler yoluyla hidrojen ekonomisinde öncü olmayı hedeflemektedir. Küresel düzeyde standartlaştırma kuruluşları (ISO, IEC vb.) ve uluslararası girişimler de hidrojenin güvenli üretimi, taşınması ve kullanımı için ortak teknik standartlar ve sertifikasyon sistemleri geliştirmeye başlamıştır. Sonuç olarak, dünyada temiz hidrojenin yaygınlaşması için yasal ve teknik altyapı hızla şekillenmekte; bu durum Türkiye gibi yükselen piyasalarda da ulusal mevzuat ve standartların küresel normlara uyumlu biçimde oluşturulmasını gerektirmektedir.

5.5.1. Türkiye'de Temiz Hidrojen ve Yasal Altyapı İhtiyacı

Türkiye, 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda hidrojeni enerji dönüşümünün önemli bir bileşeni olarak konumlandırmaya başlamıştır. 2023 yılında T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan "Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası" bu alandaki ulusal vizyonu ortaya koymuş ve hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesi ile enerji sistemine entegrasyonu için politika hedeflerini tanımlamıştır [175]. Hidrojen stratejisi belgesi, Türkiye'de yerli bir hidrojen ekonomisinin gelişebilmesi için kritik bazı adımların altını çizmektedir. Bu adımların başında, mevcut mevzuatın hidrojen açısından gözden geçirilerek uygun hale getirilmesi gelmektedir [175]. Zira mevcut durumda Türkiye'de hidrojen üretimi, depolaması, taşınması ve kullanımına ilişkin kapsamlı ve özel bir birincil mevzuat bulunmamaktadır. Yasal

altyapı alanındaki bu boşluk, hem yatırımcılar hem de uygulayıcılar açısından belirsizlik yaratmaktadır.

Halihazırda Türk hukuk sisteminde hidrojen konusuna yalnızca birkaç sınırlı düzenlemede değinilmektedir. Örneğin, Enerji Verimliliği ile ilgili yönetmelikler alternatif yakıtların (biyoyakıt ve hidrojen gibi) kullanımının özendirilmesine dair genel hükümler içermektedir [176]. Ulaştırma alanında ise 2011 yılında yayımlanan “Hidrojen ile Çalışan Motorlu Araçların Tip Onayına İlişkin Yönetmelik” ve 2020 tarihli uygulama tebliği, hidrojen yakıtlı araçların standartlarını tanımlamaya yöneliktir [176]. Bunun dışında hidrojenin enerji üretimi, gaz şebekelerine entegrasyonu veya sanayide kullanımına dair özel bir kanun ya da ikincil mevzuat bulunmamaktadır. Bu durum, hidrojenin potansiyelinden tam anlamıyla yararlanılması önünde yapısal bir engel olarak değerlendirilmektedir.

Ulusal Hidrojen Stratejisi, yasal boşlukların giderilmesi amacıyla somut öneriler ortaya koymaktadır. Strateji belgesine göre, mevcut enerji mevzuatının hidrojen boyutuyla uyumlu hale getirilmesi önceliklidir. Bu kapsamda “mevcut mevzuatı gözden geçirerek hidrojen üretim, taşıma, depolama ve kullanım için uygun hale getirmek” önümüzdeki dönemin kritik politika hedeflerinden biri olarak belirlenmiştir [175]. Bu hedefe ulaşmak için iki farklı yaklaşım tartışılmaktadır: (1) Ayrı bir “Hidrojen Piyasası Kanunu” çıkarılması veya (2) halihazırdaki enerji piyasası kanunlarına hidrojen konusunda hükümler eklenmesi [175]. Strateji belgesi, hidrojen ekosisteminin kurulmasına yönelik özel bir kanun hazırlanabileceği gibi, Doğal Gaz Piyasası Kanunu (No. 4646), Elektrik Piyasası Kanunu (No. 6446) veya Yenilenebilir Enerji Kanunu (No. 5346) gibi mevcut yasalara hidrojenle ilgili düzenleyici çerçeve oluşturacak maddeler ilave edilebileceğini belirtmektedir [175]. Bu yaklaşım, hidrojenin mevcut enerji piyasalarına entegrasyonunu sağlama ve ihtiyaç duyulan ikincil mevzuatı (yönetmelikler, tebliğler) mevcut kurumsal yapı üzerinden çıkarma esnekliği sunabilir. Nitekim ulusal enerji planlaması dokümanlarında da 2035 yılına kadar doğal gaz şebekesine karıştırılacak hidrojen oranı için hedefler konulması (örn. %3,5 karışım oranı) ve bu doğrultuda teknik/ıdarî hazırlık yapılması öngörülmüştür [177]. Dolayısıyla, Türkiye’de temiz hidrojenin yaygınlaşması için yasal tanımların netleştirilmesi (örneğin “yeşil hidrojen” kavramının mevzuatta tarif edilmesi), lisanslama ve izin süreçlerinin belirlenmesi (hidrojen üretim tesislerinin ve depolama/iletim altyapısının hangi mercilerce lisanslanacağı), şebeke entegrasyonu kurallarının oluşturulması (doğal gaz şebekesine hidrojen karışım oranları, kalite gereklilikleri, güvenlik limitleri) ve teşvik mekanizmalarının hukuki dayanağının hazırlanması gerekmektedir. Strateji belgesi aynı zamanda hidrojenin enerji piyasalarına entegrasyonu için ilgili kurumların (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu – EPDK, vb.) görev ve sorumluluklarının tanımlanmasına da ihtiyaç olduğunu ima etmektedir. Sonuç olarak, Türkiye’de temiz hidrojenin gelişimi kurumsal ve uygulamaya yönelik sağlam bir yasal çerçeve oluşturulmasına bağlıdır. Bu alandaki mevzuatsal eksikliklerin giderilmesi, hem yatırım ortamının iyileştirilmesi hem de hidrojen projelerinin emniyetli ve sürdürülebilir biçimde hayata geçirilmesi açısından ön koşuldur.

5.5.2. Teknik Standartlar ve Güvenlik Düzenlemeleri

Yasal düzenlemelerin yanı sıra, teknik standartların ve düzenleyici normların belirlenmesi temiz hidrojen ekosisteminin gelişimi için hayati önem taşır. Hidrojen, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip bir enerji taşıyıcısı olduğundan, mevcut fosil yakıtlara göre depolama, taşımacılık ve kullanım aşamalarında özel güvenlik ve performans standartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Türkiye’de hali hazırda hidrojenin üretiminden son kullanımına kadarki zinciri kapsayan ulusal teknik standartlar ve kodlar sınırlı düzeydedir. Örneğin, endüstriyel tesis güvenliği mevzuatında hidrojen üretim tesislerine özgü detaylı standartlar bulunmamaktadır; aynı şekilde basınçlı hidrojen depolama, boru hatlarıyla hidrojen taşıma veya yakıt hücresi araçların dolum istasyonları gibi konularda henüz kapsamlı bir standart seti yayımlanmamıştır. Bu boşluğu gidermek üzere, hidrojen enerji sistemlerinin emniyetini ve verimli çalışmasını sağlayacak performans dayalı

teknik düzenlemelerin geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle hidrojenin taşınması ve depolanması sırasında patlama risklerini en aza indirecek mühendislik standartları, malzeme ve ekipman standartları (örn. hidrojen gevrekleşmesi dayanıma sahip çelik standartları) kritik önemdedir. Ayrıca, hidrojen dolum altyapısının ve hidrojen yakıt kalitesinin standardizasyonu da temiz hidrojen kullanımının yaygınlaşması için bir gerekliliktir. Hidrojen yakıt kalitesi, özellikle yakıt pili kullanan araçlar ve cihazlar için belirli saflık kriterlerini karşılamalıdır; bu da uluslararası kabul görmüş standartların (örneğin ISO 14687 Hidrojen Yakıt Kalitesi Standardı gibi) ulusal düzeyde benimsenmesini zorunlu kılmaktadır.

Türkiye'nin hidrojen stratejisi, teknik standartlar konusunda uluslararası uyumun altını çizmektedir. Raporla, yeşil hidrojenin üretim, depolama, dağıtım ve kullanım süreçleri hususunda uluslararası standartlarla uyumlu teknik standartların geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [175]. Bu ifade, Türkiye'nin kendi standartlarını oluştururken dünya çapında kabul görmüş normları referans alacağını göstermektedir. Örneğin, AB ülkelerinde hidrojenin doğal gaz şebekelerine belirli oranlarda güvenli biçimde karıştırılmasına ilişkin standartlar (CEN/CENELEC çalışmaları gibi) veya ABD'deki hidrojen yakıt istasyonu güvenlik kodları (NFPA 2 Hydrogen Code vb.) incelenerek, ülkemiz koşullarına adapte edilmelidir. Standartlar geliştirilirken, hidrojenin olası ihracat pazarı olan ülkelerde uygulanan kriterlerin de dikkate alınması önemlidir. SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi tarafından hazırlanan bir politika raporunda da, Türkiye'de üretilecek hidrojenin ihraç edilebilmesi için ilgili tüm ülkelerde geçerli ortak teknik standartlara uygun üretilmesi gerektiği, bu amaçla uluslararası kabul görmüş standartların incelenerek ulusal standartların bunlarla uyumlu oluşturulmasının elzem olduğu belirtilmiştir [178]. Aksi halde, standart uyumsuzluğu hem iç piyasada güvenlik riskleri yaratabilir hem de Türkiye'nin gelecekte olası bir hidrojen ihracatçısı olma hedefini sekteye uğratabilir.

Standartların kurumsallaşması ve uygulanması noktasında, Türkiye'nin ilgili kurumları (Türk Standartları Enstitüsü – TSE, EPDK, Enerji Bakanlığı vb.) koordineli bir şekilde çalışmalıdır. Ulusal Hidrojen Stratejisi'nde standartlar ve sertifikasyon geliştirme konusunda uluslararası iş birliği yapılması da bir politika hedefi olarak yer almıştır [175]. Bu kapsamda, Türkiye'nin hidrojen teknolojileri alanında faaliyet gösteren uluslararası standart kuruluşlarının çalışmalarına katılması, örneğin ISO Teknik Komiteleri veya AB standart platformları gibi ortamlarda aktif rol alması hedeflenmektedir. Nitekim Türkiye, hidrojen teknolojilerinde standartların ve mevzuatın geliştirilmesine ilişkin uluslararası iş birliğine açık olduğunu resmi olarak beyan etmiştir. Bu iş birlikleri sayesinde, bir yandan en güncel teknik bilgiye ve en iyi uygulamalara erişilirken diğer yandan da Türk şirketlerinin ürün ve hizmetlerinin küresel piyasalarda tanınması kolaylaşacaktır. Özetle, teknik standartlar boyutu, temiz hidrojenin güvenli, verimli ve uyumlu şekilde kullanılabilmesi için hukuki düzenlemeleri tamamlayıcı bir unsurdur. Türkiye'nin kısa vadede yapması gereken, hidrojen değer zincirinin her halkasında (üretim tesisleri, depolama sistemleri, nakliye kapları, boru hatları, dolum istasyonları, son kullanım cihazları vb.) geçerli olacak asgari teknik gereklilikleri belirlemek ve bunları ilgili mevzuata yansıtacak düzenleyici çerçeveyi oluşturmaktır. Bu süreçte uluslararası standartlara uyum sağlanması, hem güvenlik/kalite açısından bir güvence olacak hem de Türkiye'de üretilen hidrojenin küresel pazarlarda kabulü için temel şartlardan birini yerine getirecektir.

5.5.3. Sertifikasyon ve Menşe Doğrulama Süreçleri

Temiz hidrojen ekonomisinin gelişmesinde kritik bir diğer boyut, sertifikasyon ve menşe doğrulama (garanti) sistemlerinin oluşturulmasıdır. "Yeşil hidrojen" olarak nitelendirilen hidrojenin gerçekten yenilenebilir kaynaklı ve düşük karbon ayak izli olduğunu kanıtlamak, hem çevresel hedefler hem de piyasa mekanizmaları açısından gereklidir. Bu amaçla, hidrojenin üretimden tüketime kadar karbon içeriğinin ve kaynağının izlenmesini sağlayan sertifika programları devreye alınmaktadır. Avrupa Birliği, hidrojenin temiz sayılabilmesi için garanti sistemi uyumunu zorunlu kılmıştır. AB'de üretilen veya ithal edilen hidrojenin "yeşil" kabul edilmesi için belirlenmiş sürdürülebilirlik kriterlerini

karşılması ve bir Menşe Garantisi (Guarantee of Origin) sertifikasına sahip olması gerekmektedir. Bu sertifikalar, hidrojenin hangi koşullarda üretildiğini (kullanılan enerjinin yenilenebilir oranı, karbon emisyon miktarı vb.) belgelendirerek hem tüketicilere şeffaf bilgi sunmakta hem de sınır ötesi hidrojen ticaretinde ortak bir dil oluşturmaktadır. AB'nin 2018/2001 sayılı Yenilenebilir Enerji Direktifi (RED II) çerçevesinde geliştirilen CertifHy gibi sistemler, hidrojen için gönüllü menşe garantisi sertifikasyonunun ilk örneklerini oluşturmuştur. 2023 itibarıyla AB, bu sistemi bağlayıcı hale getirecek ikincil mevzuatı da yürürlüğe koymuş ve yeşil hidrojenin tanımı ile sertifikalandırılmasına dair ayrıntıları netleştirmiştir [173]. Avrupa pazarına hidrojen tedarik etmek isteyen ülkelerin de (örneğin Türkiye'nin) bu sertifikasyon sistemine uyum sağlaması bir zorunluluk haline gelmektedir.

Türkiye, temiz hidrojen sertifikasyonu alanındaki küresel eğilimlere paralel olarak kendi ulusal sistemini oluşturma hazırlığındadır. Ulusal Hidrojen Stratejisi'nde, "yeşil hidrojen için sertifika programları oluşturmak ve bu programların izlenebilirliğini sağlamak" politika hedefleri arasında açıkça belirtilmiştir [175]. Bu kapsamda, Türkiye'de üretilecek hidrojene kaynak ve emisyon bazlı bir yeşil sertifika verilmesi, böylece hidrojenin "yenilenebilir" veya "düşük karbonlu" niteliğinin teyit edilmesi planlanmaktadır. Söz konusu sertifika programı; hidrojenin üretildiği tesisin kullandığı elektrik kaynağının yenilenebilir oranını, üretim sürecindeki birim başına düşen sera gazı emisyon miktarını ve diğer sürdürülebilirlik kriterlerini belgeleyecektir. Örneğin, elektrolizle üretilen hidrojen için gerekli elektrik enerjisinin büyük ölçüde yeni kurulmuş yenilenebilir santrallerden sağlandığını, hidrojen üretiminin elektrik şebekesine yük getirmediğini ve ilgili yenilenebilir kaynağın coğrafi olarak makul bir yakınlıkta olduğunu doğrulayan kurallar bu sertifikasyonun parçası olabilir [173]. Türkiye'de geliştirilecek sertifikasyon altyapısının, AB'nin bu alandaki standartlarıyla uyumlu olması hedeflenmektedir. Nitekim İktisadi Kalkınma Vakfı (IKV) tarafından yayımlanan bir analizde de, Türkiye'nin AB ile uyumlu bir hidrojen sertifikasyon sistemi kurmak üzere çalışmalara başladığı ve Ulusal Strateji'de yeşil hidrojenin izlenebilirliğini sağlamak amacıyla sertifika programı oluşturulması hedefinin yer aldığı vurgulanmıştır [174]. Bu sayede Türkiye'de üretilecek yeşil hidrojenin karbon içeriğinin hesaplanması, menşe ispatı ve sürdürülebilirlik denetimleri AB standartlarına uygun biçimde yapılacak; böylelikle Türk yeşil hidrojeninin Avrupa'da karbon kriterlerine uygun bir ürün olarak kabul görmesi mümkün hale gelecektir. Sertifikasyon sistemi aynı zamanda yurt içi kullanımda da talep yaratabilecek bir araçtır: Yeşil hidrojen sertifikasına sahip hidrojen, örneğin "yeşil çelik" veya "yeşil gübre" üretmek isteyen sanayicilere ek bir pazarlama değeri sunacak, böylece temiz hidrojen tüketimini teşvik edecektir. Henüz Türkiye'de hidrojen için özel bir menşe garantisi mekanizması uygulamada değildir, ancak benzer bir yaklaşım elektrik piyasasında YEK-G (Yenilenebilir Enerji Kaynak Garantisi Belgesi) sistemi ile yürürlüğe konmuştur. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından 2021'de başlatılan YEK-G sistemi, elektriğin yenilenebilir kaynaklardan üretildiğini belgelendiren dijital sertifikalar sağlamaktadır. Bu model, hidrojen için geliştirilecek sertifika sistemi açısından da örnek teşkil edebilir. Örneğin, EPIAŞ bünyesinde hidrojene özgü bir Guarantee of Origin platformu kurulup işletilebilir ve böylece üreticiler ile tüketiciler arasında ticarete konu olabilecek hidrojen sertifikaları oluşturulabilir. Ayrıca uluslararası sertifika kuruluşlarının (örneğin TÜV, Bureau Veritas gibi) Türkiye'de yeşil hidrojen sertifikasyonu alanında pilot projeler yürüttüğü bilinmektedir. Bu tip gönüllü sertifikalar, ulusal sistem devreye girene kadar geçiş sürecinde referans olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, sertifikasyon süreçleri, temiz hidrojen piyasasının işlerlik kazanması için vazgeçilmez bir unsurdur. Doğru tasarlanmış bir sertifikasyon ve izlenebilirlik mekanizması, hem iç piyasada güven tesis edecek hem de Türkiye'nin yeşil hidrojeninin uluslararası tanınırlığını sağlayacaktır. Türkiye'nin bu alandaki mevzuat ve altyapı çalışmalarını hızlandırması, özellikle gelecekte AB'ye hidrojen ve türev yakıt ihracatı hedefleri açısından kritik önem taşımaktadır [174]. Zira AB'nin hidrojen ithalatında talep edeceği sertifikalara ve sürdürülebilirlik standartlarına uyum sağlayamayan ülkelerin rekabet şansı olmayacaktır. Bu durum, sertifikasyon konusunu Türkiye'nin hidrojen stratejisinin merkezine yerleştirmektedir. Nitekim hidrojen strateji raporunun

eylem planında, yasal düzenlemeler kadar sertifika programlarının oluşturulması da öncelikli eylemler arasında sayılmıştır [175].

5.5.4. Bölgesel Perspektif: Güney Marmara İçin Önemi ve Sonuç

Güney Marmara Bölgesi, Türkiye'nin ilk Hidrojen Vadisi projesine ev sahipliği yapmaya hazırlanan stratejik bir konumdadır. Özellikle Avrupa Komisyonu'ndan 8 milyon euro hibe alan Güney Marmara Hidrojen Kıyısı (HYSouthMarmara) projesi, bölgede entegre bir hidrojen değer zinciri oluşturmayı hedeflemektedir. Bu proje kapsamında yenilenebilir elektrikten yeşil hidrojen üretimi, depolanması, farklı sektörlerde kullanımı (sanayi, ulaştırma vb.) ve ihracat potansiyeli bir arada değerlendirilecektir. Böylesine kapsamlı bir stratejik iş modeli, uygun mevzuat ve düzenleyici teşvikler olmaksızın başarıya ulaşamaz. Yukarıda tanımlanan yasal altyapı, teknik standartlar ve sertifikasyon gereklilikleri, Güney Marmara hidrojen ekosisteminin hayata geçirilmesinin temel yapı taşlarıdır. Bölgedeki paydaşlar (kamu otoriteleri, özel sektör yatırımcıları, üniversiteler ve kalkınma ajansı gibi kurumlar) için belirlenecek mevzuatsal çerçeve, yapılacak yatırımların önünü açacak veya kısıtlayacaktır. Örneğin, hidrojen üretim tesisleri ve depolama altyapısı için lisans süreçlerinin net olmaması, yatırımcılar açısından risk oluşturabilecektir. Benzer şekilde, hidrojenin doğal gaz şebekesine karıştırılmasıyla ilgili oranlar, izinler ve teknik kriterler tanımlanmadıkça bölgedeki pilot projelerin ticarileşmesi zor olacaktır. Sertifikasyon tarafında ise, Güney Marmara'da üretilecek yeşil hidrojenin uluslararası geçerliliği olan sertifikalarla belgelenmesi, bu hidrojenin Avrupa pazarına ihraç edilebilmesi için önkoşuldur.

Tüm bu nedenlerle, Güney Marmara Hidrojen Yol Haritası kapsamında mevzuatsal gerekliliklerin belirlenmesi, sadece bir rapor bölümü olmaktan öte, projenin uygulanabilirliğinin teminatı niteliğindedir. Bölge özelinde hazırlanacak stratejik iş modelinde, ulusal düzeyde geliştirilecek yasal düzenlemelerle uyum sağlanması ve gerektiğinde yerel düzeyde kolaylaştırıcı adımlar atılması önerilmektedir. Örneğin, bölgedeki organize sanayi bölgelerinde hidrojen kullanımına ilişkin güvenlik protokolleri oluşturmak, limanlarda hidrojen ihracat terminalleri için gerekli izin süreçlerini önden planlamak gibi uygulamaya yönelik adımlar mevzuat çalışmalarına paralel yürütülebilir. Ayrıca, Güney Marmara'daki pilot projelerden elde edilecek deneyimler, ulusal mevzuatın şekillenmesine de katkı sunacaktır – örneğin bir dolum istasyonunun fiili işletme tecrübesi, standartların geliştirilmesinde veri sağlayabilir.

Sonuç itibarıyla, temiz hidrojen ekosistemi için yasal altyapı, standartlar ve sertifikasyon boyutlarında kapsamlı bir hazırlık yapmak kaçınılmazdır. Türkiye genelinde bu alanlarda atılacak adımlar, Güney Marmara gibi öncü bölgelerde somut kazanımlara dönüşecek ve ülkemizin hidrojen ekonomisinde iddialı bir oyuncu haline gelmesini mümkün kılacaktır. Mevzuatsal gerekliliklerin zamanında tanımlanıp hayata geçirilmesi, hidrojen teknolojilerine yapılacak özel sektör yatırımlarını hızlandıracak, böylece ülkemizin 2053 net sıfır hedeflerine katkı sunarken yeni bir endüstriyel kalkınma alanı yaratacaktır. Aksi takdirde, küresel hidrojen yarışında geri kalmamak adına kritik öneme sahip bu bölgede fırsatlar kaçırılabilir. Bu nedenle, Güney Marmara Hidrojen Yol Haritası çerçevesinde hazırlanan stratejik iş modeli, mevzuat ve standartlar konusunda ortaya konan gerekliliklerin ivedilikle ulusal politika yapıcılar tarafından dikkate alınmasını ve gerekli düzenlemelerin hayata geçirilmesini önermektedir. Başta Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı ile ilgili düzenleyici kurumlar olmak üzere tüm paydaşların koordinasyonu ile oluşturulacak sağlam bir mevzuat zemini, Güney Marmara'nın Türkiye'nin temiz hidrojen üssü haline gelmesinin yolunu açacaktır.

5.5.5. Yasal Çerçeveye Yönelik Önerilerin Sunulması

Temiz hidrojen ekonomisinin gelişimi için kapsamlı ve net bir yasal çerçeve oluşturulması kritik önem taşımaktadır. Türkiye'de halihazırda hidrojen ekosisteminin kurulmasına yönelik özel bir mevzuat bulunmamaktadır. Dolayısıyla, hidrojen üretimi, depolanması, iletimi ve kullanımını kapsayacak düzenleyici altyapının tasarlanması acil bir ihtiyaçtır. "Mevzuatsal gerekliliklerin

belirlenmesi” başlığında ortaya konan hukuki altyapı, standartlar ve sertifikasyon ihtiyacı dikkate alınarak, bu bölümde söz konusu yasal çerçeveye ilişkin somut öneriler sunulmaktadır. Amaç, Türkiye'nin 2053 net sıfır hedefleri doğrultusunda yeşil hidrojenin güvenli ve sürdürülebilir şekilde gelişimini destekleyecek hukuki düzenlemeler ve politikaları önermektir.

a) Mevcut Durum ve Uluslararası Eğilimler

Dünyada hidrojenin hukuki altyapısını oluşturma yönünde önemli adımlar atılmaktadır. Örneğin, ABD’de 2021 tarihli Altyapı Yatırım ve İşleri Kanunu (Infrastructure Investment and Jobs Act) hidrojen altyapısı için Ar-Ge yatırımlarına bütçe tahsis etmiş ve en az dört adet temiz hidrojen merkezi kurulmasına ilişkin hükümler getirmiştir [179]. Almanya’da ise Temmuz 2021’de Enerji Endüstrisi Kanunu’nda (Energiewirtschaftsgesetz) yapılan değişiklikle, hidrojenin doğal gaz şebekesinden ayrı bir enerji taşıyıcı olarak tanımlanması ve hidrojen boru hatlarının doğal gaz hatlarından ayrılması yönünde düzenlemeler yürürlüğe girmiştir. Bu örnekler, farklı ülkelerin hidrojen altyapısını mevcut enerji piyasası mevzuatına entegre etmeye veya yeni yasal düzenlemelerle desteklemeye başladığını göstermektedir.

Avrupa Birliği, 2050’ye kadar net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak için hidrojenin rolünü vurgulamakta ve yeşil hidrojen kullanımını artırmaya yönelik kapsamlı bir strateji uygulamaktadır. AB, 2030 yılına kadar yılda 10 milyon ton yeşil hidrojen üretme ve 10 milyon ton da ithal etme hedefi benimsemiştir. Bu doğrultuda AB, hidrojen piyasalarının geliştirilmesi için ortak standartlar ve düzenlemeler üzerinde çalışmakta; üye ülkeler ve ortaklarla birlikte hidrojenin sertifikasyonu ve ticareti için ortak kurallar oluşturmaya çabalamaktadır [174]. Özellikle hidrojen ticaretinde güvenilirlik ve şeffaflığı sağlamak için sürdürülebilirlik kriterleri ile Guarantee of origin mekanizmaları geliştirilmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve IRENA gibi kuruluşlar da ortak sertifikasyon düzenleri ve küresel iş birliğinin hidrojen ekonomisinin başarısı için şart olduğunu vurgulamıştır.

Türkiye, AB’nin en büyük ticaret ortaklarından biri olarak bu küresel gelişmelere kayıtsız kalamaz. AB’nin hidrojen hedeflerine uyum sağlama gerekliliği, Türkiye’de de benzer adımlar atılmasını zorunlu kılmaktadır. Nitekim Ocak 2023’te yayımlanan “Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası”, hidrojen konusunda ulusal vizyon ve politika önerileri ortaya koymuştur [3]. Bu yol haritasında, Türkiye’de henüz ayrı bir hidrojen mevzuatı bulunmadığı tespit edilmiş ve iki olası yaklaşım önerilmiştir: Birincisi bağımsız bir “Hidrojen Piyasası Kanunu” çıkarılması, ikincisi ise mevcut enerji piyasa kanunlarına (Doğal Gaz Piyasası Kanunu, Elektrik Piyasası Kanunu veya Yenilenebilir Enerji Kanunu gibi) hidrojenle ilgili hükümler eklenmesidir [174]. Yol Haritası ayrıca, hidrojen ekosisteminin gelişimi için sertifikasyon sisteminden standartlara ve teşviklere uzanan çok boyutlu politikalar da belirlemiştir. İlerleyen bölümde, söz konusu strateji ve küresel iyi uygulamalar ışığında, Türkiye için uygun yasal çerçevenin unsurları ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

b) Hidrojen Mevzuatının Oluşturulması

Kapsamlı Yasal Düzenleme

Türkiye’de temiz hidrojenin üretim, depolama, iletim, dağıtım ve kullanım süreçlerini bütüncül şekilde ele alan bir Hidrojen Kanunu hazırlanması önerilmektedir. ETKB’nin 2023 Yol Haritası’nda belirtildiği üzere, ayrı bir hidrojen piyasası kanunu çıkarılması, hukuki boşluğun etkin şekilde doldurulmasını sağlayabilir [175]. Böyle bir kanun, hidrojen faaliyetlerine ilişkin tanımlar (örneğin yeşil, mavi, gri hidrojen tanımları), lisans ve izin süreçleri, piyasa işletim kuralları, altyapı yatırımları, güvenlik standartları ve teşvik mekanizmaları gibi unsurları tek bir çatı altında düzenleyebilir. Kapsamlı bir yasal çerçevenin varlığı, hem yatırımcılar için öngörülebilirlik yaratacak hem de uzun vadede inovasyon ve yatırımı teşvik eden bir ortam oluşturacaktır. Hidrojen piyasalarının oluşumu ve gelişimi, ancak böyle tutarlı bir mevzuat temelinde mümkün olabilir.

Kapsamlı bir hidrojen kanunu çıkartılması zaman alabileceğinden, geçiş sürecinde mevcut mevzuatın uyarlanması da değerlendirilebilir. Yol Haritası'nda işaret edildiği gibi, hidrojenle ilgili temel hükümler mevcut kanunlara entegre edilebilir [179]. Örneğin:

- **Doğal Gaz Piyasası Kanunu'na** hidrojen enjeksiyonu ve hidrojen karışımlarının dağıtımına dair hükümler eklenebilir. Doğal gaz şebekesine belli oranda hidrojen karıştırılması (özellikle yeşil hidrojen) teknik olarak mümkün olup, yasal zeminde bunun sınırları ve şartları tanımlanmalıdır. Almanya'nın yaptığı gibi, doğal gaz ağına elektroliz kaynaklı hidrojenin belirli oranda katılmasına izin verilip, %100 hidrojen hatlarının ise ayrı bir kategori olarak düzenlenmesi düşünülebilir. Türkiye'de de GAZBİR-GAZMER bünyesinde yürütülen %5-10 oranında hidrojen karışımı testleri olumlu sonuç vermiştir; bu deneyimler mevzuata yansıtılarak şebeke standartları güncellenmelidir.
- **Elektrik Piyasası Kanunu ve Yenilenebilir Enerji Kanunu'na** hidrojen üretimini destekleyici maddeler eklenebilir. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin (yeşil hidrojen) elektrik piyasası ile etkileşimi tanımlanmalıdır. Fazladan üretilen yenilenebilir elektriğin elektroliz yoluyla depolanması ve ihtiyaç halinde kullanılmasına imkan veren "power-to-gas" uygulamaları için mevzuat altyapısı gereklidir. Elektrik şebekesinin dengelenmesinde hidrojenin enerji depolama aracı olarak kullanımını kolaylaştırmak için yasal engeller kaldırılmalı, depolama yönetmeliklerine hidrojen teknolojileri dahil edilmelidir. Avrupa'da enerji depolamayı kolaylaştırmak adına mevzuatın genişletildiği bilinmektedir; benzer şekilde Türkiye de elektrik piyasası mevzuatını hidrojen odaklı güncellemelidir [176].
- **Çevre ve Vergi Mevzuatı** açısından, hidrojenin düşük karbonlu bir yakıt olarak kullanımı teşvik edilmelidir. Karbon vergisi veya emisyon ticaret sistemine hazırlık bağlamında, yeşil hidrojen kullanan sektörlerle muafiyetler veya kolaylıklar sağlanması yasal düzenlemelerle mümkün kılınabilir. Örneğin, AB'de 2026'da devreye girecek Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ile karbon içeriği yüksek ürünlere ek maliyetler gelecektir. Türk sanayisinin rekabetçiliğini korumak için yeşil hidrojen kullanan üreticilerin bu tür mekanizmalardan muaf olmasını sağlayacak ikincil mevzuat (yönetmelik ve tebliğler) planlanmalıdır. Bu hem işletmeleri yeşil hidrojene yönlendirecek hem de AB pazarına uyumu kolaylaştıracaktır.

Tanımlar ve Kapsam

Yeni oluşturulacak hidrojen mevzuatı (ya da mevcut kanunlardaki değişiklikler) kapsamında kritik bir unsur, hidrojen türlerinin ve "temiz hidrojen" kavramının tanımlanmasıdır. Yeşil hidrojen (yenilenebilir enerjiyle üretilmiş), mavi hidrojen (karbon yakalama ile fosil kaynaklı), gri hidrojen (fosil kaynaklı, karbon yakalama yok) gibi uluslararası literatürde kabul görmüş tanımlar Türk mevzuatına kazandırılmalıdır. Özellikle "yeşil hidrojen" in yasal bir tanımı yapılmalı ve bu tanım belirli sürdürülebilirlik kriterlerine bağlanmalıdır. AB, 2023 yılında yenilenebilir hidrojeni tanımlamak ve "düşük karbonlu" hidrojen ile yenilenebilir hidrojeni ayırt etmek için düzenleyici çerçeveyi kabul etmiştir; bu kapsamda yeşil ve düşük karbonlu hidrojen kategorileri için net kriterler belirlenmiştir [174]. Türkiye de AB ile uyumlu şekilde, yeşil hidrojenin yaşam döngüsü emisyon azaltımının belirli bir eşiğin üzerinde olmasını şart koşabilir (örneğin AB'de yenilenebilir hidrojen %70 sera gazı azaltımı kriteri getirilmiştir). Yasal çerçeve bu kriterleri belirlemeli ve güncel bilimsel verilere göre yenilenebilir hidrojenin neyi kapsadığını açıklığa kavuşturmalıdır.

Ayrıca, hidrojenin enerji piyasalarındaki statüsü tanımlanmalıdır. Almanya örneğinde olduğu gibi, doğal gaza karıştırılan hidrojen ile saf hidrojen arasında ayırım yapılarak, saf hidrojenin gerektiğinde ayrı bir piyasası olabileceği öngörülmüştür. Türkiye de hidrojeni, doğal gazla karışım durumunda gaz piyasasının parçası, saf halde ise ayrı bir enerji taşıyıcısı olarak ele almayı değerlendirmelidir. Bu sayede uzun vadede bağımsız bir hidrojen piyasası oluşumunun da önü

açılabilir. Yol Haritası'nda da benzer şekilde, ayrı bir hidrojen piyasası kanununun bir seçenek olduğu belirtilmiştir [175]. İlk aşamada düşük oranlı karışımlar ve yerinde tüketim öngörülse de, ileride hidrojen ticaret hacmi arttığında regüle bir piyasa yapısına ihtiyaç doğacaktır.

c) Teknik Standartlar ve Güvenlik Düzenlemeleri Standartların Belirlenmesi

Yasal çerçevenin önemli bir ayağı, teknik standartlar ve normların oluşturulması veya benimsenmesidir. Hidrojen, özellikleri itibarıyla farklı malzeme ve güvenlik gereksinimleri doğuran bir gazdır. Bu nedenle, üretim tesislerinden depolama tanklarına, boru hatlarından dolum istasyonlarına kadar bir dizi teknik standart tanımlanmalıdır. Türkiye'nin ulusal standardizasyon kurumu olan Türk Standartları Enstitüsü (TSE), halihazırda uluslararası standartların tercüme ve adaptasyonu ile bazı ilgili standartları yayımlamıştır (örneğin, TS EN 17124, yakıt amaçlı hidrojen safılık kriterlerini belirleyen bir standarttır). Ancak kapsamın genişlemesiyle yeni standart ihtiyacı doğacaktır:

- **Güvenlik standartları:** Hidrojenin depolanması (örneğin yüksek basınçlı tanklar veya sıvı hidrojen), taşınması (boru hatları, tüpler) ve kullanımı (yakıt hücreleri, yanma sistemleri) için güvenlik yönetmelikleri güncellenmelidir. Hidrojenin kaçak algılama sistemleri, patlayıcı ortam (ATEX) gereklilikleri, emniyet vanaları gibi hususlarda uluslararası en iyi uygulamalar referans alınmalıdır. Yasal çerçeve, ilgili bakanlıkların (Enerji, Sanayi ve Teknoloji, Ulaştırma) teknik düzenlemeler yoluyla bu güvenlik standartlarını yürürlüğe koymasını sağlamalıdır. İtfaiye ve acil durum birimleri için hidrojenle ilgili acil durum prosedürleri de standartlaşmalıdır.
- **Kalite standartları:** Özellikle yakıt hücreli araçlarda veya endüstride kullanılacak hidrojenin saflığı kritik önemdedir. Bunun için ISO 14687 gibi uluslararası standartlar mevcuttur. Türkiye, bu standartları aynen benimseyebilir veya AB'de geçerli normlara (ör. araç yakıtı hidrojeni için EN 17124) uyum sağlayabilir. Yasal düzenlemeler, piyasaya sürülecek hidrojenin asgari saflık ve azami nem, oksijen, karbon monoksit vb. safsızlık değerlerini tanımlayarak hem cihazların korunmasını hem de verimliliği güvence altına almalıdır.
- **İmalat ve malzeme standartları:** Hizmet görece yüksek basınçlı ekipmanların malzeme standartları (çelik kaliteleri, conta malzemeleri vs.) tanımlanmalıdır. Hidrojenin malzemeler üzerindeki etkisi (örneğin gevrekleştirme) dikkate alınarak, boru hatları ve tanklar için uygun malzeme ve tasarım kodları (ASME, PED yönetmelikleri vb.) iç mevzuata aktarılmalıdır. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Makina Emniyeti Yönetmeliği gibi çerçeveleri hidrojen ekipmanlarını kapsayacak şekilde güncelleyebilir.
Bu teknik standartların oluşturulmasında uluslararası iş birliği hayati önem taşır. Hidrojen teknolojileri küresel ölçekte yaygınlaştıkça, ülkeler arası standart uyumu ticaretin kolaylaşmasını sağlayacaktır. Türkiye de özellikle AB ile standartların uyumlaştırılması alanında aktif rol almalıdır. Bu kapsamda, Avrupa'daki standartlaşma kuruluşları (CEN-CENELEC) ve uluslararası kuruluşlarla (ISO, IEC) koordinasyon kurularak, çıkacak AB standartlarının eş zamanlı olarak Türkiye'de de yürürlüğe girmesi sağlanabilir. Böylelikle, Türkiye'de üretilen ekipmanlar ve hidrojen, kalite açısından uluslararası kabul görece ve örneğin AB pazarına girişte ek engellerle karşılaşmayacaktır.

Güvenlik ve Çevresel Düzenlemeler

Hidrojenin emniyetli kullanımını güvence altına almak amacıyla bir dizi hukuki düzenlemeye ihtiyaç vardır. Hidrojen, yüksek parlayıcılık ve geniş patlama aralığı gibi özelliklere sahip olduğu için, tesis onay süreçlerinden operasyonel emniyet kurallarına kadar kapsamlı kurallar benimsenmelidir. Bu bağlamda:

- **Tesis izin ve denetimleri:** Hidrojen üretim tesisleri (örneğin elektroliz tesisleri), dolun istasyonları ve depolama sahaları için özel izin prosedürleri tanımlanmalıdır. Mevcut Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) yönetmeliklerinde hidrojen tesislerine özgü kriterler eklenebilir. Ayrıca İmar Mevzuatı'nda hidrojen tesislerinin planlanması ve kurulumu ile ilgili düzenlemeler yapılmalıdır (örneğin yerleşim alanlarına mesafe, sanayi bölgelerinde konumlandırma gibi). İtfaiye ve patlayıcı madde mevzuatında hidrojenin depolandığı ve işlendiği tesisler için özel hükümler yer almalıdır. Yasal çerçeve, ilgili kurumlara (İçişleri, Çevre, Sanayi Bakanlıkları ile belediyeler) bu tesisleri düzenli denetleme yükümlülüğü vermelidir.
- **İş sağlığı ve güvenliği:** Hidrojenle çalışacak personelin eğitimi, koruyucu ekipman kullanımı ve acil durum tatbikatları için standartlar belirlenmeli, İş Güvenliği Mevzuatı kapsamında hidrojenle ilgili riskler değerlendirilmelidir. Gerekli hallerde hidrojen tesislerinde vardiyalı çalışma, gaz algılama ve alarm sistemlerinin bulundurulması, antistatik kıyafet kullanımı gibi kurallar mevzuata eklenmelidir.
- **Çevresel boyut:** Hidrojen kullanımı esnasında doğrudan karbon emisyonu olmasa da hidrojen üretiminin çevresel etkileri (su kullanımı, yan ürünler vb.) yönetilmelidir. Yeşil hidrojen üretimi için su ve enerji kullanım verimliliğini teşvik eden standartlar oluşturulabilir. Ayrıca, hidrojenin kontrolsüz atmosfere salınımı (örneğin havaya kaçak) durumunda iklimsel etkileri (dolaylı sera etkisi) üzerine araştırmalar teşvik edilmeli ve gerekli görülürse sınırlamalar getirilmelidir. Yasal çerçeve, hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kullanımını şart koşarak (veya belirli bir yüzde şartı ile) çevresel sürdürülebilirliği sağlamalıdır. Örneğin yeni kurulacak büyük ölçekli hidrojen tesislerine, tükettikleri elektriğin belli bir oranını yenilenebilir kaynaklı olması yükümlülüğü konulabilir (AB'de tartışılan "additionality" kriterine benzer şekilde).

c) Yeşil Hidrojen İçin Sertifikasyon ve İzlenebilirlik Sertifikasyon Sistemi Kurulması

Yeşil hidrojenin sertifikasyonu, hem iç piyasada güvenilir bir "yeşil" tanımı oturtmak hem de ihracatta kabul görmek açısından elzemdir. Bu nedenle, Türkiye'de üretilen hidrojenin karbon ayak izini ve üretim kaynağını belgeleyen bir Yeşil Hidrojen Sertifikasyon Sistemi oluşturulması önerilir. Yol Haritası'nda da açık biçimde, yeşil hidrojen için sertifika programları oluşturulması ve bu programların izlenebilirliğinin sağlanması hedefi yer almaktadır [175]. Bu hedef doğrultusunda, mevzuat içerisinde sertifikasyon sisteminin yasal dayanağı kurulmalıdır.

Önerilen sertifikasyon sistemi, AB'nin Guarantee of Origin mekanizmaları ile uyumlu olmalıdır. Avrupa'da yenilenebilir elektrik için kullanılan YEK-G (Yenilenebilir Enerji Kaynak Garanti Belgesi) sistemine benzer şekilde, yenilenebilir kaynaklardan üretilen hidrojen için de bir garanti belgesi sistemi geliştirilmelidir. AB, 2024 itibarıyla temiz hidrojen sertifikasyonuna ilişkin gönüllü şemaları tanımış ve bu sertifikaların AB genelinde geçerliliğini sağlamıştır [174]. Türkiye'nin de AB'nin bu sistemine entegre olması, hem ihracat potansiyeli açısından hem de içerideki yatırımcı güveni açısından kritiktir. AB pazarına yeşil hidrojen tedarik edebilmek için, AB'nin belirlediği sürdürülebilirlik kriterlerini karşılayan ve menşe garantisine sahip bir ürün sunmak gerekecektir. Bu da Türkiye'nin kendi sertifikasyon altyapısını AB ile uyumlu şekilde kurmasını zorunlu kılmaktadır.

Yasal çerçeve kapsamında, sertifikasyon sisteminin kurallarını belirleyen ikincil mevzuatın çıkarılması öngörülmelidir. Örneğin, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) veya Enerji Bakanlığı bünyesinde yetkilendirilecek bir birim, yeşil hidrojen sertifikalarını verecek ve takip edecek şekilde görevlendirilebilir. Hâlihazırda Türkiye'de EPIAŞ tarafından yürütülen YEK-G sistemi (elektrik için) gibi, hidrojen için de şeffaf bir dijital platform kurulabilir. Hidrojen üreticileri, üretimlerinin kaynağını (kullanılan elektrik miktarı ve kaynağı, varsa karbon yakalama oranı gibi bilgilerle) beyan eder ve bu beyana istinaden Yeşil Hidrojen Sertifikası almaya hak kazanır.

Sertifikalar, hidrojenin alıcılarına devredilebilir ve böylece hidrojen kullanıcısının “yeşil hidrojen kullandığı” kanıtlanmış olur. Bu sistem, iç piyasada talep eden şirketlerin (örneğin ihracatçı sanayicilerin) karbon ayak izlerini düşürmelerine yardımcı olacağı gibi, AB gibi dış pazarlara yapılan ihracatta da gerekecek bir şarttır.

Sertifikasyon sisteminin güvenilir işlemesi için mevzuat, bazı kilit ilkeleri ortaya koymalıdır:

- **İzlenebilirlik:** Her bir hidrojen üretim partisinin kaynağını ve üretim yöntemini izlemeye yarayan kayıt sistemleri zorunlu kılınmalıdır. Üretici tesislerin sertifikasyon için kayıt yaptırması ve üretim verilerini düzenli raporlaması gerekebilir. Bu veriler arasında kullanılan elektrik miktarı ve kaynağı, tesisin emisyonları, üretimin yapıldığı zaman dilimi gibi unsurlar yer alır. AB'nin yenilenebilir hidrojen için aradığı ilavelik, coğrafi ve zamansal eşleme gibi kriterler (yenilenebilir elektriğin hidrojen üretimine tahsis edilmesi koşulları) Türkiye’de de değerlendirilmeli ve uygun görülürse mevzuata yansıtılmalıdır.
- **Akreditasyon ve Denetim:** Sertifikasyon sürecinin doğruluğunu sağlamak adına, bağımsız denetim mekanizmaları kurulmalıdır. Belirlenecek bir ulusal akreditasyon sistemi ile sertifika vermeye yetkili kuruluşlar denetlenmeli, gerektiğinde uluslararası akreditasyona sahip kuruluşlardan da faydalanılmalıdır. Sertifika alan hidrojen üreticilerinin beyanlarının doğruluğu periyodik olarak denetlenmeli, yanlış beyan tespit edilirse sertifika iptali ve cezai müeyyideler uygulanmalıdır. Bu hususlar, ilgili yönetmelik veya tebliğlerde ayrıntılandırılmalıdır.
- **Uluslararası Tanınırlık:** Sertifikasyon sistemi tasarlanırken, AB başta olmak üzere diğer ülkelerin de tanıyabileceği bir yapı hedeflenmelidir. AB mevzuatına göre üçüncü ülkelerden gelen hidrojenin “yeşil” kabul edilmesi, AB ile karşılıklı veya tek taraflı tanıma anlaşmalarına bağlı olabilecektir. Türkiye, AB'nin hidrojen sertifikasyonuna yönelik çıkardığı Delegated Act ve uygulama kurallarını yakından izleyerek, kendi sistemini mümkün olduğunca uyumlu hale getirmelidir. Örneğin, AB'nin tanıdığı CertifHy gibi mevcut gönüllü şemalara Türkiye’den üreticilerin katılımı sağlanabilir; ileride ulusal sistem kurulduğunda da AB'nin onayına sunulabilir.

d) Piyasa Yapısı ve Kurumsal Kapasite

Kurumsal Yapılanma

Hidrojen gibi yeni ve çok sektörlü bir alanda başarı, etkin bir kurumsal koordinasyon gerektirir. Bu nedenle, yasal çerçeveye ilişkin önerilerden biri, kurumsal sorumlulukların netleştirilmesi ve gerekiyorsa yeni yapıların oluşturulmasıdır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) bünyesinde hidrojen politikalarını koordine edecek üst düzey birimlerin ihdası önem arz etmektedir. Sektör temsilcileri, hidrojen konusunun önemi ve çok disiplinli yapısı göz önüne alındığında, bu alana odaklanacak bir üst düzey yöneticinin yapısal kararlılık sağlayacağını ve süreçleri hızlandıracağını vurgulamıştır. Hidrojenin enerji, sanayi, ulaşım, çevre ve dış ticaret boyutları düşünüldüğünde, bakanlıklar arası koordinasyon kritik hale gelmektedir. ETKB içinde oluşturulabilecek bir “Hidrojen Dairesi” veya ilgili Bakan Yardımcısı koordinasyonunda bir görev gücü, farklı kurumlar arasındaki uyumu tesis edebilir.

Bunun yanında, kamu-özel sektör iş birliği platformları oluşturulması da önerilmektedir. Örneğin, yeşil hidrojen yatırımlarının önünü açmak üzere kamu otoritelerinin de dahil olacağı bir Küme kurulabilir. Bu kümelenme; bakanlıklar, düzenleyici kurumlar (EPDK), TÜBİTAK gibi Ar-Ge kuruluşları, üniversiteler ve özel sektör temsilcilerini bir araya getirerek yol haritasındaki büyük hedeflerin koordineli bir şekilde hayata geçirilmesini sağlayabilir. Yasal çerçeve, bu tür bir platformun resmiyet kazanmasına yardımcı olabilir; örneğin bir Cumhurbaşkanlığı kararnamesiyle “Ulusal Hidrojen Koordinasyon Kurulu” kurulması ve görevlerinin tanımlanması sağlanabilir. Bu kurul, sertifikasyon sisteminin geliştirilmesi, teşvik politikalarının hazırlanması, standartların uygulanması gibi konularda yönlendirici olabilir.

Düzenleyici Kurumların Rolü

Mevcut enerji piyasası yapısında, elektrik, doğalgaz, petrol gibi alanlar EPDK tarafından düzenlenmektedir. Hidrojenin enerji ekonomisindeki yerinin artmasıyla birlikte, EPDK'nin görev alanının hidrojen piyasasını da içerecek şekilde genişletilmesi gündeme gelebilir. Yasal düzenlemeler, EPDK'ye hidrojen üretim ve satış faaliyetlerini lisanslama, denetleme ve piyasa kurallarını koyma yetkisi verebilir. Henüz ticari bir hidrojen piyasası oluşmamış olsa da, pilot projelerin ticarileşmeye başlamasıyla regülasyona ihtiyaç doğacaktır. EPDK, hidrojenin doğalgaza karıştırılması süreçlerini düzenleyen tarifeler (örneğin hidrojen karışımı gazın dağıtım şirketleri tarafından alım fiyatı) belirleyebilir veya saf hidrojen satışını yapacak tesisler için lisans tipleri tanımlayabilir.

Ayrıca, altyapı yatırımları açısından Boru Hatları ile Petrol Taşıma A.Ş. (BOTAŞ) gibi kuruluşların rolü de yeniden değerlendirilebilir. Uzun vadede büyük ölçekli hidrojen üretimi ve tüketimi söz konusu olduğunda, hidrojen boru hatları inşası veya mevcut doğalgaz hatlarının hidrojen taşımaya uygun hale getirilmesi gündeme gelecektir. Bu kapsamda, BOTAŞ'ın veya yeni kurulacak bir "Hidrojen İletim Şirketi"nin görev, yetki ve sorumlulukları mevzuatta öngörülmelidir. Örneğin, AB'de tartışılan Avrupa Hidrojen Omurgası (European Hydrogen Backbone) haritasına Türkiye'nin de boru hatlarıyla entegre olması durumunda, uluslararası hidrojen boru hattı anlaşmalarına hazırlıklı olunmalıdır. Bu nedenle, Petrol Boru Hatları Kanunu veya Doğal Gaz Kanunu tadilleriyle, boru hattıyla hidrojen taşınması konusunun hukuki zemini oluşturulabilir. Uluslararası boru hattı projeleri (örneğin Türkiye'den Avrupa'ya hidrojen taşıyacak bir hat) için devletlerarası anlaşmalar gerektiğinde, bu anlaşmaların iç hukuka yansımaları da düşünülmelidir.

Mevzuat Oluşumunda Hız ve Şeffaflık

Sektör paydaşlarının altını çizdiği bir diğer konu, hidrojen konusunda mevzuat belirsizliklerinin bir an önce giderilmesidir. Sektör temsilcileri, Türkiye'nin 2030 ve 2035 için belirlediği elektrolizör kapasitesi hedeflerine (sırasıyla 2 GW ve 5 GW) ulaşabilmesi için ilgili mevzuatın süratle oluşturulması gerektiğini vurgulamıştır. Halen yatırımcıların önünde belirsizlik oluşturan kanun ve yönetmelik eksikleri, milyarlarca dolarlık yatırımların hayata geçmesini bekletmektedir. Bu nedenle, kanun yapımcılar ve düzenleyici otoriteler, hidrojen mevzuatı konusunda proaktif ve şeffaf bir süreç izlemelidir. Öneri, ilgili tüm tarafların katılımıyla bir mevzuat çalışma grubu kurulması ve en iyi uygulamaların incelenerek taslak metinlerin hazırlanmasıdır. Bu süreçte akademinin ve özel sektörün görüşleri alınmalı, olası düzenlemelerin ekonomik etkileri analiz edilmelidir.

Hidrojen gibi yeni bir alanda mevzuat hazırlanırken, pilot uygulamalardan öğrenme yaklaşımı benimsenmelidir. Örneğin, hidrojen karışımı denemeleri, pilot üretim tesisleri gibi projelerden elde edilen sonuçlar mevzuata geri besleme sağlamalıdır. Bu nedenle esnek ve uyarlanabilir bir düzenleyici yaklaşım tavsiye edilir. İlk aşamada yönetmelik ve tebliğlerle bazı deneme düzenlemeleri yapılıp, piyasa geliştikçe bunlar revize edilebilir. Yasal çerçeve, bu esnekliğe imkân tanıırken aynı zamanda yatırımcı güvenini zedelemeyecek kadar istikrarlı olmalıdır.

e) Teşvik ve Finansman Mekanizmaları

Teşviklerin Entegrasyonu

Yasal çerçevenin bir diğer kritik boyutu, teşvik ve destek mekanizmalarının hukuki altyapıya entegre edilmesidir. Yeşil hidrojen şu an itibarıyla maliyet açısından fosil alternatiflerine kıyasla daha pahalıdır; ancak ölçek ekonomileri ve teknolojik gelişimle maliyetlerin önümüzdeki on yıllarda önemli ölçüde düşmesi beklenmektedir. Bu geçiş sürecinde, devlet destekleri ve teşvikler piyasayı canlandırırda belirleyici olacaktır. Aşağıdaki teşvik mekanizmaları yasal düzenleme ile hayata geçirilebilir:

- **Yatırım Teşvikleri:** Yeşil hidrojen üretim tesisleri ve ilgili ekipman üretimi (örneğin elektrolizör fabrikaları) mevcut teşvik mevzuatında "öncelikli yatırım" veya "stratejik yatırım" kapsamına alınmalıdır. Bu kapsamda ilk olarak Türkiye'de yerel ve bölgesel kalkınmayı sağlamak, bölge içi ve bölgeler arası gelişmişlik farklarını azaltmak amacıyla, bölgelerin potansiyellerinin

değerlendirilmesi, atıl kaynakların kullanılması, yerel ihtiyaçların karşılanması ve sektörel önceliklerin gözetilmesi gibi hedeflerle Yerel Kalkınma Hamlesi Programı 17 Temmuz 2025 tarihinde Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından ilan edilmiştir. İlan edilen Yerel Kalkınma Hamlesi Teşvik Programı doğrultusunda Balıkesir'de yeşil hidrojen üretiminin yatırım konuları arasına alındığı görülmektedir. Mevcut teşvik mekanizmasına ek olarak ayrıca, yerli üretim ekipman kullanımına yönelik teşvikler sağlanmalıdır. Yol Haritası'nda da açıkça vurgulandığı gibi yeşil hidrojen üretimi ve depolanmasında yerli aksam kullanımını teşvik edecek mekanizmalar kurulması hedeflenmiştir [3]. Bu doğrultuda, örneğin elektrolizör veya yakıt hücresi gibi kritik teknolojilerin Türkiye'de üretimi için alıcı garantisi veren veya ek kredi desteği sunan düzenlemeler yapılabilir.

- **YEKA Modeli ve İhale Mekanizmaları:** Türkiye, yenilenebilir enerji yatırımlarında Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) modeliyle başarılı ihaleler gerçekleştirmiş ve yerli katkı şartı gibi uygulamalarla sanayi kapasitesini geliştirmiştir. Benzer bir modelin yeşil hidrojen için uygulanması önerilmektedir. Hidrojen YEKA ihaleleri ile belirli bölgelerde büyük ölçekli yeşil hidrojen üretim projeleri geliştirilebilir. Bu ihalelerde, projelere alım garantisi (örneğin üretilen hidrojenin kamu tarafından belirli bir fiyattan satın alınması) veya elektrik ücreti desteği (elektroliz için kullanılacak elektrik için sabit düşük tarifeler) sağlanabilir. Sektör temsilcileri, YEKA modelinin hidrojen alanına uyarlanması halinde elektrolizör yatırımlarının kademeli olarak %50 yerlilik oranıyla gerçekleştirilebileceğini belirtmektedir. Bu, hem hızlı kapasite artışı hem de yerli teknoloji gelişimi açısından cazip bir seçenektir. Yasal çerçeve, YEKA benzeri mekanizmaların hidrojen için kullanılmasına olanak verecek hükümler içermelidir (örneğin, Yenilenebilir Enerji Kanunu'na hidrojen YEKA'ları ile ilgili maddeler eklenebilir).
- **Üretim ve Kullanım Destekleri:** Yeşil hidrojen üreticilerine üretim başına kredi (örneğin üretilen her kg H₂ için belirli tutarda ödeme) veya vergi teşviki sağlanması değerlendirilebilir. Ayrıca, yeşil hidrojen kullanan son kullanıcı sektörler (çelik, gübre, rafineri gibi) için de kullanım teşvikleri sağlanabilir. Örneğin, petrol rafinerilerinde kullanılan hidrojenin belirli bir oranının yeşil olması durumunda ilave karbon vergisinden muafiyet veya elektrik piyasasında yeşil hidrojen kullanan tesislere kapasite mekanizmasında öncelik gibi düzenlemeler yapılabilir.
- **Ar-Ge ve İnsan Kaynağı Destekleri:** Hidrojen teknolojilerinde yerli inovasyonu artırmak için Ar-Ge teşvikleri devam ettirilmelidir. Yol Haritası'nda da Ar-Ge ve Ür-Ge'nin teşviki açık politikalar arasındadır [3]. TÜBİTAK programları kapsamında hidrojen üretimi, depolaması, yakıt pilleri, bor türevleri (örneğin sodyum borhidür gibi) konularında özel çağrılar açılabilir. Yasal çerçeve, hidrojen Ar-Ge projelerine vergi indirimleri, hibe programları veya sonuç odaklı finansman desteği verecek düzenlemelere yer vermelidir. Ayrıca, nitelikli insan kaynağı yetiştirilmesi için üniversitelerde hidrojen teknolojileri ile ilgili programların desteklenmesi, yurt dışı eğitim bursları gibi önlemler de mevzuat ve politika belgelerine dahil edilmelidir.

Sektör temsilcileri, 2035 yılına kadar 5 milyar dolarlık elektrolizör yatırımının gerçekleşmesi için mevzuat belirsizliklerinin süratle giderilmesi ve yerli elektrolizör üretimine özel finansman ile teşvik sisteminin uygulanması gerektiğini ifade etmiştir. Bu doğrultuda, bir "Yeşil Hidrojen Fonu" oluşturulması düşünülebilir. Kanunla kurulacak böyle bir fon, kamu bütçesinden veya uluslararası iklim finansmanı kaynaklarından sağlanacak katkılarla, hidrojen projelerine uygun koşullu kredi veya hibe desteği verebilir. Örneğin, AB'nin "Hidrojen Bankası" inisiyatifi benzeri bir şekilde, ilk büyük ölçekli hidrojen projelerinin fizibil hale gelmesi için mali destek sağlanabilir. Türkiye, uluslararası finansman imkanlarını (Yeşil İklim Fonu, Dünya Bankası, kalkınma bankaları vb.) da değerlendirerek bu fonu besleyebilir.

f) Uluslararası Uyum ve İş Birliği

AB Mevzuatı ve Uluslararası Anlaşmalarla Uyum

Türkiye'nin hidrojen alanındaki yasal çerçevesi, AB müktesebatıyla mümkün olduğunca uyumlu hale getirilmelidir. Zira hem AB'ye aday ülke statüsü hem de gelecekteki hidrojen ticareti hedefleri nedeniyle, uyumlu düzenlemeler işlem maliyetlerini düşürecek ve piyasaya erişimi kolaylaştıracaktır. Özellikle sertifikasyon ve garanti sistemi konusunda AB standartlarına uyum büyük önem taşır; AB'ye ihraç edilecek hidrojenin "yeşil" kabulü için AB'nin sürdürülebilirlik kriterlerinin karşılanması ve menşe garantisi sertifikasına sahip olunması gerekecektir. Türkiye'nin sertifikasyon altyapısını AB'ninkiyle uyumlu şekilde kurmaya başlamış olması olumlu bir adımdır. Bu sürecin devamında mevzuat, AB'deki gelişmelere paralel güncellenmelidir. Örneğin AB'nin 2023'te kabul ettiği yenilenebilir hidrojen tanımlarına ve 2024'te resmileştirdiği gönüllü sertifikasyon şemalarına Türkiye hukuku da atıf yapabilir veya benzer tanımları içerebilir [174]. Bunun yanı sıra, Türkiye'nin bölgesel hidrojen iş birliklerine açık bir tutum sergilemesi gereklidir. AB ile hidrojen iş birliği potansiyeli yüksek olup, bunun somutlaşması için karşılıklı standart uyumu ve altyapı entegrasyonu kritik olacaktır. Örneğin, bir yandan Türkiye'nin elektrik ve gaz şebekelerinin Avrupa ile enterkonekte olması avantajken diğer yandan hidrojenin bu sistemlere entegrasyonu planlanmalıdır. Avrupa'nın planladığı hidrojen enerji altyapısına (örneğin Hidrojen Omurgası projesine) Türkiye'nin dahil edilmesi, hukuki düzenlemelerin uyumunu gerektirir. Sınır ötesi hidrojen nakliyatı, gümrük ve enerji ticareti mevzuatlarında düzenlenmeli; AB'nin hidrojen ticaretine yönelik oluşturacağı hukuki çerçeveye Türkiye hazır olmalıdır. Bu kapsamda, gümrük tarife kodlarından taşıma güvenliği protokollerine kadar çeşitli teknik ayrıntılar ileride gündeme gelecektir.

Ayrıca, uluslararası hidrojen anlaşmaları konusunda Türkiye öncü adımlar atabilir. Yeşil hidrojen üretim potansiyeli yüksek ülkelerle (örneğin Ortadoğu ve Kuzey Afrika ülkeleri) teknolojik ve ticari iş birlikleri geliştirmek üzere devlet düzeyinde anlaşmalar yapılabilir. Bu anlaşmalarda, karşılıklı sertifika tanıma, teknik standart uyumu, ortak Ar-Ge programları gibi unsurlar bulunabilir. Örneğin Almanya'nın bazı ülkelerle hidrojen alanında iş birliği anlaşmaları imzaladığı bilinmektedir; Türkiye de bu tür iş birliklerine dahil olabilir veya benzer anlaşmalar yapabilir. Bu durum, ulusal mevzuatın uluslararası düzenlemelerle etkileşimini gündeme getirecektir. Önerimiz, çıkarılacak hidrojen kanunu veya ilgili düzenlemelerde, uluslararası anlaşmaların iç hukuka aktarılması için hükümler bulunması yönündedir. Böylece, herhangi bir ikili veya çok taraflı hidrojen anlaşması imzalandığında, bunun iç hukuktaki etkileri (örneğin yabancı sertifikaların tanınması, gümrük muafiyetleri vb.) kolaylıkla hayata geçirilebilir.

Bölgesel ve Küresel Standartlarda Söz Sahibi Olma

Türkiye, sadece mevzuata uyum sağlamakla kalmamalı, aynı zamanda küresel hidrojen normlarının belirlenmesinde aktif rol almalıdır. Bu, yasal çerçeve önerilerinden daha ziyade bir stratejik yönelim olsa da, sonuçta hukuk yapıcılarının tavrını etkileyecektir. Örneğin, Türk standart kuruluşları uluslararası komitelere katılım sağlayarak hidrojenle ilgili standartların hazırlanmasında söz sahibi olabilir. Aynı şekilde Türkiye, Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı (IRENA) gibi platformlarda hidrojenin geleceğine dair düzenleyici politikaların şekillenmesine katkıda bulunabilir. Türkiye'nin ulusal hidrojen stratejisini kararlılıkla uygulaması ve teknik altyapısını AB standartlarıyla uyumlu hale getirmesi, küresel hidrojen piyasasına entegrasyonunu kolaylaştıracaktır. Bu nedenle yasal çerçeve, esneklik ve uyum sağlama kapasitesiyle birlikte tasarlanmalıdır.

5.5.6. Sonuç ve Değerlendirme

Sonuç olarak, temiz hidrojen alanında kapsamlı bir yasal çerçevenin oluşturulması, Türkiye'nin hem kendi yeşil dönüşüm hedeflerine ulaşmasında hem de küresel hidrojen ekonomisinde rekabetçi bir oyuncu olmasında belirleyici olacaktır. Mevcut durumda hidrojen konusunda ciddi bir

mevzuat boşluğu olmakla birlikte, hazırlanan ulusal strateji ve yol haritası bu boşluğun bilinciyle çeşitli politika önerileri sunmuştur. Bu önerileri hayata geçirmek için, burada sıralanan adımlar doğrultusunda yeni kanunlar ve düzenlemeler çıkarılmalıdır.

Öncelikle hidrojenin enerji sistemindeki rolünü tanımlayan ve belirsizlikleri gideren birincil mevzuat gereklidir. Ardından sertifikasyon, standartlar, teşvikler gibi özel konular ikincil mevzuatla detaylandırılmalıdır. Tüm bu süreçte şeffaflık, katılımcılık ve bilimsel veriye dayalı politika yapımı esas alınmalıdır. Hidrojen sektörünün paydaşları –kamu otoriteleri, özel sektör, STK’lar ve akademi– arasında etkili bir iletişim ve iş birliği ortamı sağlanmalıdır. Yol Haritası’nda belirlenen hedeflerin gerçekleşmesi, bu iş birliği ve kararlılıkla mümkün olacaktır.

Unutulmamalıdır ki hidrojen, enerjide yeni bir paradigma değişimini temsil etmektedir ve bugünden atılacak yasal adımlar, önümüzdeki onlarca yılın altyapısını hazırlayacaktır. Türkiye, 2053 net sıfır taahhüdüne ulaşmak ve hidrojen teknolojilerinde söz sahibi olmak istiyorsa, hukuki zemini sağlam, öngörülebilir ve teşvik edici bir ortam kurmak zorundadır. Yukarıda sunulan yasal çerçeve önerileri, Türkiye’nin temiz hidrojen yarışında ön saflarda yer alabilmesi için gereken temel unsurları içermektedir. Mevzuatın hayata geçirilmesiyle birlikte yeşil hidrojen piyasasının gelişeceği, yeni yatırımların teşvik edileceği ve Türkiye’nin gerek bölgesel gerek küresel hidrojen ticaretinde önemli bir aktör haline geleceği öngörülmektedir.

6. Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı

Günümüzde enerji dönüşümüne ilişkin küresel hedefler doğrultusunda, düşük karbonlu teknolojilere geçiş süreci hız kazanmıştır. Bu bağlamda hidrojen, özellikle de yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretilen yeşil hidrojen, stratejik bir enerji taşıyıcısı ve sanayiden ulaştırmaya kadar birçok sektörde karbon salımlarını azaltacak temel bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Türkiye'nin bu dönüşüm sürecine aktif ve öncü bir şekilde dahil olması amacıyla yürütülen çalışmalar arasında, ülkenin ilk hidrojen vadisi girişimi olan HYSouthMarmara Projesi, temiz hidrojenin üretim, depolama, taşınması ve kullanımına yönelik önemli bir kilometre taşı niteliğindedir. Güney Marmara Bölgesi özelinde geliştirilen Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı ise, bu dönüşümün bölgesel ölçekte stratejik bir yol haritasını sunarak, ulusal hedeflerle uyumlu bir vizyon ortaya koymaktadır.

Eylem planı, bölgesel düzeyde rekabetçi ve sürdürülebilir bir hidrojen ekonomisinin oluşturulmasına yönelik bütüncül bir çerçeve sunmaktadır. Üretim, iletim, depolama, kullanım ve ihracat dahil olmak üzere hidrojen değer zincirinin tüm aşamalarını kapsayan plan; ekonomik, teknik, çevresel ve kurumsal boyutları entegre biçimde ele alarak, sektörel geçiş süreçlerinde karşılaşılabilecek engellere dair çözüm önerileri geliştirmeyi hedeflemektedir. Böylece hem bölgesel kalkınma hem de enerji arz güvenliği açısından uzun vadeli bir dönüşüm hedeflenmektedir.

Hazırlık süreci, geniş paydaş katılımıyla şekillendirilmiştir. Bölgedeki kamu kurumları, sanayi kuruluşları, akademik çevreler ve sivil toplum temsilcilerinin yer aldığı çalıştaylar ve odak grup toplantıları aracılığıyla kapsayıcı ve katılımcı bir yöntem izlenmiştir. Bu süreçte ayrıca bölgenin mevcut durumunu nesnel şekilde değerlendirmek için kapsamlı bir GZFT analizi yapılmış; güçlü ve zayıf yönler ile fırsat ve tehditler, katılımcı anketler aracılığıyla belirlenmiş ve bu bulgular doğrudan stratejik hedeflere dönüştürülmüştür.

GZFT analizinden elde edilen stratejik hedefler şu şekilde öne çıkmıştır:

- Güçlü yönler ve fırsatlar ekseninde; yenilenebilir kaynaklar ve elektroliz ile yeşil hidrojen üretim altyapısının kurulması, ihracata dönük pazar stratejilerinin geliştirilmesi, üniversite ve teknoparklar üzerinden teknoloji üretiminin teşvik edilmesi, izlenebilirlik ve sertifikasyon sistemlerinin oluşturulması, sanayi kümeleri etrafında uygulama bölgeleri kurulması, genç insan kaynağına istihdam ve girişimcilik destekleri sağlanması, karbonsuzlaştırma mevzuatına uygun girişimcilik ekosistemleri oluşturulması, yerli teknolojilere dayalı ihracat destekli ürünler geliştirilmesi, üniversite–sanayi iş birliğiyle hidrojen teknolojilerinin ilerletilmesi ve girişimcilere yönelik hızlandırıcı–teşvik programlarının uygulanması.
- Zayıf yönler ve fırsatlar çerçevesinde; Ar-Ge fonlarının artırılması, üniversitelerde hidrojen odaklı lisans ve lisansüstü programların açılması, KOBİ'ler aracılığıyla mikro ölçekli üretimin desteklenmesi, uluslararası fonlara erişim için stratejik başvuru ofislerinin kurulması, hidrojen güvenliği konusunda standart ve farkındalık çalışmaları yapılması, su temini ve artırımında sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi, finansal teşvik mekanizmalarının güçlendirilmesi, üretim–dolum altyapısına hibe desteği sağlanması, sektörel dönüşüm için iş dünyasıyla ortak planlama yapılması ve hibrit sistem teşviklerinin (hidrojenin başka enerji sistemleriyle (özellikle batarya sistemleri, biyogaz, güneş, rüzgar vb.) entegre kullanıldığı çok bileşenli sistemler) uygulanması.
- Tehditler ve güçlü yönler ekseninde; uluslararası standartlarla uyumlu hidrojen mevzuatının hazırlanması, toplumsal algı ve güven için halk odaklı pilot projelerin başlatılması, kamu–özel sektör iş birliğiyle mevcut enerji ve sanayi sistemlerinin hidrojen temelli sistemlere dönüştürülmesini içeren dönüşüm planlarının hazırlanması, yerel üretim ve depolama çözümlerinin teşvik edilmesi, hidrojen teknolojilerinin medya ve eğitim yoluyla

tanıtılması, karbonsuz ekonomi hedefiyle yeni sektör desteklerinin sağlanması, kamu rehberlik ve danışmanlık sistemlerinin oluşturulması, girişimcilik ortamının kurumsal yönetimle güçlendirilmesi, üniversite altyapılarının güvenlik standartlarına göre güncellenmesi ve kritik sektörlerde hidrojen geçişi için teknoloji yol haritalarının hazırlanması.

- Tehditler ve zayıf yönler kesişiminde; ulusal hidrojen eylem planı ve teşvik sistemlerinin hızla oluşturulması, karbon yakalama–kullanma–depolama (CCUS) pilot projeleriyle teknoloji transferi yapılması, altyapı yatırımlarında yerel yönetimlere destek verilmesi, hidrojen bankası ve özel finans kurumları için düzenleyici çerçeve hazırlanması, kamu–özel sektör arasında düzenli iş birliği mekanizmalarının kurulması, pazar güvenliği için alım garantileri ve fiyat dengeleme mekanizmalarının uygulanması, bürokratik engelleri azaltacak hızlandırılmış izin süreçlerinin tanımlanması, teknik komiteler aracılığıyla standart ve yönetmeliklerin hazırlanması, toplumun bilinçlendirilmesine yönelik medya kampanyaları ve eğitim modüllerinin geliştirilmesi ile ulusal hidrojen pazarının oluşturulması.

Bu kapsamlı analiz ve paydaş katkıları, Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı'nın uygulanmasına yön verecek sekiz ana stratejik hedefin belirlenmesini sağlamıştır. Bu hedefler, bölgenin güçlü yönlerini pekiştirirken zayıf yönlerini gidermeyi, fırsatları değerlendirmeyi ve olası tehditlere karşı dayanıklılığı artırmayı amaçlamaktadır.

Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı – Ana Stratejik Hedefler

1. Hidrojen üretimini ölçeklendirmek
 - Yenilenebilir enerji kaynakları ve elektroliz teknolojileri kullanılarak bölgesel yeşil hidrojen üretim kapasitesini artırmak, üretim maliyetlerini düşürmek ve ticari ölçekte üretime geçmek.
2. Bölgesel hidrojen omurgasını kurmak ve altyapı dönüşümünü gerçekleştirmek
 - Hidrojenin iletimi, depolanması ve dağıtımı için entegre altyapı sistemleri kurmak; mevcut enerji ve ulaşım altyapısını hidrojenle uyumlu hale getirmek.
3. Mevzuat, sertifikasyon ve alım garantisi mekanizmalarını oluşturmak
 - Uluslararası standartlara uyumlu mevzuat geliştirmek, izlenebilirlik ve sertifikasyon sistemlerini kurmak, alım garantisi ve fiyat dengeleme mekanizmaları oluşturmak.
4. Yerel hidrojen pazarının gelişimini kolaylaştırmak; sanayi ve ulaşımda kullanımını yaygınlaştırmak
 - Sanayi tesislerinde ve ulaşım sektöründe hidrojen kullanımını teşvik etmek; yerel pazar talebini artıracak pilot projeler ve teşvik mekanizmaları geliştirmek.
5. İnsan kaynağını geliştirmek ve bilgi altyapısını güçlendirmek
 - Hidrojen teknolojileri alanında eğitim, sertifika ve akademik programlar başlatmak; nitelikli işgücü yetiştirmek ve bilgi paylaşımını artırmak.
6. Güney Marmara'yı hidrojen ihracatında stratejik bir geçit haline getirmek
 - Liman, lojistik ve depolama kapasitesini geliştirerek bölgeyi uluslararası hidrojen ticaretinde merkez konumuna taşımak.
7. Araştırma, geliştirme ve inovasyonu teşvik etmek
 - Üniversite, teknopark ve sanayi iş birlikleriyle yeni hidrojen teknolojileri geliştirmek; Ar-Ge projelerini ve yenilikçi girişimleri desteklemek.
8. Hidrojenin enerji sistemleriyle entegrasyonunu sağlamak
 - Hidrojeni elektrik, ısı ve yakıt hücresi teknolojileriyle entegre ederek hibrit ve karbonsuz enerji sistemlerini yaygınlaştırmak.

Stratejik hedeflere eylem alanlarına, eylemlere ve yürütülecek faaliyetlere ilgili iş paketi kapsamında tamamlanan dokümandan özetlenerek devam eden bölümlerde yer verilmiştir.

6.1. Stratejik Hedef 1: Hidrojen Üretimini Ölçeklendirmek

Bölgede hidrojen üretimini ölçeklendirmek, yalnızca temiz enerji dönüşümü için değil, bölgesel ekonomik büyüme ve rekabetçilik için de kritik bir hedef olmaktadır. Bu kapsamda, temiz hidrojen üretim altyapısının genişletilmesi, liman altyapılarının hidrojen ticaretine uygun hale getirilmesi ve hidrojen piyasasında off-take garantilerinin sağlanması planlanmaktadır. Ayrıca OSB'lerde yenilenebilir enerji kaynaklı hidrojen üretimi yapılması, turkuaz hidrojen teknolojilerine yatırım yapılması ve doğalgaz şebekesinin hidrojen karışımına uyumlu hale dönüştürülmesi hedeflenmektedir. Ayrıca yerli elektrolizör ve PEM yakıt pili teknolojilerini ilerletmek ve Güney Marmara'da hidrojen ihtisas endüstri bölgesi kurmak da uzun vadeli hedefler arasında yer almaktadır. **Eylem Alanı 1.1: Yeşil Hidrojen Üretim Altyapısı**

Eylem 1.1.1 – Şebeke fizibilitesinin yapılması (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Hidrojen üretim noktalarının şebekeye entegrasyon kapasitesini analiz etmek
- Elektrik altyapısının elektrolizörlerle uyumluluğunu değerlendirmek
- Gerekli şebeke yatırımlarını planlamak

Uygulama Dönemi: 2026-2028

Eylem 1.1.2 – Hidrojen Vadisi/Köyü Oluşturulması (Kısa-Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Pilot ölçekte hidrojen vadisi veya köyü tasarlamak
- Üretim, dağıtım ve kullanım altyapısını entegre şekilde kurmak
- Kamunun ve özel sektörün ortaklık yapısıyla projeleri gerçekleştirmek

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 1.2: Liman Altyapılarının Uygun Hale Getirilmesi

Eylem 1.2.1 – Üretim, depolama ve taşıma yollarının iyileştirilmesi (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Liman alanlarında hidrojen üretimi ve tanklama sistemlerini planlamak
- Taşıma yollarının ve boru hatlarının optimizasyonunu sağlamak
- İlgili ulaştırma altyapısını hidrojen lojistiğine uygun hale getirmek

Uygulama Dönemi: 2026–2035

Eylem 1.2.2 – Liman sahalarının genişletilmesi (Orta Vadeli)**Yürütülecek Faaliyetler:**

- Hidrojen taşıyan gemilere hizmet verecek yeni alanlar oluşturmak
- Yükleme-boşaltma ve depolama operasyonları için terminal kapasitesini artırmak

Uygulama Dönemi: 2030–2035**Eylem 1.2.3 – Depolama teknolojilerinin geliştirilmesi (Uzun Vadeli)****Yürütülecek Faaliyetler:**

- Hidrojenin sıvı, katı ve gaz formda liman içinde uzun süreli depolanmasına yönelik Ar-Ge çalışmaları yürütmek
- Yeni teknolojilerin pilot uygulamalarını başlatmak

Uygulama Dönemi: 2053**Eylem Alanı 1.3: Off-Take Garantileri ve Pazar Altyapısı****Eylem 1.3.1 – Off-take mekanizmalarının oluşturulması ve yaygınlaştırılması (Kısa-Orta Vadeli)****Yürütülecek Faaliyetler:**

- Hidrojen üreticileri ile kullanıcılar arasında uzun vadeli alım sözleşmeleri düzenlemek
- Yatırımcılar için gelir güvencesi sunmak amacıyla alım garantili modeller tasarlamak
- Bu mekanizmaları yaygınlaştırmak için teşvik modelleri geliştirmek

Uygulama Dönemi:2026–2030**Eylem Alanı 1.4: Organize Sanayi Bölgelerinde Hidrojen Üretimi****Eylem 1.4.1 – OSB’lerde temiz hidrojen üretim altyapısının kurulması (Orta Vadeli)****Yürütülecek Faaliyetler:**

- OSB’lerde güneş ve rüzgar enerjisi kaynaklı elektrolizör sistemleri kurmak
- Üretim için gerekli su arıtma, enerji bağlantı altyapılarını sağlamak
- Hidrojenin OSB içi dağıtım sistemlerini planlamak

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 1.5: Turkuaz Hidrojen Üretimi

Eylem 1.5.1 – Doğalgazın termal pirolizi yöntemiyle turkuaz hidrojen üretiminin geliştirilmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Doğalgazdan karbonun katı formda ayrıştırılması için termal piroliz sistemleri tasarlamak
- Yerli teknolojiye dayalı Ar-Ge projeleri geliştirmek
- Pilot ölçekte tesis kurulumlarını gerçekleştirmek

Uygulama Dönemi:2026–2030

Eylem Alanı 1.6: Doğalgaz Altyapısında Hidrojen Dönüşüm Programı

Eylem 1.6.1 – Fizibilite, dönüşüm planı, cihaz uyumluluğu gibi çalışmaların entegrasyon programına dönüştürülmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Doğalgaz altyapısının hidrojen karışımına uygunluğunu belirlemek için fizibilite çalışmaları yürütmek
- Hattaki basınç, malzeme ve sistem uyumluluğunu analiz etmek
- Konutlarda ve sanayide kullanılan cihazların hidrojenle çalışabilirliğini test etmek
- Elde edilen veriler doğrultusunda tüm süreci kapsayan entegre bir dönüşüm programı hazırlamak

Uygulama Dönemi:2026–2032

Eylem Alanı 1.7: Elektrolizör ve PEM Teknolojileri Geliştirme ve Uygulama Entegrasyonu

Eylem 1.7.1 – Yerli PEM üretimi ile elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesi (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Yerli PEM membran üretim kapasitesini geliştirmek ve endüstriyel üretime geçmek
- Elektrolizör sistemlerinin yerli bileşenlerle üretimini planlamak
- Üniversite ve özel sektörle iş birliği içinde teknoloji transfer programları tasarlamak
- Üretilen sistemlerin saha uygulamalarıyla performanslarını test etmek

Uygulama Dönemi: 2035–2053

Eylem Alanı 1.8: Hidrojen İhtisas OSB / Endüstri Bölgesi

Eylem 1.8.1 – Güney Marmara H2 Endüstri Bölgesi' oluşturulması (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Hidrojen üreticileri, teknoloji geliştiriciler ve kullanıcı sektörleri bir araya getiren ihtisas OSB planlamak
- Bölgede hidrojenin üretiminden tüketimine kadar entegre bir ekosistem oluşturmak
- Girişimcilik, Ar-Ge, üretim ve ihracat faaliyetlerini aynı bölgede toplamak
- Ulusal ve uluslararası yatırımcılarla iş birlikleri kurmak

Uygulama Dönemi:2035–2053

6.2. Stratejik Hedef 2: Bölgesel Hidrojen Omurgasını Kurmak ve Altyapı Dönüşümünü Gerçekleştirmek

Hidrojenin üretildiği noktalardan kullanım alanlarına güvenli ve ekonomik bir şekilde ulaştırılmasını sağlamak, hidrojen ekonomisinin gelişimi için temel bir adım olmaktadır. Bu doğrultuda taşıma, depolama ve iletim altyapılarının planlanması, mevcut doğal gaz hatlarının hidrojen karışımına uyumlu hale getirilmesi, yeni boru hattı yatırımlarının gerçekleştirilmesi ve limanlarla entegre taşımacılık sistemlerinin kurulması hedeflenmektedir. Katı formda hidrojen taşıma gibi alternatif lojistik çözümlerinin test edilmesi, yeraltı tuz mağaralarının büyük hacimli hidrojen depoları olarak değerlendirilmesi ve bu alanlarda fizibilite çalışmaları yürütülmesi de stratejik öncelikler arasında yer almaktadır.

Eylem Alanı 2.1: Taşıma Depolama ve İletim

Eylem 2.1.1 – Hidrojen dolun altyapılarının kurulması (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Endüstriyel kullanım ve ulaşım sektörüne yönelik dolun istasyonları projelendirmek
- Limanlarda ve OSB'lerde dolun altyapılarını konumlandırmak
- Gemi taşıma operasyonlarına uygun dolun noktaları oluşturmak
- Depolama tankları ve bağlantı sistemlerinin teknik gerekliliklerini sağlamak

Uygulama Dönemi: 2030–2053

Eylem 2.1.2 – Boru hattı sistemi fizibilitesinin ve yatırımlarının gerçekleştirilmesi (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bölgede hidrojen iletimi için boru hattı güzergâh alternatiflerini değerlendirmek
- Üretim ve tüketim noktalarını bağlayan yeni hidrojen iletim hatları tasarlamak
- Mevcut doğal gaz hatlarının hidrojen iletimi için uygunluğunu analiz etmek
- Kritik sanayi bölgelerini entegre edecek taşıma güzergahlarını belirlemek
- Hidrojen iletim hatlarının ulusal şebekeye entegrasyonuna yönelik yatırımları planlamak

Uygulama Dönemi: 2035-2050

Eylem 2.1.3 – Liman-boru hattı entegrasyonunun sağlanması (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Liman sahalarında hidrojen dolumu ve iletimi için altyapı oluşturmak
- Boru hatlarını doğrudan liman yükleme terminallerine entegre etmek
- İhracat hedefli liman planlamalarında hidrojen lojistiğine öncelik vermek
- Gümrük, güvenlik ve teknik kontrolleri kolaylaştıracak sistemleri geliştirmek

Uygulama Dönemi: 2035-2050

Eylem 2.1.4 – Güney Marmara’da doğal gaz-mix hatlarının planlanması ve pilot entegrasyonlarının yapılması (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Farklı lokasyonlar için bölgesel karışım oranı senaryoları geliştirmek
- Teknik uygunluğu yüksek bölgelerde H₂/CH₄ karışım hatları oluşturmak
- Bozcaada, Bandırma, Balıkesir gibi pilot sahalarda uygulamaları başlatmak
- Şebeke operatörleriyle entegrasyon çalışmaları yürütmek

Uygulama Dönemi: 2030–2040

Eylem Alanı 2.2: Katı Formda Hidrojen Ar-Ge Programları ve Lojistik Çözümler

Eylem 2.2.1 – Katı formda hidrojen üretim, depolama ve taşımaya yönelik Ar-Ge ve pilot uygulama programının başlatılması (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bor bazlı katı form hidrojen üretimi, depolama ve taşıma teknolojilerine yönelik ortak Ar-Ge projeleri yürütmek
- Üniversiteler, kurumlarının iş birliğiyle teknoloji geliştirme ve test platformu kurmak
- Katı formda hidrojen taşıma çözümlerini (mobil, konteyner vb.) pilot alanlarda uygulamak
- Katı ve sıvı formda taşıma yöntemlerini maliyet, güvenlik ve verimlilik açısından karşılaştırmak
- Lojistik firmalarıyla birlikte taşımaya yönelik ölçeklenebilir uygulama planları geliştirmek

Uygulama Dönemi: 2026–2050

Eylem Alanı 2.3: Yeraltı Hidrojen Depolama

Eylem 2.3.1 – Büyük hacimli hidrojen depolamaya yönelik fizibilite ve pilot çalışmaların yapılması (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Güney Marmara'nın altyapı, topoğrafyası gözetilerek hidrojen depolamaya uygunluğunu araştırmak
- Seçilen alanlarda yeraltı hidrojen deposu kurmak üzere teknik analizler yürütmek
- Pilot depo kurulumları ile yeraltı basınç, sıcaklık ve sızdırmazlık testlerini gerçekleştirmek
- Depolama kapasitelerinin ticari kullanım senaryolarını modellemek

Uygulama Dönemi: 2026–2035**6.3. Stratejik Hedef 3: Mevzuat, Sertifikasyon ve Alım Garantisi Mekanizmalarını Oluşturmak**

Güney Marmara Bölgesi'nde hidrojen alanında geliştirilecek mevzuat, sertifikasyon ve alım garantisi sistemlerine bölgesel katkı sunmak, bölgeyi bu süreçlerin öncü pilot uygulama sahası haline getirmek ve bölgesel aktörlerin mevzuat oluşturma ve uygulama süreçlerine entegrasyonunu sağlamak amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ulusal mevzuat altyapısına katkı verecek geri bildirim mekanizmalarının kurulması, bölgedeki üretici ve tüketicilerin sertifikasyon sistemlerine hazırlanması, ve yatırım güvenliği sağlayacak örnek modeller geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Eylem Alanı 3.1: Mevzuat ve Fon Oluşturulması**Eylem 3.1.1 – Mevzuat ve fon oluşturulmasına bölgesel katkı sağlanması (Kısa Vadeli)****Yürütülecek Faaliyetler:**

- Bölgedeki aktörlerin katılımıyla ulusal mevzuat süreçlerine teknik katkı sunulması
- Ulusal hidrojen fonlarının bölgeye özgü uygulamalar için yönlendirilmesi
- Mevzuat hazırlıklarına yönelik yerel çalıştay, panel ve geri bildirim toplantıları yapılması
- Bölgesel yatırım güvenliği ihtiyaçlarının raporlanarak merkezi kurumlara iletilmesi

Uygulama Dönemi: 2026–2030**Eylem Alanı 3.2: Yasal ve Teşvik Altyapısı****Eylem 3.2.1 – Bölgesel uygulamalardan edinilen deneyimle mevzuat iyileştirmelerine katkı sunulması (Kısa Vadeli)****Yürütülecek Faaliyetler:**

- Güney Marmara'daki uygulamalarda karşılaşılan mevzuat sorunlarını tespit etmek
- Pilot tesislerdeki pratik deneyimleri ulusal düzenlemelere entegre edecek raporlar hazırlamak
- Yerel uygulayıcılarla mevzuat analiz çalıştayları düzenlemek
- İlgili bakanlıklara sahaya dayalı iyileştirme önerileri sunmak

Uygulama Dönemi: 2026–2028**Eylem Alanı 3.3: Piyasa Düzenleyici Kurum Yapılanması****Eylem 3.3.1 – Bölgesel bilgi paylaşımı yoluyla piyasa düzenleyici yapıya katkı sağlanması (Orta Vadeli)****Yürütülecek Faaliyetler:**

- Güney Marmara'da kurulan altyapılardan gelen verilerle piyasaya dair bilgi akışını desteklemek

- Pilot projeler üzerinden piyasa davranışlarını izleyerek düzenleyici yapıya bilgi sunmak
- Bölgesel paydaşlarla piyasa düzenleyicileri arasında geri bildirim mekanizmaları kurmak

Uygulama Dönemi: 2028–2035

Eylem Alanı 3.4: Sertifikasyon Mevzuat Çerçevesi

Eylem 3.4.1 – Sertifikasyon sisteminin bölgesel pilot uygulamalarıyla test edilmesi (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Güney Marmara’da üretilecek hidrojen için ilgili kurumuş birliğiyle ön sertifikasyon senaryoları oluşturmak
- Pilot sertifikasyon süreçlerini bölgede uygulayarak geri bildirim sağlamak
- Sertifika süreçlerinin bölgedeki yatırımcılar tarafından test edilmesini koordine etmek
- Bölgedeki üreticilere yönelik rehber dokümanlar hazırlamak

Uygulama Dönemi: 2026–2028

Eylem Alanı 3.5: Uyumlu Sertifikasyon Sistemi Ve Ticaret Uygulamaları

Eylem 3.5.1 – Bölgesel üreticiler için uyumlu sertifikasyon ve ticaret uygulamalarının geliştirilmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Güney Marmara’daki ihracata dönük üreticiler için AB uyumlu ticaret belgeleri hazırlamak
- Sertifikasyon süreçlerinin bölgesel üreticiler üzerindeki etkisini izlemek
- Uluslararası sertifikasyon sistemlerine bölge firmalarının erişimini kolaylaştırmak için rehberlik hizmetleri sunmak

Uygulama Dönemi: 2026–2035

Eylem Alanı 3.6: H₂ Finans Platformu / Fon Havuzu

Eylem 3.6.1 – Bölge odaklı yatırımcı eşleştirme platformu ve fon modelinin önerilmesi (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Güney Marmara’ya özel yatırım fırsatlarını sergileyecek bir dijital eşleştirme platformu kurmak
- İlgili kurumların destekleriyle bölgeye özgü fon havuzu modeli geliştirmek
- Bölgedeki yatırımcı ve proje geliştiriciler için tanıtım ve bilgilendirme faaliyetleri düzenlemek
- Fon sistemi üzerinden sağlanan finansmanların performansını izlemek

Uygulama Dönemi: 2026–2030

6.4. Stratejik Hedef 4: Yerel Hidrojen Pazarının Gelişimini Kolaylaştırmak/Sanayi ve Ulaşımında Kullanımını Yaygınlaştırmak

Güney Marmara Bölgesi’nde hidrojenin sanayi ve ulaşım gibi temel sektörlerde kullanımını artırmak, hem ekonomik dönüşümü hızlandırmak hem de karbonsuzlaşmayı desteklemek açısından büyük önem taşımaktadır. Bu hedef kapsamında hidrojen temelli pilot uygulamaların yaygınlaştırılması, ilgili mevzuatın oluşturulması, dolum altyapısının kurulması, yerli yakıt pili

teknolojilerinin geliştirilmesi ve karbon yoğun sektörlerde hidrojen kullanımının teşvik edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda hidrojenin piyasa değerini oluşturmak, dış ticaret ve borsa gibi pazar mekanizmalarını işler hale getirmek ve sanayide dönüşüm projeleri başlatmak, hidrojen pazarını canlı ve sürdürülebilir kılmak için öncelikli adımlar arasında yer almaktadır.

Eylem Alanı 4.1: Yerel Hidrojen Pazarını Oluşturmak ve Ticaretini Geliştirmek

Eylem 4.1.1 – Yatırım teşviklerinin geliştirilmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Hidrojen uygulamaları için özel teşvik paketleri tanımlamak
- Yatırımcılara yeşil hidrojen altyapı destekleri sağlamak
- Teşvikleri üretim, depolama ve dolum alanlarını kapsayacak şekilde genişletmek

Uygulama Dönemi: 2026–2035

Eylem 4.1.2 – Değer zinciri kurulumu (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Yeşil hidrojenin üretimden son kullanımına kadar tüm adımları kapsayan zinciri oluşturmak
- Tedarikçiler, taşıyıcılar ve kullanıcılar arasında koordinasyonu sağlamak
- Bölgesel bir hidrojen lojistik ve kullanım ekosistemi geliştirmek

Uygulama Dönemi: 2026–2053

Eylem Alanı 4.2: Yeşil Hidrojenin Sanayi ve Ulaşımında Kullanımını Yaygınlaştırmak

Eylem 4.2.1 – Pilot tesis kurulması ve ulaşım uygulamalarının gerçekleştirilmesi (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Yeşil hidrojen kullanan pilot ulaşım projeleri başlatmak
- Hidrojenle çalışan araç filoları oluşturmak
- Belediyelerde hidrojen temelli ulaşım sistemlerini uygulamak
- Sanayide temiz hidrojen kullanımını için pilot tesisler kurmak

Uygulama Dönemi: 2026–2053

Eylem 4.2.2 – Belediye otobüsleri ve toplu taşıma için pilot dolum istasyonları kurulması (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Büyükşehirlerde pilot dolum tesisleri kurmak
- Toplu taşıma filolarını hidrojenli araçlarla donatmak
- Dolum altyapısını belediyelerin ulaşım sistemine entegre etmek

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem 4.2.3 – Sanayide yeşil hidrojen kullanımına yönelik pilot uygulamaların başlatılması (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Rafineri, gübre, cam gibi alanlarda yeşil hidrojenle çalışan sistemler kurmak
- Bu sektörlerde özel teşvik programları geliştirmek
- Mevcut tesisleri dönüştürmek üzere destek programları uygulamak

- Yeşil hidrojen üretimi, depolama, taşımacılık ve proses entegrasyonu alanlarında yenilikçi çözümler geliştiren start-up'lara özel hibe ve mentorluk programları başlatmak

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem 4.2.4 – Karbon yoğun sektörlerde yeşil hidrojen kullanım stratejisinin oluşturulması (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Demir-çelik ve çimento sektörlerine özel geçiş stratejileri hazırlamak
- Bu sektörlerde fosil yakıt yerine yeşil hidrojen kullanımını planlamak
- Gerekli altyapı yatırımları için destek modelleri geliştirmek

Uygulama Dönemi: 2026–2053

6.5. Stratejik Hedef 5: İnsan Kaynağını Geliştirmek ve Bilgi Altyapısını Güçlendirmek

Güney Marmara'da hidrojen teknolojilerinin sürdürülebilir şekilde gelişimini sağlamak için nitelikli insan kaynağını yetiştirmek, yükseköğretim ve mesleki eğitim sistemlerini bu dönüşüme uyarlamak gerekmektedir. Hidrojen alanına özel yüksek lisans ve doktora programlarının açılması, müfredat ve sertifikasyon sistemlerinin geliştirilmesi, yapay zeka ve dijital teknolojilerin sektöre entegre edilmesi ve meslek kodlarının tanımlanması bu süreci desteklemektedir. Üniversiteler, kamu kurumları ve özel sektör arasında iş birliği kurarak araştırma ekosistemini güçlendirmek ve istihdamı artırmak, yerli kapasiteyi oluşturmak açısından büyük önem taşımaktadır. Bu hedef, hidrojen alanında bilgi birikimini artırmak ve sektöre nitelikli iş gücü sağlamak için stratejik bir temel teşkil etmektedir.

Eylem Alanı 5.1: Lisansüstü Burs ve Programların Açılması

Eylem 5.1.1 – Hidrojen teknolojilerine özel lisansüstü programların desteklenmesi (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bölge üniversitelerinde hidrojen enerjisi konusunda yüksek lisans ve doktora programları açmak
- Üniversitelerde hidrojen teknolojileri odaklı akademik kadroları desteklemek
- Yurt içi ve yurt dışı burs ve değişim programları oluşturmak
- Üniversiteler arası iş birliklerini geliştirmek

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 5.2: Dijitalleşme ve Yapay Zeka Entegrasyonu

Eylem 5.2.1 – Dijitalleşme ve yapay zeka entegrasyonunun sağlanması (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Hidrojen teknolojileriyle ilgili yapay zeka tabanlı izleme ve kontrol sistemleri geliştirmek
- Akıllı üretim ve enerji yönetim sistemlerinde dijital dönüşüm sağlamak
- Bu alanda bölge üniversiteleri, teknoparkları ve Ar-Ge merkezlerinde akademik ve sektörel Ar-Ge projelerini teşvik etmek
- Teknokent ve Ar-Ge merkezlerinde uygulamalı çalışmalar yapmak

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 5.3: Hidrojen İnsan Kaynağı Geliştirme Programı

Eylem 5.3.1 – Sertifikasyon, müfredat ve sürekli eğitim gibi insan kaynağı başlıklarının ortak bir programda yapılandırılması(Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Güney Marmara bölgesindeki meslek liseleri, meslek yüksekokulları ve üniversitelerde hidrojen sektörüne özgü mesleki eğitim müfredatları oluşturmak
- Sertifikalı eğitim programlarını yaygınlaştırmak
- Sürekli eğitim merkezlerinde hidrojen teknolojileri eğitimi vermek
- Üniversitelerle sanayi arasında bilgi aktarımını artırmak

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 5.4: Hidrojen Güvenliği Alanında Eğitim

Eylem 5.4.1 – Hidrojen güvenliği alanında eğitim, sertifikasyon ve farkındalık programlarının oluşturulması (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Hidrojen üretimi, depolama, taşımacılık ve kullanım süreçlerinde güvenlik standartlarını içeren mesleki eğitim ve sertifikasyon programları oluşturmak
- Üniversiteler, meslek yüksekokulları ve mesleki eğitim merkezlerinde “hidrojen güvenliği” modüllerini müfredata dahil etmek
- İtfaiye, OSB yönetimleri ve sanayi tesislerine yönelik hidrojen sızıntısı, yangın ve patlama senaryoları için uygulamalı eğitimler düzenlemek
- Hidrojen güvenliği konusunda ulusal ve uluslararası kurumlarla (ör. Hydrogen Safety Panel, ISO/IEC komiteleri) iş birliği kurarak bilgi transferi sağlamak

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 5.5: Hidrojen Meslek Kodları ve Eğitim Modülleri

Eylem 5.5.1 – Hidrojen mesleklerinin tanımlanması, yeterliliklerin ve modüler eğitim tasarımının oluşturulması (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- İlgili kurumların iş birliği ile hidrojen sektörü için meslek kodlarını tanımlamak
- Güney Marmara’daki eğitim kurumlarıyla iş birliği yaparak meslek standartları ve yeterlilik belgeleri hazırlamak
- Modüler ve uygulamalı eğitim programları tasarlamak
- İş gücü piyasasına geçişi kolaylaştırmak için staj ve istihdam desteklerini sunmak

Uygulama Dönemi: 2026–2028

6.6. Stratejik Hedef 6: Güney Marmarayı Hidrojen İhracatında Stratejik Bir Geçit Haline Getirmek

Güney Marmara’nın ihracat potansiyelini artırmak için hidrojenin türev ürünlere dönüştürülmesini sağlamak, bu ürünleri liman altyapısı üzerinden dış pazarlara ulaştırmak gerekmektedir. Amonyak, sentetik yakıt ve yeşil çelik gibi stratejik ürünlerin üretim altyapısını kurmak, bu alanlarda dijital izlenebilirlik sağlamak ve uluslararası sertifikasyon sistemlerine uyum sağlamak, bölgenin rekabet gücünü artırmaktadır. Savunma, havacılık ve uzay gibi stratejik alanlara hidrojen

teknolojilerini entegre etmek, Avrupa'daki hidrojen kümeleriyle iş birliği kurmak ve limanları ihracat merkezlerine dönüştürmek, bölgenin küresel hidrojen tedarik zincirinde önemli bir merkez haline gelmesine katkı sunmaktadır. Bu hedef, sadece üretimi değil, aynı zamanda uluslararası entegrasyonu da hedeflemektedir.

Eylem Alanı 6.1: Hidrojen Türevleri Üzerinden İhracat Modeli

Eylem 6.1.1 – Amonyak, yeşil çelik ve sentetik yakıt üretim altyapısının kurulması (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Amonyak, yeşil çelik ve sentetik yakıt üretimi için entegre tesisler planlamak
- Türev ürün üretiminde kullanılacak teknoloji ve yatırım fizibilitelerini gerçekleştirmek
- Yatırımcılar için teşvik mekanizmaları oluşturmak
- Dış ticaret hedeflerine yönelik ihracat stratejilerini hazırlamak

Uygulama Dönemi: 2030–2040

Eylem Alanı 6.2: Dijital Sertifikasyon ve İzlenebilirlik Altyapısı

Eylem 6.2.1 – Güney Marmara'da dijital sertifikasyon ve izlenebilirlik sistemlerinin bölgesel pilot uygulamalarının başlatılması (Uzun Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Güney Marmara'daki üretim tesislerinde AB uyumlu dijital sertifikasyon sistemlerinin pilot uygulamalarını gerçekleştirmek
- Blokzincir tabanlı izlenebilirlik platformlarını bölgedeki ihracat odaklı üretim noktalarına entegre etmek
- Sertifikalı üretim süreçlerinde dijital doğrulama sistemleri için yerel veri merkezleri ve kontrol mekanizmaları kurmak
- Bölgesel ihracat zincirinde şeffaflık ve izlenebilirliği sağlamak için yerel sanayi ile iş birliği içinde veri paylaşım altyapısını kurmak

Uygulama Dönemi: 2035–2053

Eylem Alanı 6.3: Güney Marmara Hydrogen Partnership Platformu

Eylem 6.3.1 – Avrupa'daki hidrojen kümeleriyle eşleştirme ve iş birliği geliştirme platformunun kurulması (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Güney Marmara Hydrogen Partnership Platformu'nu kurmak
- Avrupa'daki hidrojen kümeleriyle eşleşme ve ağ kurma faaliyetleri yürütmek
- Ortak Ar-Ge projeleri ve teknoloji transferi mekanizmaları geliştirmek
- Uluslararası yatırımcı ve firma katılımını teşvik etmek

Uygulama Dönemi: 2026–2028

6.7. Stratejik Hedef 7: Araştırma, Geliştirme ve İnovasyonu Teşvik Etmek

Hidrojen teknolojilerinin yerleştirilmesini sağlamak ve rekabet gücünü artırmak için Ar-Ge, test ve inovasyon süreçlerini desteklemek gerekmektedir. Üniversitelerde geliştirilen teknolojileri ticarileştirmek, patent başvurularını hızlandırmak ve girişimcilik ekosistemine entegre etmek önem arz etmektedir. Bu doğrultuda hidrojen ekipmanları için test ve sertifikasyon merkezlerinin kurulması, dijital ikiz ve IoT gibi ileri teknolojilerin entegre edilmesi, hem ürün hem süreç düzeyinde

yüksek katma değer yaratmaktadır. Ayrıca, dijital izlenebilirlik ve üretim süreçlerinin verimliliğinin artırılması da inovasyonun sürdürülebilirliğini sağlamaya katkı sunmaktadır.

Eylem Alanı 7.1: Ar-Ge Çıktılarını Ticarileştirme Programları

Eylem 7.1.1 – Güney Marmara’da hidrojen odaklı patent-to-market hızlandırıcı programların başlatılması (Kısa Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bölge üniversitelerde hidrojen temelli girişimcilik programları başlatmak
- Yerel teknoparklarda patent ön değerlendirme ve lisanslama destek birimleri kurmak
- GMKA koordinasyonunda yatırımcı-araştırmacı eşleştirme platformu kurmak
- Bölgedeki TTO’larla ortak mentorluk programları yürütmek

Uygulama Dönemi: 2026–2028

Eylem Alanı 7.2: Ar-Ge ve Teknoloji Destekleri

Eylem 7.2.1 – Güney Marmara Hidrojen Ar-Ge Destek Programı’nın hayata geçirilmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bölgeye özel çağrılarla yeşil hidrojen projelerine fon tahsisi
- Balıkesir ve Çanakkale’de pilot üretim tesisleri için öncelikli destekler
- Hidrojen üretimi, depolaması ve kullanımına yönelik TR22 özelinde kamu-özel fon eşleştirmesi
- Proje değerlendirmelerinde bölge sanayiinin ihtiyaçları esas alınarak kriterler geliştirilmesi

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem 7.2.2 – Yakıt pili teknolojilerinin yerleştirilmesine yönelik Ar-Ge destek programlarının uygulanması (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Yerli yakıt pili prototipleri geliştirmek
- Ar-Ge fonları ile özel sektör projelerini desteklemek
- Üniversite-sanayi iş birliğini artırmak

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 7.3: Ar-Ge Test Eğitim

Eylem 7.3.1 – TR22 Bölgesi’nde hidrojen test ve eğitim altyapısının geliştirilmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bölge OSB ve Üniversitesi’nde uygulamalı test laboratuvarı kurulması
- Merkezlerde halk eğitimi ve meslek liseleriyle saha uygulama kursları
- Üniversite-belediye iş birlikleriyle yeşil hidrojen üzerine yaz/kış okulları
- TSE ortaklığıyla bölgesel modüler eğitim paketleri geliştirmek

Uygulama Dönemi: 2030–2040

Eylem Alanı 7.4: H₂ Ekipman Test ve Sertifikasyon Merkezi

Eylem 7.4.1 – Güney Marmara’da H2 ekipmanları için bölgesel test ve sertifikasyon altyapısının kurulması (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- OSB içinde yakıt hücresi, valf vb. ekipmanlara özel test alanları kurmak
- Yerli üreticilere TR22 bölgesi içinden sertifikasyon desteği sağlamak
- Üniversitelerle birlikte akredite test merkezleri açmak
- Uluslararası standardizasyona uyum için dış ticaret ve akreditasyon çalışmaları

İlgili Kurum/Kuruluş: Üniversiteler, Özel Sektör, TSE

Uygulama Dönemi: 2030–2040

Eylem Alanı 7.5: Dijital İkiz + IoT Entegrasyonu

Eylem 7.5.1 – TR22 bölgesinde hidrojen süreçlerinde dijital ikiz ve IoT uygulamalarının geliştirilmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bölge OSB’lerinde dijital ikiz temelli hidrojen üretim izleme pilot çalışması kurmak
- TR22 sanayi tesisleri için IoT veri analizi ve uzaktan izleme modülleri geliştirmek
- Yerli yazılım firmalarıyla dijital platformlar oluşturmak
- Üniversitelerle gerçek zamanlı izleme algoritmaları üretmek

Uygulama Dönemi: 2030–2040

Eylem Alanı 7.6: Güney Marmarada Hidrojenin Stratejik Sektörlere Entegrasyonu

Eylem 7.6.1 – Hidrojen teknolojilerinin savunma, havacılık ve uzay sanayilerine entegre edilmesi (Orta Vadeli)

Yürütülecek Faaliyetler:

- Bölge OSB’lerinde hidrojenli insansız hava aracı prototipi geliştirme çalışmaları
- Üniversite–MSB koordinasyonu ile savunma sistemleri için enerji senaryoları geliştirmek
- Hava araçlarında hidrojen yakıtı testleri için bölgesel simülasyon merkezleri oluşturmak
- Kamu’nun yürüttüğü projelerde TR22 pilot sahalarının değerlendirilmesi

Uygulama Dönemi: 2026–2032

6.8. Stratejik Hedef 8: Hidrojenin Enerji Sistemleriyle Entegrasyonunu Sağlamak

Enerji arz güvenliğini artırmak, arz-talep dengesini yönetmek ve yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırmak için hidrojen sistemlerini elektrik üretimi, dağıtımı ve tüketimiyle bütünleştirmek gerekmektedir. GES ve RES projelerinde hidrojen üretimini teşvik etmek, kamu binalarında hidrojenli sistemleri yaygınlaştırmak ve batarya-hidrojen hibrit depolama çözümleri geliştirmek, enerji dönüşümünde esneklik kazanmak açısından kritik önem taşımaktadır. Avrupa’daki uygulamalardan faydalanarak bölgesel düzeyde pilot uygulamalar geliştirmek, bu entegrasyonun yaygınlaşmasını sağlamakta, böylece hem iklim hedeflerine katkı sağlamak hem de enerjide dışa bağımlılığı azaltmak mümkün olmaktadır.

Eylem Alanı 8.1: GES/RES Projelerinde Hidrojen Üretimini Teşvik Edilmesi ve Önceliklendirilmesi

**Eylem 8.1.1 – Hidrojen üretiminin teşvik edilmesi ve önceliklendirilmesi (Orta Vadeli)
Yürütülecek Faaliyetler:**

- Güney Marmara’da geliştirilecek büyük ölçekli GES ve RES projelerinde, elektrik üretiminin hidrojen üretiminde değerlendirilmesine yönelik rehberler hazırlamak
- Hidrojen üretimi ile entegre edilen yenilenebilir enerji projelerinin lisans, teşvik ve finansman başvurularında önceliklendirilmesini sağlamak
- Hidrojen üretimini içeren RES/GES projeleri için örnek proje modelleri ve fizibilite destek programları oluşturmak
- Elektrik-hidrojen entegrasyonuna yönelik bölgesel eğitimler ve kapasite geliştirme çalışmaları yürütmek

Uygulama Dönemi: 2026–2030

Eylem Alanı 8.2: Binalarda Hidrojenli Sistemler

**Eylem 8.2.1 – Binalarda hidrojenli sistemlerin yaygınlaştırılması (Uzun Vadeli)
Yürütülecek Faaliyetler:**

- Kamu konutları ve sosyal konutlarda hidrojenli kombi sistemlerini entegre etmek
- Yakıt hücresi tabanlı ısıtma sistemlerini binalarda kullanmak
- Toplu Konut projelerinde hidrojen altyapısını pilot uygulamalarla başlatmak
- Belediyelere teknik destek ve finansman modelleri sunmak

Uygulama Dönemi: 2028–2035

Eylem Alanı 8.3: H₂ + Batarya Hibrit Depolama Pilot uygulamaları

**Eylem 8.3.1 – H₂ + Batarya Hibrit Depolama Pilot uygulamalarının başlatılması (Orta Vadeli)
Yürütülecek Faaliyetler:**

- GES/RES kaynaklarından gelen enerji ile çalışan elektrolizör sistemleri kurmak
- Batarya sistemleri ile hidrojen depolama sistemlerini entegre etmek
- Pilot sahalarda hibrit enerji depolama performansını izlemek ve optimize etmek
- Yurtdışında gerçekleştirilen uygulamalardan uyarlanmış senaryolar geliştirmek

Uygulama Dönemi: 2030–2040

Yukarıda detayları verilen Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı, bölgede temiz hidrojen ekosisteminin aşamalı olarak geliştirilmesi amacıyla kısa, orta ve uzun vadeli eylemlerden oluşan kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır (Tablo 1). Bu plan, hidrojenin üretimi, depolanması, iletimi ve kullanımına ilişkin çok boyutlu stratejileri bir araya getirmektedir. Kısa vadede (2026-2030) planın temel amacı hidrojene geçiş için gerekli altyapının hazırlanması ve yönetimsel-tekniik temel taşlarının atılmasıdır. Orta vadede (2030'lar) bu temeller üzerinde bölgesel hidrojen ekonomisinin genişletilmesi ve entegre edilmesi, uzun vadede (2030-2053) ise tam olgunluğa erişmiş, sürdürülebilir ve uluslararası entegre bir hidrojen ekosistemine ulaşılması hedeflenmektedir.

Tablo 13. Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı Kısa, Orta Ve Uzun Vadeli Eylemler

Kısa Vadeli Eylemler		Orta Vadeli Eylemler		Uzun Vadeli Eylemler	
Eylem Adı	Uygulama Dönemi	Eylem Adı	Uygulama Dönemi	Eylem Adı	Uygulama Dönemi
1.1.1 – Şebeke fizibilitesinin yapılması	2026-2028	1.1.2 – Hidrojen vadisi/köyü oluşturulması	2026-2030	1.2.3 – Depolama teknolojilerinin geliştirilmesi	-2053
1.1.2 – Hidrojen vadisi/köyü oluşturulması	2026-2030	1.2.2 – Liman sahalarının genişletilmesi	2030-2035	1.7.1 – Yerli PEM üretimi ile elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesi	2035-2053
1.2.1 – Üretim, depolama ve taşıma yollarının iyileştirilmesi	2026-2035	1.3.1 – Off-take mekanizmalarının oluşturulması ve yaygınlaştırılması	2026-2030	1.8.1 – “Güney Marmara H ₂ Endüstri Bölgesi” oluşturulması	2035-2053
1.3.1 – Off-take mekanizmalarının oluşturulması ve yaygınlaştırılması	2026-2030	1.4.1 – OSB’lerde temiz hidrojen üretim altyapısının kurulması	2026-2030	2.1.1 – Hidrojen dolum altyapılarının kurulması	2030-2053
3.1.1 – Mevzuat ve fon oluşturulmasına bölgesel katkı sağlanması	2026-2030	1.5.1 – Doğalgazın termal pirolizi yöntemiyle turkuaz hidrojen üretiminin geliştirilmesi	2026-2030	2.1.2 – Boru hattı sistemi fizibilitesinin ve yatırımlarının gerçekleştirilmesi	2035-2050
3.2.1 – Bölgesel uygulamalardan edinilen deneyimle mevzuat iyileştirmelerine katkı sunulması	2026-2028	1.6.1 – Fizibilite, dönüşüm planı, cihaz uyumluluğu gibi çalışmaların entegrasyon programına dönüştürülmesi	2026-2032	2.1.3 – Liman-boru hattı entegrasyonunun sağlanması	2035-2050
3.4.1 – Sertifikasyon sisteminin bölgesel pilot uygulamalarıyla test edilmesi	2026-2028	2.3.1 – Büyük hacimli hidrojen depolamaya yönelik fizibilite ve pilot çalışmaların yapılması	2026-2035	2.1.4 – Güney Marmara’da doğal gaz-mix hatlarının planlanması ve pilot entegrasyonlarının yapılması	2030-2040
3.6.1 – Bölge odaklı yatırımcı eşleştirme platformu ve fon modelinin önerilmesi	2026-2030	3.3.1 – Bölgesel bilgi paylaşımı yoluyla piyasa düzenleyici yapıya katkı sağlanması	2028-2035	2.2.1 – Katı formda hidrojen üretim, depolama ve taşımaya yönelik Ar-Ge ve pilot uygulama programının başlatılması	2026-2050
4.2.1 – Pilot tesis kurulması ve ulaşım uygulamalarının gerçekleştirilmesi	2026-2053	3.5.1 – Bölgesel üreticiler için uyumlu sertifikasyon ve ticaret uygulamalarının geliştirilmesi	2026-2035	4.1.2 – Değer zinciri kurulumu	2026-2053
4.2.2 – Belediye otobüsleri ve toplu taşıma için pilot dolun istasyonları kurulması	2026-2030	4.1.1 – Yatırım teşviklerinin geliştirilmesi	2026-2035	4.2.4 – Karbon yoğun sektörlerde yeşil hidrojen kullanım stratejisinin oluşturulması	2026-2053
5.1.1 – Hidrojen teknolojilerine özel lisansüstü programların desteklenmesi	2026-2030	4.2.3 – Sanayide yeşil hidrojen kullanımına yönelik pilot uygulamaların başlatılması	2026-2030	6.2.1 – Güney Marmara’da dijital sertifikasyon ve izlenebilirlik sistemlerinin bölgesel pilot uygulamalarının başlatılması	2035-2053
5.2.1 – Dijitalleşme ve yapay zeka entegrasyonunun sağlanması	2026-2030	5.4.1 – Hidrojen güvenliği alanında eğitim, sertifikasyon ve farkındalık programlarının oluşturulması	2026-2030	8.2.1 – Binalarda hidrojenli sistemlerin yaygınlaştırılması	2028-2035
5.3.1 – Sertifikasyon, müfredat ve sürekli eğitim gibi insan kaynağı başlıklarının ortak bir programda yapılandırılması	2026-2030	6.1.1 – Amonyak, yeşil çelik ve sentetik yakıt üretim altyapısının kurulması	2030-2040		
5.5.1 – Hidrojen mesleklerinin	2026-2028	7.2.1 – Güney Marmara Hidrojen Ar-Ge Destek	2026-2030		

tanımlanması, yeterliliklerin ve modüler eğitim tasarımlarının oluşturulması		Programı'nın hayata geçirilmesi		
6.3.1 – Avrupa'daki hidrojen kümeleriyle eşleştirme ve iş birliği geliştirme platformunun kurulması	2026-2028	7.2.2 – Yakıt pili teknolojilerinin yerleştirilmesine yönelik Ar-Ge destek programlarının uygulanması	2026-2030	
7.1.1 – Güney Marmara'da hidrojen odaklı patent-to-market hızlandırıcı programların başlatılması	2026-2028	7.3.1 – TR22 Bölgesi'nde hidrojen test ve eğitim altyapısının geliştirilmesi	2030-2040	
		7.4.1 – Güney Marmara'da H ₂ ekipmanları için bölgesel test ve sertifikasyon altyapısının kurulması	2030-2040	
		7.5.1 – TR22 bölgesinde hidrojen süreçlerinde dijital ikiz ve IoT uygulamalarının geliştirilmesi	2030-2040	
		7.6.1 – Hidrojen teknolojilerinin savunma, havacılık ve uzay sanayilerine entegre edilmesi	2026-2032	
		8.1.1 – Hidrojen üretiminin teşvik edilmesi ve önceliklendirilmesi	2026-2030	
		8.3.1 – H ₂ + Batarya Hibrit Depolama Pilot uygulamalarının başlatılması	2030-2040	

Kısa vadeli eylemler, bölgesel temiz hidrojen dönüşümü için gerekli fizibilite çalışmalarının, pilot projelerin ve kurumsal mekanizmaların oluşturulmasına odaklanmaktadır. 2026 yılı itibariyle bölgedeki hidrojen üretim ve tüketim kapasitesinin belirlenmesi, elektrik şebekesi ile olası hidrojen boru hattı bağlantılarının fizibilitelerinin tamamlanması planlanmaktadır. Aynı dönemde kritik bir adım olarak bir "hidrojen vadisi/köyü" pilot çalışmasının hayata geçirilmesi öngörülmektedir. Kısa vadeli diğer eylemler arasında, hidrojen üretim, depolama ve taşıma yöntemlerinin iyileştirilmesi ve yeşil hidrojen için off-take (satın alma garantisi) mekanizmalarının oluşturulması yer almaktadır. Ayrıca, hidrojen alanında kurumsal kapasiteyi geliştirmek amacıyla Hidrojen Enerjisi Endüstrisi Başkanlığı gibi yeni bir yapının ihdası, ilgili mevzuat düzenlemeleri ve sertifikasyon sisteminin başlatılması yine kısa vadede planlanmıştır. Bu adımlarla 2030'a kadar bölgede hidrojene geçiş için sağlam bir temel oluşturulması beklenmektedir. Orta vadeli eylemler, kısa vadede atılan adımların üzerine inşa edilerek hidrojen altyapısının yaygınlaştırılmasını ve pilot uygulamalardan tam ölçekli uygulamalara geçişi sağlamayı hedeflemektedir. 2026-2035 arasında OSB'lerde (Organize Sanayi Bölgelerinde) hidrojen üretim tesisleri kurulması, doğal gaz şebekesinin hidrojen karışımına uygun hale getirilmesi ve katı formda hidrojen depolamaya yönelik Ar-Ge projeleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu dönemde ayrıca turkuaz hidrojen üretiminin (düşük karbonlu hidrojen) geliştirilmesi hedeflenmektedir. Orta vadede hidrojen piyasasının kademeli olarak oluşması için de kritik adımlar atılması planlanmıştır. 2030'ların ikinci yarısına doğru sınırlı da olsa hidrojen ticareti ve ihracatının başlaması öngörülmüş, bu amaçla boru hattı yatırımları ile liman altyapılarının dönüştürülmesine yönelik hazırlıklar yapılması planlanmıştır. Yenilenebilir enerji projelerine hidrojen entegrasyonu şartı getirilmesiyle (rüzgâr ve güneş santrallerinin bir kısmına elektrolizör kurulması) bölgenin yeşil hidrojen üretim kapasitesinin artacağı düşünülmektedir. Ayrıca yakıt pili teknolojileri için Ar-Ge destek programları başlatılması, sanayide yeşil hidrojen kullanımına yönelik teşvikler devreye alınması ve ulaşımdan binalara çeşitli alanlarda hidrojen pilot uygulamaları yaygınlaşması planlanmıştır. Orta vadedeki bu adımların Güney Marmara'yı 2030'ların sonunda ulusal ve uluslararası hidrojen değer zincirine entegre etmesi beklenmektedir.

Uzun vadeli eylemler, 2035 sonrasında 2053'e uzanan süreçte, bölgenin tam entegre bir temiz hidrojen merkezine dönüşmesini hedeflemektedir. Güney Marmaranın yenilenebilir enerji potansiyeli ve stratejik konumu azami ölçüde değerlendirilerek, çok yüksek ölçekli hidrojen üretim kapasitelerine ulaşılması öngörülmektedir. Bu dönemde, entegre elektrolizör ve yakıt pili teknolojilerinin geliştirilmesi, bölgede bir "Güney Marmara Hidrojen Endüstri Bölgesi" kurularak hidrojen odaklı sanayilerin büyük ölçekte bir araya getirilmesi planlanmaktadır. Avrupa'ya ihracatı sağlayacak liman ve boru hattı entegrasyonlarının tamamlanması, Bozcaada gibi pilot alanlarda doğal gaz şebekesine hidrojen enjeksiyonu uygulamalarının gerçekleştirilmesi de öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Piyasa altyapısının olgunlaşmasıyla birlikte üretim, depolama, taşımacılık ve tüketim zincirinde dijital izleme, izlenebilirlik ve sertifikasyon sistemlerinin bütünleşik şekilde çalışması sağlanacaktır. Böylece, Türkiye'nin 2053 yılı için benimsediği karbon-nötr hedefe bölgesel düzeyde güçlü bir katkı sağlanırken, Güney Marmara Bölgesi temiz hidrojen üretimi, teknolojik yetkinlik ve ihracat kapasitesi açısından uluslararası ölçekte rekabetçi bir merkez haline gelecektir.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Sektörel Düşük Karbonlu Hidrojen Talebi (Mevcut Eğilim: 2035, Net Sıfır: 2050).....	7
Şekil 2. Düşük Karbonlu Hidrojen Üretimi Türlerine Göre Dağılım (Mevcut Eğilim: 2035, Net Sıfır: 2050)	7
Şekil 3. AB ve Asya'da Hidrojen ve Türevi Yakıt Talebi	8
Şekil 4. Net Sıfır Senaryosunda Elektrik Üretimi Kaynaklarına Göre Dağılım (2050).....	8
Şekil 5. Kurulu Güneş Ve Rüzgâr Enerjisi Kapasitesi Dağılımı (Mevcut Eğilim: 2035, Net Sıfır: 2050)	9
Şekil 6. Çalışmada İzlenen Metodoloji	40
Şekil 7. Güney Marmara Bölgesi Güçlü Yanlar, Alt Kategoriler Ve Kriterleri.....	41
Şekil 8. Güney Marmara Bölgesi Zayıf Yanlar, Alt Kategoriler Ve Kriterleri	42
Şekil 9. Güney Marmara Bölgesi Fırsatlar, Alt Kategoriler Ve Kriterleri	43
Şekil 10. Güney Marmara Bölgesi Tehditler, Alt Kategoriler Ve Kriterleri	44
Şekil 11. Panel Çalışmasına Göre Alt Kategorilerin Normalize Edilmiş Çarpan Değerleri.....	48
Şekil 12. Anket Sonuçlarına Göre Alt Kategorilerin Normalize Edilmiş Çarpan Değerleri.....	48
Şekil 13. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Güçlü Yönler	50
Şekil 14. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Zayıf Yönler	51
Şekil 15. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Fırsatlar	52
Şekil 16. Panel Sonuçlarından Normalize Edilmiş Tehditler	53
Şekil 17. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Güçlü Yönler.....	55
Şekil 18. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Zayıf Yönler	56
Şekil 19. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Fırsatlar.....	57
Şekil 20. Anket Sonuçlarından Normalize Edilmiş Tehditler.....	58
Şekil 21. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Güçlü Yönlerin Değerlendirilmesi.....	59
Şekil 22. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Zayıf Yönlerin Değerlendirilmesi	60
Şekil 23. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Fırsatların Değerlendirilmesi.....	60
Şekil 24. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Tehditlerin Değerlendirilmesi.....	61
Şekil 25. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Edilmiş Güçlü Yönler Ve Fırsat Stratejileri	68
Şekil 26. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Güçlü Yönler Ve Tehdit Stratejileri.....	69
Şekil 27. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Zayıf Yönler Ve Fırsat Stratejileri	70
Şekil 28. Farklı Modelleme Yaklaşımlarına Göre Normalize Zayıf Yönler Ve Tehdit Stratejileri	71
Şekil 29. Panel Sonuçlarından Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Önem Sıralaması.....	72
Şekil 30. Anket Sonuçlarından Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Önem Sıralaması	74
Şekil 31. Güçlü Yanlar Ve Fırsatlardan Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması.....	76
Şekil 32. Güçlü Yanlar Ve Tehditlerden Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel Ve Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması.....	77
Şekil 33. Zayıf Yanlar Ve Fırsatlardan Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel Ve Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması.....	78
Şekil 34. Zayıf Yanlar Ve Tehditlerden Elde Edilen Stratejik Hedeflerin Panel Ve Anket Sonuçlarına Göre Sıralaması Ve Karşılaştırması.....	79
Şekil 35. Çanakkale Ve Balıkesir'in Coğrafi Konumu Ve Stratejik Noktalar	82
Şekil 36. Kısa Vadeli Dönem İçin Mekansal Gelişim Planı	88
Şekil 37. Orta Vadeli Dönem İçin Mekansal Gelişim Planı.....	89
Şekil 38. Uzun Vadeli Dönem Ve Sonrası İçin Mekansal Gelişim Planı	90
Şekil 39. Yıllara Göre Küresel Hidrojen Talebi Ve Düşük, Orta, Yüksek Duruma Göre Hidrojen Talep Projeksiyonları, Veri Kaynağı: [103]-[105].....	94
Şekil 40. Düşük, Orta Ve Yüksek Senaryolarda Oluşabilecek Yıllık Global Hidrojen İhtiyacı	94
Şekil 41. Hidrojen Kullanım Alanlarının Yıllara Göre Dağılımındaki Değişim, Veri Kaynağı: [103] Ve [105]	95
Şekil 42. Düşük, Orta Ve Yüksek Senaryolarda Oluşabilecek Yıllık Avrupa Bazında Hidrojen İhtiyacı	96

Şekil 43. Yıllara Bağlı Olarak Farklı Sektörler için Balıkesir İli Doğalgaz Tüketim İstatistikleri	97
Şekil 44. Balıkesir İlindeki Farklı Sektörler için Enerji Tüketim İstatistikleri	98
Şekil 45. Çanakkale İli için Doğalgaz Tüketimi İstatistikleri.....	99
Şekil 46. Çanakkale İli için Farklı Sektörlerde Enerji Tüketim İstatistikleri.....	100
Şekil 47. Balıkesir İli İçin Hidrojen Projeksiyonları.....	101
Şekil 48. Çanakkale İli İçin Hidrojen Projeksiyonları	102
Şekil 49. Balıkesir Ve Çanakkale İl Sınırları İçerisinde Yer Alan Doğalgaz Boru Hatları. Veri Kaynağı: [113]	107
Şekil 50. Balıkesir ve Çanakkale'nin Stratejik Konumu, Görsel Kaynağı: [115]	112
Şekil 51. Balıkesir Hidrojen Üretim Potansiyeli (Kt/Yıl), Veri Kaynağı: [118]	113
Şekil 52. Çanakkale Hidrojen Üretim Potansiyeli (Kt/Yıl), Veri Kaynağı: [96].....	114
Şekil 53. Türkiye Hidrojen İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119].....	115
Şekil 54. Türkiye Hidrojen İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119].....	116
Şekil 55. Türkiye'nin Hidrojen İthalatındaki Avrupa Ülkelerinin Payı (2020-2024), Veri Kaynağı: [119]	117
Şekil 56. Farklı Senaryolarda Hidrojen Maliyetinin Değişimi, Veri Kaynağı: [123].....	118
Şekil 57. Farklı Senaryolarda Yeşil Hidrojen Talebinin Değişimi, Veri Kaynağı: [124].....	118
Şekil 58. Türkiye Amonyak İthalat Ve İhracat Değerleri [119].....	120
Şekil 59. Türkiye Amonyak İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119].....	120
Şekil 60. Türkiye' nin Amonyak İthalatındaki Ülkelerin Payı (2020-2024), Veri Kaynağı: [119].....	121
Şekil 61. 2050 Yılına Kadar Tahmin Edilen Amonyak Talebi, Veri Kaynağı: [132].....	122
Şekil 62. Türkiye Metanol İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119].....	123
Şekil 63. Türkiye Metanol İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri kaynağı: [119].....	123
Şekil 64. Türkiye'nin Metanol İthalatındaki Ülkelerin Payı.....	124
Şekil 65. Türkiye Toluen İthalat Ve İhracat Değerleri [119]	125
Şekil 66. Türkiye Toluen İthalat Ve İhracat Değerleri, Veri Kaynağı: [119]	125
Şekil 67. Hidrojen Pazarına İhracat Senaryolarında Elde Edilebilecek Yıllık Gelirler, Veri Kaynağı: [119].....	127
Şekil 68. Sektörlere Göre Türkiye'de Yıllık Doğalgaz Tüketim Miktarları, Veri Kaynağı: [136]	127
Şekil 69. Doğalgaz Karışım Yüzdelerine Göre Türkiye'de Oluşabilecek Hidrojen Talebi	128
Şekil 70. Avrupa Ülkelerinin Yıllık Hidrojen Tüketim Miktarları, Veri Kaynağı: [137].....	129
Şekil 71. Avrupa'da Sektör Bazında Hidrojen Tüketim Miktarları, Veri Kaynağı: [137].....	130
Şekil 72. Avrupa'da Sektör Bazında Hidrojen Tüketim Yüzdeleri, Veri Kaynağı: [137].....	130
Şekil 73. Yıllara Göre Küresel Hidrojen Talebi Ve Talep Projeksiyonları, Veri Kaynağı: [104] Ve [138].....	131
Şekil 74. Türkiye Elektrik Üretimi, Veri Kaynağı: [139] Ve [140].....	132
Şekil 75. Elektrik Enerjisi Kaynaklarının Toplam Kurulu Güç İçerisindeki Oranları, Veri Kaynağı: [139]	133
Şekil 76. Türkiye' deki Trafiğe Kayıtlı Elektrikli Araç Sayısı, Veri kaynağı: [141].....	133
Şekil 77. Türkiye' nin Hidrojen Ekonomisi Yol Haritası, Görsel Kaynağı: [144].....	137

TABLORAR LİSTESİ

Tablo 1. Ülke Bazlı Uygulamaların Mukayeseli Analizi.....	22
Tablo 2. GZFT Kategorileri, Alt Kategorileri Ve Tanımlanan Kriterler	45
Tablo 3. GZFT Analizi Sonucunda Belirlenmiş Olan Stratejik Hedefler	63
Tablo 4. Güçlü Yönler ve Fırsatlar İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler	64
Tablo 5. Güçlü Yönler ve Tehditler İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler	65
Tablo 6. Zayıf Yönler ve Fırsatlar İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler.....	66
Tablo 7. Zayıf Yönler ve Tehditler İçin Üretilmiş Stratejik Hedefler ve Öncü Kriterler.....	67
Tablo 8. Güney Marmara Bölgesi için Belirlenen Hidrojen Kullanım Senaryoları	93
Tablo 9. İşletmede Olan Hidrojen Karışım Projeleri, Veri Kaynağı: [107]	103
Tablo 10. Hidrojenin Doğalgaz İle Karıştırılması Veya Saf Olarak Taşınması Durumunda Kontrol Edilmesi Gereken Kriterler. Veri Kaynağı: [108].....	104
Tablo 11. Son 5 Yılda Türkiye Pazarındaki Hidrojen Ve Türevlerinin Miktarı [119].....	126
Tablo 12. Güney Marmara Bölgesi Özelinde Yeni Teşvik Mekanizmaları Ve Destek Önerileri.....	176
Tablo 13. Güney Marmara Temiz Hidrojen Eylem Planı Kısa, Orta Ve Uzun Vadeli Eylemler.....	207

Kaynakça

- [1] International Energy Agency (IEA), "Global Hydrogen Review 2024."
- [2] Hydrogen Council, "Hydrogen Insights 2024."
- [3] Le, P.-A. vd., "The current status of hydrogen energy: an overview," RSC Advances, 13, 28262–28287 (2023).
- [4] PwC, "Türkiye's promising steps at the verge of crossroads for establishing the green hydrogen economy," 2022.
- [5] U.S. Department of the Treasury & U.S. Department of Energy, "45V Tax Credit and Clean Hydrogen Production Standard Guidance," 2025.
- [6] SHURA Energy Transition Center, "Priority Areas for a National Hydrogen Strategy for Turkey," 2021.
- [7] Bampaou, M. ve Panopoulos, K.D., "An overview of hydrogen valleys: Current status, challenges and their role in increased renewable energy penetration," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 207, 2025.
- [8] BP Energy Outlook 2024.
- [9] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, "Türkiye Hydrogen Technologies Strategy and Roadmap," 2023.
- [10] Yılmaz, G. vd., "Hydrogen energy development in Turkey: Challenges and opportunities," International Journal of Hydrogen Energy, 52 (2024).
- [11] Duman, M.V., "Green Hydrogen Valleys: South Marmara Hydrogen Shore, a Model for Türkiye in Hydrogen Economy," 2022.
- [12] TR22 Bölgesi Yenilenebilir Enerji Sektörü Analizi & Ar-Ge ve Yenilik Stratejisi, Güney Marmara Kalkınma Ajansı, 2021.
- [13] Güney Marmara Kalkınma Ajansı (GMKA), "2024 Yılı Çalışma Programı"
- [14] European Green Deal (2019): COM(2019) 640 final, Avrupa Komisyonu.
- [15] EGD Brochure (2021): "Delivering the European Green Deal," European Commission.
- [16] What is the European Green Deal? (2019), AB Yayını.
- [17] Fit for 55 Factsheet (2023): "The European Green Deal – Delivering the EU's 2030 Climate Targets," Avrupa Komisyonu.
- [18] Hydrogen Factsheet (2021): "The Role of Hydrogen in Meeting Our 2030 Climate and Energy Targets," Avrupa Komisyonu.
- [19] 3billion_trees_factsheet (2021): "3 Billion Trees by 2030," Avrupa Komisyonu.
- [20] FS_RePower_EU_Actions_EN.pdf (REPowerEU Actions), Avrupa Komisyonu, Mayıs 2022.
- [21] EUR-Lex - 52022SC0230 - EN (COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT, REPowerEU Plan), Avrupa Komisyonu.
- [22] EU action to address the energy crisis, Avrupa Komisyonu.
- [23] FS_Financing_REPowerEU.pdf (Financing REPowerEU), Avrupa Komisyonu, Mayıs 2022.
- [24] Questions and Answers on the REPowerEU Communication (18 May 2022), Avrupa Komisyonu.
- [25] Hydrogen Roadmap Europe (2019): FCH 2 JU ve Hydrogen Europe. "A Sustainable Pathway for the European Energy Transition."
- [26] Türkiye İçin Hidrojen Teknolojileri Yol Haritası (2021). Hidrojen Teknolojileri Derneği.
- [27] Türkiye Yeşil Mutabakat Eylem Planı (2021). T.C. Ticaret Bakanlığı.
- [28] Germany Hydrogen Action Plan (2021). National Hydrogen Council, Germany.
- [29] National Hydrogen Strategy - Germany (2020). Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK).
- [30] UK Hydrogen Strategy (2021). Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS), UK.

- [31] UK Hydrogen Strategy Update to the Market (2024). Department for Energy Security and Net Zero, UK.
- [32] Hydrogen Roadmap Netherlands (2020). Government of the Netherlands.
- [33] The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells - Japan (2019). Ministry of Economy, Trade and Industry (METI).
- [34] U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap (2023). U.S. Department of Energy (DOE).
- [35] Hydrogen Strategy for Canada (2020). Natural Resources Canada (NRCan).
- [36] Commission sets out rules for renewable hydrogen (13 February 2023 Press release)
- [37] Renewable hydrogen production: new rules formally adopted
- [38] COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2023/1184 of 10 February 2023
- [39] COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2023/1185 of 10 February 2023
- [40] Clean_Hydrogen_Monitor_11-2023_DIGITAL.pdf (CLEAN HYDROGEN MONITOR 2023)
- [41] Current Hydrogen Regulation on the Continents (Part I) - The Cambridge Handbook of Hydrogen and the Law
- [42] CertifHy – EU Green Hydrogen Certificates
- [43] ROADMAP ON HYDROGEN STANDARDISATION (European Clean Hydrogen Alliance)
- [44] The Norwegian Government’s hydrogen strategy - Towards a low emission society
- [45] U.S. Department of the Treasury Releases Final Rules for Clean Hydrogen Production Tax Credit
- [46] Clean Hydrogen Production Standard Guidance - Hydrogen Program (U.S. Department of Energy)
- [47] Regulatory Framework for Hydrogen in the U.S. – Clean Air Task Force
- [48] Regulations, Codes & Standards (RCS) - Hydrogen Knowledge Centre
- [49] Canadian Hydrogen Codes and Standards Roadmap - Natural Resources Canada
- [50] Commonwealth Hydrogen Regulation – DCCEEW
- [51] ISO/TS 19870:2023 - Hydrogen technologies — Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the production, conditioning and transport of hydrogen
- [52] The Global Standard for Green Hydrogen and Green Hydrogen Derivatives 2.0 December 2023
- [53] International Energy Agency, Global Hydrogen Review 2024
- [54] European Commission, “Boosting hydrogen through a European Hydrogen Bank”, March 2023.
- [55] European Commission, “Communication From the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the European Hydrogen Bank”, 16.03.2023.
- [56] European Commission, “Commission outlines European Hydrogen Bank to boost renewable hydrogen”, 16.03.2023.
- [57] European Commission - Press release, “Commission earmarks €4.6 billion to boost net-zero technologies, electric vehicle battery cell manufacturing and renewable hydrogen under the Innovation Fund”, 03.12.2024.
- [58] European Commission, “European Hydrogen Bank”, https://energy.ec.europa.eu/topics/eus-energy-system/hydrogen/european-hydrogen-bank_en.
- [59] European Commission - Press release, “Joint press release by the Commission, Spain, Lithuania and Austria on the European Hydrogen Bank’s ‘Auctions-as-a-Service’ scheme, increasing the funding for clean investments”, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_5862
- [60] European Commission - Press release, “Commission kick-starts work on a new pilot mechanism to boost the hydrogen market”, 03.06.2024.

- [61] International Renewable Energy Agency, “Carbon contracts for difference”, <https://www.irena.org/Innovation-landscape-for-smart-electrification/Power-to-hydrogen/16-Carbon-contracts-for-difference>
- [62] Klimaschutzvertraege, “FAQ – carbon contracts for difference”, https://www.klimaschutzvertraege.info/lw_resource/datapool/systemfiles/agent/ewbpublications/f7531bfd-eb98-11ee-8b39-a0369fe1b6c9/live/document/2403_EN_BMWK-FAQ_Klimaschutzvertraege.pdf, 12.03.2024.
- [63] ERCTS –European Roundtable on Climate Change and Sustainable Transition, “Reflection note on Carbon Contracts for Difference (CCfD)”, 2022.
- [64] FI Group Deutschland GMBH, “Carbon Contracts for Difference (CCfD)”, 03.04.2024
- [65] International Energy Agency, “Carbon Contracts for Difference (CCfD) program for energy-intensive industries”, 11.05.2023.
- [66] Deloitte, “Carbon Contracts for Difference (CCfDs) as an instrument of choice”, <https://www.deloitte.com/be/en/issues/working-together-towards-a-sustainable-future/carbon-contracts-for-difference-as-an-instrument-of-choice.html>
- [67] Climate Friendly Materials Platform, “Carbon Contracts for Differences: their role in European industrial decarbonization”, September 2020.
- [68] UK Department for Energy Security and Net Zero, “Contracts for Difference”, 03.09.2024, <https://www.gov.uk/government/collections/contracts-for-difference>
- [69] Canada - Department of Finance, “Deputy Prime Minister welcomes the Canada Growth Fund’s first carbon contract for difference”, 20.12.2023, <https://www.canada.ca/en/department-finance/news/2024/06/deputy-prime-minister-welcomes-the-canada-growth-funds-carbon-contract-for-difference-to-generate-more-clean-energy-in-markham.html>
- [70] The Greens/EFA in the European Parliament – Climate Strategies, “Carbon Contracts for Differences (CCfDs) in a European context”, June 2022.
- [71] US Congress, “Inflation REduction Act of 2022”, 16.08.2022, <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376>
- [72] Internal Revenue Service, “Inflation Reduction Act of 2022”, <https://www.irs.gov/inflation-reduction-act-of-2022>
- [73] US Senate Democrats, “Summary: Inflation Reduction Act of 2022”, https://www.democrats.senate.gov/imo/media/doc/inflation_reduction_act_one_page_summary.pdf
- [74] US Environmental Protection Agency (EPA), “Summary of Inflation Reduction Act provisions related to renewable energy”, 28.01.2025, <https://www.epa.gov/green-power-markets/summary-inflation-reduction-act-provisions-related-renewable-energy>
- [75] CEPS in-Depth-Analysis, “Exploring Cost-Effective Support Mechanisms For Hydrogen Mobility Infrastructure”, December 2022.
- [76] Republic of Türkiye – Ministry of Energy and Natural Resources, “Türkiye Hydrogen Technologies Strategy and Roadmap”, 07.03.2024.
- [77] FORRS, “Support Schemes and Subsidies for Green Hydrogen”, 03.07.2024.
- [78] International Energy Agency, “Hydrogen”, <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- [79] Hydrogen Europe, “Hydrogen Bank and more funding mechanisms to support Europe’s clean tech future”, 26.02.2025, <https://hydrogeneurope.eu/hydrogen-bank-and-more-funding-mechanisms-will-support-europes-clean-tech-future/>
- [80] UK Department for Energy Security & Net Zero, “Funding mechanism for the Hydrogen Production Business Model: Consultation on the proposed Gas Shipper Obligation”, January 2025.
- [81] Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action – Germany, “Support Mechanisms for International Hydrogen Projects by The German Government”, October 2022.

- [82] P. Mastropietro, P. Rodilla, "Support mechanisms for low-carbon hydrogen: The risks of segmenting a commodity market", Energy Policy, Volume 202, July 2025, 114605.
- [83] TR-22 Güney Marmara Bölgesi 2024-2028 Bölge Planı
- [84] TR22 Bölgesi Yenilenebilir Enerji Sektörü Analizi & Ar-Ge ve Yenilikçilik Stratejisi
- [85] TR22 Bölgesi Deniz Üstü Rüzgar Santrali ve Limanı Ön Fizibilite Raporu
- [86] TR22-Güney-Marmara-Bölgesi-Yenilenebilir-Enerji-Arastırması Sonuç Raporu
- [87] Balıkesir Enerji Sektörü Yatırım Rehberi
- [88] Balıkesir İli Biyogaz Tesisi Ön Fizibilite Raporu (2022)
- [89] Çanakkale Enerji Sektörü Yatırım Rehberi
- [90] Çanakkale İli Çan Termik Santrali Kojenerasyonla Bölgesel Isıtma Sistemi Ön Fizibilite Raporu (2022)
- [91] TR22 Güney Marmara Bölgesi Akıllı Şehirler Raporu
- [92] GMKA. 2021. "TR22 Bölgesi Yenilenebilir Enerji Sektörü Analizi & Ar-Ge ve Yenilik Stratejisi". Güney Marmara Kalkınma Ajansı.
- [93] GMKA. 2022. "Balıkesir İli Rüzgar Türbini-Generatör ve Nacelle Üretim Tesisi Ön Fizibilite Raporu". Güney Marmara Kalkınma Ajansı.
- [94] GMKA. 2023. "2024-2028 Stratejik Plan". Güney Marmara Kalkınma Ajansı.
- [95] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli, <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/> (Erişim tarihi: 01/08/2025)).
- [96] Dincer, I., Javani N., Karayel G.K., 2021, Türkiye için Hidrojen Çiftliği Konsept Raporu, Hidrojen Teknolojileri Derneği, İstanbul. https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Ciftligi_Konsepti_Raporu.pdf
- [97] Maden Tetik ve Arama Genel Müdürlüğü, 15 Haziran'da alındı, 2021, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/TurkiyeTopografyaHarita.jpg>
- [98] Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 15 Haziran'da alındı, 2021, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>
- [99] Zimmermann, H.-J. 2011. "Fuzzy set theory—and its applications". Springer Science & Business Media.
- [100] BM. 2023. "Population, total". Geliş tarihi 20 Haziran 2025, gönderen <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
- [101] BM. 2024. "Databank - Population estimates and projections". Geliş tarihi 20 Haziran 2025, gönderen <https://databank.worldbank.org/source/population-estimates-and-projections>
- [102] IEA. 2024b. "World Energy Outlook 2024". International Energy Agency. Geliş tarihi gönderen <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>
- [103] IEA. 2024a. "Global Hydrogen Review 2023". Geliş tarihi gönderen <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [104] IEA. 2020. "Global Demand for Pure Hydrogen". Geliş tarihi 16 Haziran 2025, gönderen <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>
- [105] Hydrogen Council. 2021. "Hydrogen for Net-Zero". Hydrogen Council, McKinsey and Company.
- [106] EC. 2022. "Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and social committee and the committee of the regions REPowerEU plan". European Commission: Brussels, Belgium.
- [107] IEA. t.y. "Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database". Geliş tarihi 19 Haziran 2025, gönderen <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>
- [108] Dincer, I., Javani, N., Sorgulu, F., Öztürk, M. 2021. "Türkiye'de Yeşil Hidrojenin Üretilip Doğal Gazla Karıştırılması Çalışmaları". Hidrojen Teknolojileri Derneği.

- [109] Sorgulu, F., Ozturk, M., Javani, N., Dincer, I. 2023. "Experimental investigation for combustion performance of hydrogen and natural gas fuel blends". *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(88), 34476-34485.
- [110] Ozturk, M., Dincer, I. 2022. "System development and assessment for green hydrogen generation and blending with natural gas". *Energy*, 261, 125233.
- [111] Brun, K., Allison, T. C. 2022. "Machinery and energy systems for the Hydrogen Economy". Elsevier.
- [112] Ball, M., Wietschel, M. 2009. "The future of hydrogen—opportunities and challenges". *International journal of hydrogen energy*, 34(2), 615-627.
- [113] Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. 2025. "Balıkesir Çanakkale Planlama Bölgesi 1/100.000 Ölçekli Çevre Düzeni Planı". Geliş tarihi gönderen <https://mpgm.csb.gov.tr/balikesir-canakkale-planlama-bolgesi-1-100.000-olcekli-cevre-duzeni-plani-i-82273>
- [114] Balıkesir Sanayi Yatırım Rehberi, Güney Marmara Kalkınma Ajansı. <https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/Balikesir-Sanayi-Yatirim-Rehberi.pdf>
- [115] GMKA, 2016, Canakkale Sanayi Yatırım Rehberi, Güney Marmara Kalkınma Ajansı. <https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/Balikesir-Sanayi-Yatirim-Rehberi.pdf>
- [116] Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2024. https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Teknolojileri_Yol_Haritasi_Raporu_2021.pdf
- [117] Hydrogen hub – what is it? Description of the concept, areas of application. <https://seshydrogen.com/en/hydrogen-hub-what-is-it-description-of-the-concept-areas-of-application/>
- [118] How Green Hydrogen Hubs Are Changing Energy. <https://carbonminus.com/how-green-hydrogen-hubs-are-changing-energy/>
- [119] Trademap. <https://www.trademap.org/>
- [120] Tüpraş. <https://www.tupras.com.tr/tr/basin-bultenleri/tupras-ventures-yesil-hidrojen-alaninda-yurt-disi-girisim-yatirimlari-ile-buyuyor>
- [121] Secretary of State for Business. Energy & industrial strategy, UK hydrogen strategy. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1175494/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf
- [122] European Commission. A hydrogen strategy for a climate neutral Europe. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301>
- [123] IRENA (2020), Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- [124] McKinsey&Company (2024). Global Energy Perspective 2023: Hydrogen Outlook. <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-hydrogen-outlook#/>
- [125] Humphreys, J., Lan, R., & Tao, S. (2021). Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(1), 2000043. <https://doi.org/10.1002/aesr.202000043>
- [126] World Bank. (2022). Fertilizer consumption (kilograms per hectare of arable land) – European Union (Indicator No. AG.CON.FERT.ZS). World Development Indicators. Retrieved June 14, 2025, from <https://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS?locations=EU>
- [127] Zhao, H. (2024). Green ammonia supply chain and associated market structure. *Fuel*, 366, 131216. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131216>
- [128] Hydrogen Council. Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective. Hydrogen Council; 2020.
- [129] Brown T. Japan's road map for fuel ammonia. Ammonia Energy 2021. <https://www.ammoniaenergy.org/articles/japans-road-map-for-fuel-ammonia/>
- [130] Dutch Consulate General. Hydrogen in Japan and the Netherlands. 2021 Hydrogen Webinar Series 2022

- [131] Brown T. Feeding life 2030: the vision of Fertilizers Europe. Ammonia Energy 2019. <https://www.ammoniaenergy.org/articles/feeding-life-2030-the-vision-of-fertilizers-europe/>
- [132] IRENA. Innovation Outlook: Renewable Ammonia; International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2022.
- [133] Sheldon, D. (2017). Methanol production – A technical history: A review of the last 100 years of the industrial history of methanol production and a look into the future of the industry. Johnson Matthey Technology Review, 61(3), 172–182. <https://doi.org/10.1595/205651317X695622>
- [134] Steinberg, M. (1998). Production of hydrogen and methanol from natural gas with reduced CO₂ emission. International Journal of Hydrogen Energy, 23(3), 179–184. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(97\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(97)00116-4)
- [135] Klein, T. (2020). Methanol: A future proof fuel [Primer prepared for the Methanol Institute]. Future Fuel Strategies. Retrieved June 14, 2025, from <https://www.methanol.org>
- [136] GAZBİR (2025). 2024 Doğal Gaz Dağıtım Sektörü Raporu. <https://gazbir.org.tr/GAZBIR-2024-Yili-Dogal-Gaz-Dagitim-Sektoru-Raporu/>
- [137] EHO, Hydrogen Demand, 2023, European Hydrogen Observatory, <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/end-use/hydrogen-demand> (20.06.2025 tarihinde erişildi)
- [138] Hydrogen Council (2021) Hydrogen for Net-Zero: A critical cost-competitive energy vector. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-for-Net-Zero.pdf>
- [139] TEİAŞ. <https://www.teias.gov.tr/aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari>
- [140] Strateji ve Bütçe Başkanlığı. <https://www.sbb.gov.tr/enerji-madencilik-gostergeleri/>
- [141] Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. <https://sarjdestek.sanayi.gov.tr/>
- [142] IEA, (2019). Global Demand for Pure Hydrogen, 1975-2018. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-demand-for-pure-hydrogen-1975-2018>
- [143] GMKA, 2016, Balıkesir Sanayi Yatırım Rehberi, Güney Marmara Kalkınma Ajansı. <https://www.gmka.gov.tr/dokumanlar/yayinlar/Balikesir-Sanayi-Yatirim-Rehberi.pdf>
- [144] Hidrojen Teknolojileri Derneği, 2021. TÜRKİYE İÇİN HİDROJEN TEKNOLOJİLERİ YOL HARİTASI
- [145] U.S. Securities and Exchange Commission. Clover Health Investments Corp. Form S-1 Registration Statement. 2023. SEC EDGAR. https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1391426/000190359623000829/clvn_s1.htm
- [146] European Commission (2023). Renewable hydrogen production: new rules formally adopted. EC Directorate-General for Energy News, 20 June 2023
- [147] Alptekin, Z. (2023). Hidrojen enerjisi ve küresel işbirlikleri. Perspektif Online
- [148] SHURA Energy Transition Center – Çolak, E., Aksoy, H., & Sanlı, B. (2021). Techno-economic study of Turkey's production and export potential for green hydrogen.
- [149] Güney Marmara Kalkınma Ajansı (2023, 31 Ocak). Türkiye'nin İlk Yeşil Hidrojen Vadisi Kuruluyor. Haber Bülteni
- [150] Strategy&. (2023). Türkiye'nin Yeşil Hidrojen Yolculuğu: Gelecek Fırsatlar ve Zorluklar. PwC. <https://www.strategyand.pwc.com/tr/turkiyenin-yesil-hidrojen-yolculugu-gelecek-firrsatlar-ve-zorluklar>
- [151] Seatrade Maritime – Labrut, M. (2022, Nov 21). Green ammonia import terminal to be developed at Port of Hamburg
- [152] Oxford Institute for Energy Studies – Rikabi, R. (2024). Green Hydrogen Imports into Europe: An Assessment of Potential Sources.
- [153] Balkan Green Energy News – Todorović, I. (2023, Oct 24). Green ammonia hub set to start operations in Croatia in 2027
- [154] Daily Sabah (2023, April 28). Germany eyes green hydrogen transport from Türkiye via pipelines. (AA Haber)
- [155] Ship-Technology (2022). Cepsa and Port of Rotterdam to establish green hydrogen corridor

- [156] Hydrogen Council & McKinsey (2024). Emerging trade corridors for hydrogen and its derivatives
- [157] Hydrogen Europe (2024, 3 October). IEA publishes Global Hydrogen Review 2024. Hydrogen Europe Newsklar
- [158] Ivanova, I. (2024). Hydrogen Subsidies and Incentives Around the Globe: What This Means for Businesses. Hydrogenera.
- [159] European Hydrogen Observatory. (2023). Financial Tools and Incentives.
- [160] Mural, R., Floyd, M., Berns, S., & Takahashi, A. (2025). Stimulating Clean Hydrogen Demand: The Current Landscape. Belfer Center Policy Brief.
- [161] Clean Energy Wire. (2023). Germany's National Hydrogen Strategy.
- [162] Fuel Cell & Hydrogen Energy Association (FCHEA). (2023). Hydrogen: Investment in the Energy Transition.
- [163] U.S. Department of Energy (DOE). (2023). Financial Incentives for Hydrogen and Fuel Cell Projects.
- [164] IEA (2024). Green Innovation Fund – Hydrogen.
- [165] Hydrogen and Ammonia Division, Energy Efficiency and Renewable Energy Department (ANRE). (2024). Hydrogen Society Promotion Act Enacted Toward a Forthcoming Hydrogen-based Society
- [166] White & Case LLP. (2024). Japan's Hydrogen Society Promotion Act comes into effect.
- [167] Reccessary. (2025). Japan backs hydrogen-powered commercial vehicles with major subsidies.
- [168] Maheshwari & Co. (2025). Government Incentives for Green Hydrogen in India. Lexology.
- [169] Plug Power Inc. (2023). A Deep Dive into Global Green Hydrogen Policy Incentives
- [170] SHURA Energy Transition Center – Çolak, E., Aksoy, H., & Sanlı, B. (2021). Techno-economic study of Turkey's production and export potential for green hydrogen.
- [171] GMKA. (2025). Hidrojen Ekonomisi – Güney Marmara Kalkınma Ajansı, Balıkesir.
- [172] Güray, Bora & Çeker, Ali (2023). Türkiye Yeşil Hidrojen Geleceği 2023 (Rapor). Sabancı Üniversitesi.
- [173] Somay, Sera & Samlı, Zekican (2025). The future of hydrogen energy in Türkiye.
- [174] Akan, F. (2025). Küresel Hidrojen Yarışı ve AB'nin Yeşil Hidrojen Stratejisi. İktisadi Kalkınma Vakfı, İstanbul.
- [175] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2023). Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. ETKB Strateji Geliştirme Başkanlığı, Ankara.
- [176] SOCAR (2023). Türkiye'de Enerji Dönüşümü Stratejisinde Araştırma ve Öneri Raporu (2. Çeyrek 2023). SOCAR Türkiye Araştırma Ekibi, İstanbul.
- [177] Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2023). Türkiye Ulusal Enerji Planı. ETKB Strateji Geliştirme Başkanlığı, Ankara
- [178] SHURA Enerji Dönüşümü Merkezi (2025). Türkiye'nin Karbonsuzlaşma Sürecinde Yenilenebilir Hidrojen: Öncelikli Uygulama Alanları ve Politika Önerileri. SHURA, İstanbul.
- [179] Cakmak (2023). 2053 Net Sıfır Hedefi Işığında Türkiye Hidrojen Yol Haritası.
- [180] Chatenet, M., Pollet, B. G., Dekel, D. R., Dionigi, F., Deseure, J., Millet, P., Braatz, R. D., Bazant, M. Z., Eikerling, M., Staffell, I., Balcombe, P., Shao-Horn, Y., & Schäfer, H. (2022). Water electrolysis: From textbook knowledge to the latest scientific strategies and industrial developments. *Chemical Society Reviews*, 51(11), 4583–4762.



Güney Marmara Kalkınma Ajansı

Paşa Alanı, A. Gaffar Okkan Cd. No: 36/1, 10020 Karesi/Balıkesir

İletişim:

Balıkesir Ofisi (+90) 266 246 10 00
Çanakkale Ofisi (+90) 286 211 00 81
Faks : (+90) 266 246 17 00
E-Posta : info@gmka.gov.tr

Kalkınma Ajansı Yayınları Bedelsizdir, Satılmaz