

Türkiye'nin Hidrojen Ekonomisine Geçiş: Yenilenebilir Enerji Potansiyeli, Jeopolitik Konum ve Lojistik Altyapı

Bülent Yıldız¹

Oğuzhan Yavuz²

Özet

Bu araştırmanın önemi, küresel nüfus artışı ve mevcut enerji kaynaklarının giderek yetersiz hâle gelmesiyle birlikte, hidrojen enerjisinin sürdürülebilir bir çözüm olarak yeniden gündeme gelmesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle 1990'lı yılların sonlarından itibaren artan çevresel kaygılar ve iklim değişikliği, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını teşvik etmiş; bu doğrultuda hidrojen, düşük emisyon salımı, yüksek enerji yoğunluğu ve çok yönlü kullanım alanlarıyla dikkat çeken stratejik bir enerji taşıyıcısı olarak ön plana çıkmıştır. Bu çalışma, Türkiye'nin hidrojen ekonomisine geçiş sürecini; yenilenebilir enerji potansiyeli, jeopolitik konumu ve mevcut lojistik altyapısı bağlamında analiz etmeyi amaçlamaktadır. Araştırma kapsamında, Türkiye'nin hidrojen enerjisi üretimi ve lojistiği açısından mevcut enerji politikalarının yeterliliği ile jeopolitik konumunun stratejik bir avantaj sağlayıp sağlamadığı iki temel araştırma sorusu çerçevesinde ele alınmıştır. Literatür taramasına dayalı olarak gerçekleştirilen analizde, Türkiye'nin güneş, rüzgâr, jeotermal ve hidroelektrik enerji kaynaklarına ilişkin potansiyeli ayrıntılı biçimde incelenmiş; ayrıca Hidrojen Vadisi Projesi gibi somut stratejik girişimler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Türkiye'nin hidrojen üretimi ve dağıtımı açısından önemli fırsatlara sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini artırmak ve 2053 net sıfır emisyon hedeflerine ulaşmak adına, hidrojen teknolojilerine yönelik bütüncül, uzun vadeli ve uygulamaya geçirilebilir bir ulusal strateji geliştirmesi gerekmektedir.

1 Doç. Dr., Kastamonu Üniversitesi İİBF İşletme Bölümü, byildiz@kastamonu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-5368-2805

2 Doktora Öğrencisi, Kastamonu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, oguz.yavuz98@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8612-6251

1.GİRİŞ

Sanayileşmenin hız kazanması ve dünya nüfusunun sürekli artması, küresel ölçekte enerji talebini önemli ölçüde artırmaktadır. Bu artış, özellikle fosil yakıtların sınırlı rezervleri ve çevresel etkileri nedeniyle sürdürülebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır (Yang vd., 2025). Artan karbon salımları, hava kirliliği ve iklim değişikliğinin yarattığı ekosistem tehditleri, yalnızca çevresel açıdan değil, aynı zamanda ekonomik ve politik bağlamda da enerji sistemlerinin yeniden yapılandırılmasını gerekli kılmaktadır. Bu kapsamda yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi gün geçtikçe artmakta ve bu kaynaklar arasında hidrojen enerjisi, sahip olduğu özellikler nedeniyle ön plana çıkmaktadır (Timalsina vd., 2025; Chen vd., 2025).

Hidrojen enerjisi, sifıra yakın emisyon salımı, yüksek enerji yoğunluğu ve çok yönlü kullanım alanları sayesinde, enerji dönüşüm sürecinde stratejik bir çözüm aracı olarak değerlendirilmektedir. Hidrojenin doğada bol miktarda bulunması ve yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilmesi, onu fosil yakıtlara kıyasla çevre dostu ve sürdürülebilir bir alternatif hâline getirmektedir (Sukurova vd., 2023). Ancak hidrojenin enerji sistemi içerisindeki potansiyelinden tam anlamıyla yararlanılabilmesi, yalnızca üretim süreciyle sınırlı değildir; bu potansiyelin etkin bir şekilde kullanılması, aynı zamanda depolama, taşıma ve dağıtım gibi lojistik süreçlerin güvenli, ekonomik ve verimli biçimde tasarlanmasını gerektirmektedir (Tunç & Solmaz, 2025; Zhu vd., 2025). Bu noktada hidrojen teknolojilerinin yaygınlaştırılmasının, yalnızca mühendislik çözümleriyle değil; aynı zamanda etkili enerji politikaları, altyapı yatırımları ve stratejik planlamalarla da desteklenmesi büyük önem taşımaktadır.

Türkiye açısından değerlendirildiğinde, enerji arz güvenliğini sağlama hedefi doğrultusunda, Türkiye, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı stratejiler geliştirmeye yönelik politikalarını hızlandırmıştır (Hamzaçebi, 2007). Bu kapsamda hidrojen enerjisi, hem enerji güvenliğinin güçlendirilmesinde hem de 2053 yılı için belirlenen “net sıfır emisyon” hedeflerine ulaşmada kritik bir rol oynamaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu geniş güneşlenme süresi, rüzgâr verimliliği yüksek kıyı bölgeleri ve dünyanın önde gelen jeotermal rezerv alanları, hidrojen üretimi açısından yüksek bir teknik potansiyel sunmaktadır (Yılmaz vd., 2024). Öte yandan, Türkiye'nin Asya ile Avrupa arasında yer alan stratejik coğrafi konumu, yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda hidrojenin uluslararası piyasalara taşınmasında da lojistik bir avantaj sağlamaktadır. Bu durum, Türkiye'yi

hem üretici hem de enerji geçiş merkezi olarak konumlandırabilecek özgün bir fırsat alanı sunmaktadır.

Bu çalışma, yukarıda belirtilen bağlamlar doğrultusunda, aşağıdaki iki temel araştırma sorusu çerçevesinde şekillendirilmiştir:

S1.Türkiye'nin mevcut enerji politikaları, hidrojen enerjisinin üretimi ve lojistiği açısından ne ölçüde yeterlidir?

S2.Türkiye'nin jeopolitik konumu ve yenilenebilir enerji potansiyeli, hidrojen ekonomisinde stratejik bir avantaj sunmakta mıdır?

Bu sorular doğrultusunda, hidrojen enerjisinin temel tanımı ve teknik özellikleri ele alınmakta; üretim, taşıma ve depolama süreçlerine ilişkin kuramsal bilgiler ile Türkiye'nin güncel sektörel uygulamaları bir arada değerlendirilmektedir. Çalışmada, mevcut durum analizine ek olarak, geleceğe dönük stratejik öneriler de sunulurken, Türkiye'nin hidrojen ekonomisine geçiş sürecine bilimsel bir katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

2.KURAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Hidrojenin Tanımı ve Enerji Sistemlerindeki Rolü

Hidrojenin enerji taşıyıcısı olarak kullanımı yaklaşık iki yüzyıllık bir geçmişe sahiptir (Dunn, 2001). Ancak özellikle son yıllarda çevresel kaygıların ve enerji arz güvenliği ihtiyacının artmasıyla birlikte, hidrojenin enerji sistemlerindeki rolü yeniden önem kazanmıştır. Çok yönlü bir enerji taşıyıcısı olan hidrojen, gerek enerji depolama teknolojilerinde gerekse doğrudan yakıt olarak kullanımıyla, sürdürülebilir enerji dönüşümünde stratejik bir alternatif sunmaktadır. Bu özelliği sayesinde, fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasında önemli bir rol üstlenme potansiyeline sahiptir (Sukurova vd., 2023).

Hidrojen enerjisine yönelik ilginin son dönemde artmasının ardında yatan temel faktörler arasında; artan hava kirliliği, düşük ya da sıfır emisyonlu ulaşım araçlarına olan talep, karbondioksit (CO₂) emisyonlarının azaltılması gerekliliği ve küresel iklim değişikliğine karşı geliştirilen enerji politikaları yer almaktadır (Solomon & Banerjee, 2006). Bu faktörler, yalnızca hidrojenin teknik üstünlüklerine değil, aynı zamanda çevresel ve politik açıdan taşıdığı değere de işaret etmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojenin, uzun vadede kalıcı ve düşük karbonlu bir enerji sistemi oluşturulmasında merkezi bir rol üstlenmesi beklenmektedir (Veziroğlu & Şahin, 2008). Fiziksel özellikleri açısından değerlendirildiğinde, hidrojen son derece hafif bir element

olup, havaya kıyasla yaklaşık %6,9 oranında daha düşük yoğunluğa sahiptir ve benzinden yaklaşık 12 kat daha geniş bir hacme yayılma eğilimindedir. Bu özellikleri, onu bazı güvenlik risklerinden arındırmakta ve yanma-patlama tehlikelerini sınırlı seviyede tutmaktadır (Sharma & Ghoshal, 2015).

Ayrıca hidrojen, fosil kaynaklı enerji sistemlerinin neden olduğu karbon monoksit (CO), karbondioksit (CO₂), hidrokarbonlar (C_nH_m), sülfür oksitler (SO_x) ve azot oksitler (NO_x) gibi zararlı emisyonlara kıyasla, çevresel etkileri son derece düşük olan bir enerji çözümüdür. Yenilenebilir enerji kaynakları temelinde üretilen hidrojen, bu bağlamda çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Momirlan & Veziroğlu, 2002).

2019–2024 yılları arasında hidrojen kullanımı büyük ölçüde sanayi, rafineri ve geleneksel sektörlerde yoğunlaşmıştır. Bu dönemde yeni kullanım alanlarının payı oldukça sınırlı kalmıştır. Ancak 2030 yılına yönelik projeksiyon, hidrojenin geleneksel kullanımının sabit kaldığı; buna karşın ulaşım, elektrik üretimi, sentetik yakıt ve diğer yeni uygulama alanlarında belirgin bir artış yaşandığı bir tabloyu göstermektedir. Özellikle sanayi ve ulaşım sektörlerinde hidrojenin artan oranda kullanılacağı öngörülmektedir. Bu durum, enerji dönüşüm stratejilerinde hidrojenin merkezi bir rol üstleneceğini ortaya koymaktadır. 2023 yılı itibarıyla hidrojen kullanımının bölgesel dağılımı incelendiğinde, Çin %29 ile en büyük paya sahip ülke konumundadır. Onu %24 ile “dünyanın geri kalanı” kategorisi takip etmektedir. Kuzey Amerika %16’lık bir oranla üçüncü sırada yer almakta, Orta Doğu (%14) ve Hindistan (%9) gibi bölgeler de dikkat çekici oranlara sahiptir. Buna karşın, Avrupa’nın hidrojen kullanım oranı yalnızca %8 olarak kaydedilmiştir; bu da bölgedeki hidrojen altyapısının henüz istenilen düzeye ulaşmadığını göstermektedir (International Energy Agency, 2024). Söz konusu veriler, hidrojen kullanımının hem sektörler hem de bölgeler bazında önemli bir dönüşüm sürecine girdiğini göstermektedir. Sanayi ve ulaşım gibi enerji yoğun sektörlerde hidrojenin rolü giderek artarken, coğrafi olarak Asya kıtasının özellikle Çin’in bu dönüşümde öncü konumda olduğu anlaşılmaktadır. Avrupa’nın bu alanda düşük paya sahip olması ise, bölgenin hidrojen stratejilerinde ilerleme kaydetmesine karşın uygulama düzeyindeki gecikmelere işaret etmektedir.

Hidrojen enerjisi, günümüzün sürdürülebilir enerji politikalarında giderek daha fazla ön plana çıkan stratejik bir enerji taşıyıcısıdır. Hem fosil kaynaklardan hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilibilme özelliği sayesinde yüksek esneklik sunan hidrojen, sanayi, ulaşım ve kimya gibi çeşitli sektörlerde kullanılabilirliği ile dikkat çekmektedir. Aynı zamanda çevre dostu olması, özellikle yenilenebilir enerjiyle üretildiğinde emisyon salımının

neredeyse sıfıra inmesi, hidrojenin düşük karbonlu enerji sistemleri açısından kritik bir rol üstlenmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte, hidrojenin büyük ölçekli enerji sistemlerine entegre edilmesi bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Hidrojenin fiziksel özellikleri, özellikle düşük moleküler ağırlığı, depolama sırasında sızıntı riskini artırmakta; bazı malzemelerde kırılabilirliğe yol açarak güvenlik açısından ek önlemler gerektirmektedir. Ayrıca, üretim sürecindeki yüksek maliyetler ve mevcut depolama sistemlerinin enerji yoğunluğu açısından verimsizliği, hidrojenin özellikle ulaşım sektörü gibi uygulamalarda geniş çaplı kullanımını sınırlandırmaktadır. Ancak son yıllarda geliştirilen ileri mühendislik çözümleri ve malzeme teknolojileri, bu sınırlılıkların aşılabileceğini göstermektedir. Depolama güvenliği, taşımacılık altyapısı ve maliyet etkinliği konularındaki ilerlemeler sayesinde hidrojenin enerji sistemlerindeki payının artırılması mümkün görünmektedir (Rosen & Koohi-Fayegh, 2016).

2.2.Hidrojen Lojistiği

Lojistik, birden fazla paydaşın yer aldığı ortak bir değer ağı içinde bilgi akışı, karar alma süreçleri ve kaynak yönetiminin planlanması ve uygulanmasını kapsayan entegre ve koordineli bir sistem olarak tanımlanmaktadır (Benjelloun & Crainic, 2008). Bu çerçevede, hidrojen lojistiği, yalnızca tedarik zinciri yönetiminin bir unsuru olmakla kalmayıp, aynı zamanda hidrojen ekonomisinin gelişimi ve sürdürülebilir enerjiye geçiş süreci açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle karbon emisyonlarının azaltılmasına yönelik küresel hedefler doğrultusunda, hidrojenin üretim noktalarından tüketim merkezlerine etkin ve güvenli bir şekilde taşınması büyük önem arz etmektedir (Erdoğan vd., 2024).

Hidrojenin taşınabilirliği, onu stratejik bir enerji taşıyıcısı yapan temel unsurlardan biridir. Günümüzde hidrojen; karayolu, denizyolu, demiryolu ve boru hatları aracılığıyla taşınabilmektedir (Tunçbilek, 2024). Bu taşıma yöntemlerinin seçimi, taşınacak hidrojenin hacmine, taşınma mesafesine, altyapı kapasitesine ve maliyet unsurlarına bağlı olarak değişmektedir. Özellikle büyük hacimli ve uzun mesafeli taşımalar için, hidrojenin sıkıştırılmış gaz formunda boru hatlarıyla taşınması teknik açıdan en uygun yöntem olarak değerlendirilmektedir (Rosen & Koohi-Fayegh, 2016). Ancak bu yöntemin uygulanabilirliği, gelişmiş bir altyapının varlığını gerektirmektedir.

Boru hattı taşımacılığı, yüksek taşıma kapasitesi ve sürekli akış imkânı sayesinde avantajlı olmakla birlikte, hidrojenin kimyasal özellikleri bu yöntemin uygulanmasında bazı teknik zorluklara yol açmaktadır. Hidrojenin

yüksek reaktivitesi ve yanıcılığı, boru hatlarında kullanılacak malzemelerin seçiminde özel önlemler alınmasını zorunlu kılmakta; sızıntı riskine karşı ek güvenlik sistemlerinin entegrasyonunu gerektirmektedir. Ayrıca hidrojen, belirli metal alaşımlarla temas ettiğinde malzeme kırılganlığına neden olabilmekte ve bu durum boru hatlarının uzun ömürlü kullanımı açısından ciddi bir engel teşkil etmektedir (Raj vd., 2024). Bu tür teknik ve güvenlik riskleri nedeniyle, hidrojenin boru hatlarıyla taşınmasının kısa vadede yaygın bir çözüm olarak benimsenmesi sınırlı kalabilir (Staffell vd., 2019).

Boru hattı taşımacılığında maliyet unsurları da önemli bir değişken olarak öne çıkmaktadır. Hidrojenin akış hızı, teslimat mesafesi ve boru hattı çapı gibi faktörler, toplam lojistik maliyetini belirleyici unsurlar arasında yer almaktadır. Küçük hacimli taşımalar için boru hattı kullanımı, genellikle maliyet açısından verimsiz kabul edilmektedir. Bu nedenle kısa mesafelerde, özellikle küçük hacimli hidrojen taşımalarında, gaz hâlindeki hidrojenin tüp tanklar aracılığıyla kamyonlarla taşınması en ekonomik ve uygulanabilir yöntem olarak öne çıkmaktadır (Ajanovic, 2008).

Alternatif taşıma modlarına bakıldığında, denizyolu taşımacılığı büyük hacimli taşımalarda tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu yöntem, 1000 m³'ün üzerinde kapasiteye sahip özel tankerlerle gerçekleştirilebilmektedir. Karayolu taşımacılığı ise esnekliği ve kolay erişilebilirliği sayesinde daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde, genellikle 30–60 m³ hacme sahip römorklar aracılığıyla 2100 ila 4200 kg arasında hidrojen taşınabilmektedir. Demiryolu taşımacılığı ise, daha büyük ölçekli taşımalar için uygun bir alternatif olup, yaklaşık 8000 kg kapasiteye sahip 115 m³'lük konteynerler kullanılmaktadır (Aziz, 2021). Bu bağlamda, hidrojenin lojistiği, yalnızca taşıma yöntemlerinden ibaret olmayan çok boyutlu bir süreçtir. Altyapı gereksinimleri, güvenlik önlemleri, ekonomik sürdürülebilirlik ve enerji dönüşüm hedefleri birlikte değerlendirildiğinde, hidrojen lojistiğinin başarılı bir şekilde yönetilmesi, hidrojen ekonomisinin gelişimi açısından temel bir ön koşul olarak öne çıkmaktadır.

Hidrojenin enerji sistemleri içerisinde etkin bir biçimde kullanılabilmesi, yalnızca üretim teknolojilerine değil; aynı zamanda bütüncül bir tedarik zinciri yapısının varlığına da bağlıdır. Literatürde, hidrojen tedarik zinciri dört temel aşamadan oluşan bir yapı şeklinde tanımlanmaktadır: hammadde tedariki, üretim, depolama ve dağıtım (Nunes vd., 2015).

Zincirin ilk halkasında yer alan hammadde tedarikçileri, ulusal veya uluslararası kaynaklardan sağlanan girdileri üretim tesislerine ulaştırmaktadır. Bu hammaddeler, doğalgaz, su veya organik atık gibi hidrojen üretimine uygun bileşenleri içermektedir. Üretim tesislerinde bu hammaddeler,

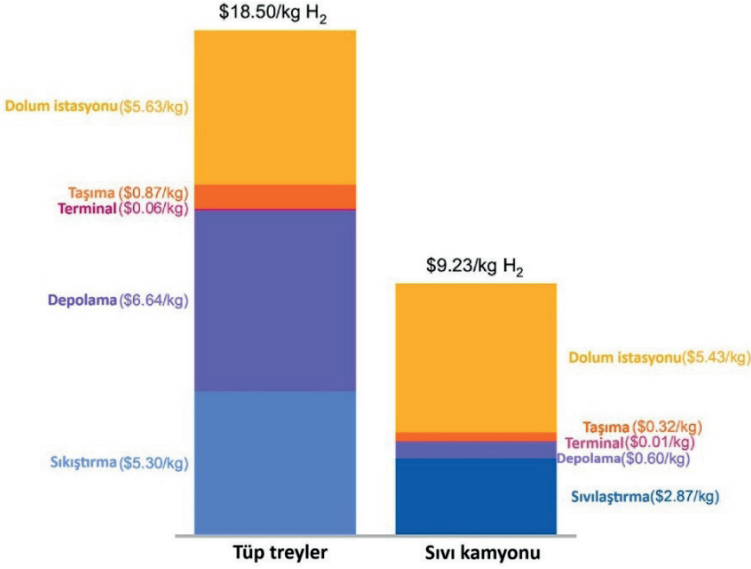
çeşitli teknolojik süreçler (örneğin buhar metan reformasyonu, elektroliz veya biyokütle gazlaştırması) aracılığıyla sıvı ya da gaz hâlindeki hidrojene dönüştürülmektedir. Elde edilen hidrojen, üretim noktasından sonra ya depolama tesislerine yönlendirilmekte ya da doğrudan yakıt ikmal istasyonlarına sevk edilmektedir. Depolama tesisleri, hidrojenin talep zamanlamasına uygun şekilde kullanılabilmesi için stratejik bir ara aşama işlevi görmektedir. Eğer hidrojenin anlık kullanımına ihtiyaç duyulmazsa, bu ürün güvenli koşullar altında depolanarak ilerideki tüketim ihtiyaçlarına yönelik olarak sistemde tutulmaktadır. Talep oluştuğunda ise, hidrojen depolama alanlarından alınarak tüketim noktalarına taşınmakta ve nihai kullanıcıya ulaştırılmaktadır (Nunes vd., 2015). Bu yapı, hidrojenin üretimden nihai kullanıma kadar olan sürecinin sistematik biçimde planlanmasını ve yönetilmesini gerekli kılmakta olup, enerji güvenliği ve sürdürülebilir lojistik açısından hayati önem taşımaktadır.

2.3. Hidrojenin Ulaşımında Kullanımı ve Yakıt İkmal Altyapısı

Hidrojenin ulaşım sektöründe etkin bir yakıt olarak kullanılabilmesi, yalnızca üretim süreçlerinin değil; aynı zamanda yaygın, erişilebilir ve güvenli bir ikmal istasyonları ağıının oluşturulmasını da gerektirmektedir (Wallington vd., 2025). Bu altyapı, hidrojenin hem depolanmasını hem de son kullanıcıya ulaştırılmasını mümkün kılarak, taşımacılıkta hidrojen bazlı dönüşümün temelini oluşturmaktadır.

Hidrojenin ikmal ve dağıtım süreçlerinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri ise yüksek teslimat maliyetleridir. Bu maliyetleri sistematik olarak analiz etmek ve optimize etmek amacıyla, Hidrojen Dağıtım Senaryosu Analiz Modeli (HDSAM) geliştirilmiştir (Elgowoiny & Reddi, 2024). HDSAM modeli, özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde hidrojen dağıtımına ilişkin maliyet tahminleri ile birlikte, çevresel emisyonların analiz edilmesi amacıyla kullanılmaktadır.

Model, günlük 100 kg ile 2000 kg arasında hidrojen dağıtımı gerçekleştiren ikmal istasyonları için farklı dağıtım senaryolarına göre maliyet tahminleri sunmaktadır. Bu kapsamda, Şekil 1'de yer verilen analizler, HDSAM modeli kullanılarak hesaplanan teslimat maliyetlerini göstermektedir. Analiz sonuçları, mevcut altyapının hidrojenin yaygınlaşması için yetersiz kaldığını ve özellikle teslimat süreçlerinde maliyetlerin azaltılması ve sistemin verimliliğinin artırılması gerektiğini ortaya koymaktadır (Wallington vd., 2025).



Şekil 1. Hidrojenin Tahmini Maliyetleri (Wallington vd., 2025)

Şekil1, hidrojenin tüp treyler ve sıvı kamyonu ile taşınmasına ilişkin birim başı toplam maliyetleri ve bu maliyetlerin alt bileşenlerini karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Her iki taşıma yöntemi için farklı lojistik aşamaların (sıvılaştırma/sıkıştırma, depolama, terminal işlemleri, taşıma ve dolum istasyonu) birim maliyete katkısı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Grafik, taşıma yönteminin seçiminde yalnızca teknik değil, ekonomik etkenlerin de belirleyici olduğunu açık biçimde göstermektedir. Tüp treyler yöntemiyle hidrojen taşınmasında toplam maliyetin 18.50 ABD doları/kg H₂ olduğu görülmektedir. Bu yöntemde en yüksek maliyet kalemleri: Depolama (\$6.64/kg), sıkıştırma (\$5.30/kg), dolum istasyonu işlemleri (\$5.63/kg) olarak öne çıkmaktadır. Taşıma (\$0.87/kg) ve terminal maliyetleri (\$0.06/kg) toplam maliyette görece daha düşük bir paya sahiptir. Bu durum, özellikle sıkıştırma ve depolamanın enerji yoğunluğu ve teknik gereklilikleri nedeniyle tüp treyler yönteminin daha yüksek işletme maliyetiyle sonuçlandığını göstermektedir. Sıvı kamyonu yöntemiyle hidrojen taşımacılığının toplam maliyeti ise 9.23 ABD doları/kg H₂ olup, tüp treylere kıyasla neredeyse yarı yarıya daha düşük bir maliyet sunmaktadır. En büyük maliyet kalemi yine: dolum istasyonu işlemleri (\$5.43/kg) olmakla birlikte, diğer bileşenler oldukça düşük kalmaktadır. Özellikle, sıvılaştırma maliyeti (\$2.87/kg), depolama (\$0.60/kg), taşıma (\$0.32/kg), terminal işlemleri (\$0.01/kg) bu yöntemin ekonomik avantajlarını göstermektedir. Bu durum, sıvı taşımacılığın yüksek hacimli taşımalar için daha verimli bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Verilere göre, hidrojen taşımacılığında sıvı kamyonu yöntemi, tüp treyler yöntemine kıyasla daha düşük maliyetli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Özellikle sıkıştırma ve depolama gibi enerji yoğun aşamalardaki maliyet farkları, toplam maliyeti ciddi biçimde etkilemektedir. Bununla birlikte, dolum istasyonlarındaki maliyetin her iki yöntemde de yüksek olması, bu aşamanın hidrojen tedarik zincirindeki en kritik ekonomik darboğazlardan biri olduğunu göstermektedir. Enerji geçiş stratejilerinde maliyet etkinliğinin artırılabilmesi için, sıkıştırma ve depolama teknolojilerinin geliştirilmesi, ayrıca terminal ve dolum süreçlerinin daha verimli hâle getirilmesi önemli bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

2.4. Türkiye’de Lojistik Altyapı ve Hidrojen Taşımacılığı Açısından Stratejik Potansiyel

Türkiye, sahip olduğu coğrafi konum ve ulaşım çeşitliliği sayesinde lojistik altyapısını çok modlu taşımacılık ilkeleri çerçevesinde geliştirmeye devam etmektedir. Karayolu, denizyolu, demiryolu, havayolu ve boru hattı taşımacılığı gibi farklı ulaşım türlerinin entegre biçimde kullanılması, hem iç ticaretin etkinliğini artırmakta hem de enerji lojistiği gibi stratejik alanlarda yüksek esneklik ve güvenlik sağlamaktadır. Bu kapsamda, Türkiye genelinde taşımacılık modlarının entegrasyonunu sağlayacak şekilde yapılandırılmış 11 adet lojistik merkez aktif olarak hizmet vermektedir (Bozdağlıoğlu & Keşir, 2022).

Karayolu taşımacılığı, özellikle kısa mesafeli sevkiyatlarda hızlı ve etkin lojistik çözümler sunması nedeniyle Türkiye’de en yaygın kullanılan ulaşım türü olarak öne çıkmaktadır. Üretim noktalarından tüketim merkezlerine doğrudan erişim sağlaması, bu sistemin tercih edilme oranını artırmaktadır (Takım & Ersungur, 2015). Havayolu taşımacılığı, taşıma süresinin kısa olması bakımından avantaj sağlasa da, yüksek maliyetli olması ve hava koşullarına duyarlılığı nedeniyle sınırlı kullanım alanına sahiptir (Gün, 2007).

Denizyolu taşımacılığı, özellikle uzun mesafeli taşımacılıkta ekonomik açıdan avantajlı bir alternatif sunmaktadır. Yüklerin farklı taşıma araçlarına kolaylıkla aktarılabilmesi (intermodalite) ve Türkiye’nin 8.400 kilometreyi aşan doğal kıyı uzunluğu, bu yöntemin stratejik önemini artırmaktadır (İrmaç & Pelit, 2020). Demiryolu taşımacılığı, hem yük ve çeşitli ürünlerin taşınmasında hem de ulaşım yolları açısından önemli bir taşıma sistemi olarak öne çıkmaktadır (Tutar vd., 2009). Türkiye Karayolu ve Demiryolu Taşımacılığı Sektör Araştırması Raporu’na (2023) göre, Türkiye’nin toplam 13.128 kilometre uzunluğundaki ulusal demiryolu altyapısı bu alandaki lojistik faaliyetlerin temelini oluşturmaktadır.

Enerji taşımacılığında öne çıkan bir diğer önemli sistem olan boru hattı taşımacılığı, özellikle petrol ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarının hızlı, güvenli ve maliyet etkin bir şekilde taşınmasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Oğuz & Oğuz, 2020). Türkiye'nin mevcut boru hattı altyapısı, yalnızca mevcut enerji ihtiyacını karşılamakla kalmamakta; aynı zamanda hidrojen taşımacılığı açısından da büyük bir potansiyel sunmaktadır. Bu doğrultuda, gelecekte üretilecek hidrojenin tüketim bölgelerine verimli şekilde ulaştırılabilmesi amacıyla planlanan boru hattı güzergâhları, enerji politikaları açısından stratejik bir öneme sahiptir.

Türkiye'nin coğrafi yapısı, enerji altyapısı ve sanayi kümelenmeleri göz önünde bulundurularak olası hidrojen boru hattı için belirlenen güzergâhlar, ülkenin doğu-batı yönündeki enerji geçişi rolünü güçlendirme potansiyeline sahiptir. Güzergâh, batıda İzmir, Bursa ve İstanbul gibi sanayi ve ihracat merkezlerinden başlayarak, İç Anadolu'daki üretim ve dağıtım noktaları olan Ankara, Konya ve Kayseri üzerinden geçmekte; doğuda ise Gaziantep, Diyarbakır, Van ve Erzurum gibi enerji ihtiyacı yüksek illere uzanmaktadır. Aynı zamanda hat, Akdeniz limanlarına (Mersin, Antalya) ve Karadeniz kıyısındaki şehirler (Samsun, Ordu, Trabzon) aracılığıyla deniz taşımacılığı ile entegre edilebilecek bir yapı sunmaktadır. Bu sayede hidrojenin hem iç hem de dış pazarlara taşınması mümkün olabilecektir (Çolak vd., 2021).

Bu güzergâhın enerji lojistiği açısından önemi, birkaç temel faktöre dayanmaktadır: Var olan doğalgaz boru hattı altyapısına paralel geliştirilebilir olması, yeni yatırımların maliyetini düşürebilir. Sanayi ve enerji tüketiminin yoğun olduğu bölgeleri kapsamaması, hidrojenin dağıtım verimliliğini artırır. Deniz limanlarına bağlantı sağlaması, hidrojenin sıvı veya tüp formda ihraç edilmesini kolaylaştırır. Doğu ile Batı arasındaki enerji geçiş koridoru niteliği, Türkiye'nin jeopolitik avantajlarını hidrojen ekonomisiyle birleştirir. Ayrıca, bu hat ile entegre edilecek yakıt ikmal istasyonları, yerel üretim tesisleri ve depolama altyapıları, Türkiye'nin ulusal hidrojen stratejisi kapsamında "bütünleşik bir hidrojen lojistik ağı" kurmasına olanak sağlayacaktır. Bu yönüyle önerilen güzergâh, yalnızca fiziksel bir iletim hattı değil; aynı zamanda hidrojen ekonomisine geçişin temel taşı niteliğinde bir altyapı unsuru olarak değerlendirilmelidir.

2.5.Hidrojenin Depolanması

Hidrojen enerjisinin sunduğu çevresel ve teknik avantajlara rağmen, güvenli ve verimli bir şekilde depolanabilmesi, hidrojen ekonomisinin yaygınlaşmasında hâlâ önemli bir zorluk olarak varlığını sürdürmektedir (Zhang vd., 2015). Hidrojenin uygun koşullarda ve maliyet etkin

biçimde depolanması hem taşıma süreçlerinin sürdürülebilirliği hem de arz-talep dengesinin sağlanması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Hidrojen depolama yöntemleri genel olarak iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır: fiziksel yöntemler ve malzeme temelli teknolojiler (Jorschick vd., 2021; Osman vd., 2024). Bu sınıflandırma aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Fiziksel Yöntemler: Sıkıştırılmış hidrojen tankları, Sıvı hidrojen (LH₂) tankları, Kriyojenik-sıkıştırılmış tanklar
- Malzeme Temelli Teknolojiler: Metal hidritler, Adsorbanlar, Kimyasal hidritler

Fiziksel yöntemler, hidrojenin ya yüksek basınç altında sıkıştırılmış gaz hâlinde ya da çok düşük sıcaklıklarda sıvı formda depolanmasına dayanmaktadır. Bu yöntemler günümüzde en yaygın kullanılan depolama teknolojileri arasında yer almakta ve mevcut hidrojen lojistiğinin omurgasını oluşturmaktadır (Jorschick vd., 2021). Sıkıştırma yöntemi, doğalgaz için kullanılan sistemlere benzer tanklarda uygulanmakta olup, görece düşük maliyetli ve basit bir altyapı gerektirmektedir. Bu tanklar, güvenlik açısından da gelişmiş sistemlerle donatılmıştır; yangın durumlarında patlamayı önleyen güvenlik fitilleri, acil durum kesici sistemleri gibi önlemler, kullanım güvenliğini artırmaktadır (Cipriani vd., 2014).

Hidrojenin sıvı formda depolanabilmesi için öncelikle sıvılaştırma sürecinden geçirilmesi gerekmektedir. Bu süreç, hidrojenin kriyojenik sıcaklıklara (-253 °C) kadar soğutulmasını içerir. Ancak, hidrojenin son derece düşük kaynama noktası nedeniyle, sürekli soğutma teknik olarak mümkün değildir. Bu nedenle, depolama tanklarının yüksek düzeyde yalıtımlı olması kritik önem taşır. Yine de tam yalıtım sağlanamadığından, sıvı hidrojen zamanla buharlaşabilir. Bu kayıpları kontrol altına almak amacıyla, büyük ölçekli tesislerde buharlaşan hidrojenin basınçlı kaplarda yeniden gaz olarak depolanması, sistemin verimliliğini artırmaktadır (Burke vd., 2024).

Malzeme temelli yaklaşımlar arasında en dikkat çekici olan yöntemlerden biri metal hidritli depolama sistemleridir. Bu sistemlerde hidrojen, metal alaşımlarının yapısına kimyasal olarak bağlanarak depolanmakta ve ihtiyaç hâlinde geri salınmaktadır (Zhang vd., 2015). Metal hidrit bazlı depolama sistemlerinin başlıca avantajları arasında; yüksek kütsel ve hacimsel hidrojen yoğunluğu, üst düzey güvenlik, yüksek saflıkta hidrojen üretimi ve iyi geri dönüşüm performansı yer almaktadır (Chen & Zhu, 2008).

Bir diğer gelişmiş yöntem ise kimyasal depolamadır. Bu yöntemde, hidrojen kimyasal taşıyıcılar aracılığıyla bağlanarak daha kararlı bir formda

depolanır. Bu tür teknolojiler, özellikle Power-to-X uygulamaları kapsamında gelişmektedir. Burada hidrojen, katalitik süreçler aracılığıyla azot (N₂) veya karbondioksit (CO₂) ile tepkimeye girerek sırasıyla amonyak, metan, metanol ya da sentetik hidrokarbonlar gibi taşıyıcı moleküllere dönüştürülmektedir (Jorschick vd., 2021). Bu yaklaşım hem taşıma kolaylığı hem de entegre enerji sistemlerine adaptasyon açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır.

2.6. Türkiye'nin Enerji Profili ve Hidrojen Üretimindeki Potansiyeli

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın (ETKB) 2025 yılı Nisan ayı sonunda yayımladığı verilere göre, Türkiye'nin toplam kurulu elektrik üretim kapasitesi 118.668 MW olarak kaydedilmiştir. Bu kurulu gücün enerji kaynaklarına göre dağılımı incelendiğinde; %27,2'sinin hidrolik, %20,7'sinin doğal gaz, %18,5'inin kömür, %18,7'sinin güneş, %11,2'sinin rüzgâr, %1,5'inin jeotermal ve %2,2'sinin diğer enerji kaynakları tarafından sağlandığı görülmektedir (ETKB, 2025). Bu dağılım, Türkiye'nin yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik artan ilgisini ve kaynak çeşitliliğini yansıtmaktadır.

Hidrojen; çevre dostu yapısı, geri dönüştürülebilirliği, yüksek enerji yoğunluğu ve düşük karbon emisyonu ile fosil yakıtlara karşı umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, hidrojen üretim ve kullanım süreçlerinde bazı teknik ve ekonomik zorluklar da bulunmaktadır. Yüksek üretim maliyetleri, gelişmiş altyapı gereksinimi, dağıtım ve depolama sistemlerinin yetersizliği ve verimliliği artıracak ileri teknolojilere olan ihtiyaç, hidrojenin yaygınlaşmasının önündeki temel engeller olarak öne çıkmaktadır (Akpasi vd., 2025).

Özellikle doğal gaz gibi fosil kaynaklardan üretilen gri hidrojen ile yenilenebilir kaynaklarla üretilen yeşil hidrojen arasındaki maliyet farkı, yeşil hidrojenin benimsenmesini sınırlayan önemli bir faktördür. Bu bağlamda, hidrojenin güvenli ve verimli bir şekilde taşınmasını sağlayacak dağıtım altyapılarının geliştirilmesi, yakıt ikmal istasyonlarının yaygınlaştırılması ve destekleyici politikaların hayata geçirilmesi büyük önem arz etmektedir (Caldeira & Moro, 2025).

Yılmaz vd. (2024), Türkiye'nin biyo-hidrojen üretim sürecine ilişkin güçlü ve zayıf yönlerini, fırsatlarını ve tehditlerini belirleyebilmek amacıyla SWOT analizi yöntemini kullanmışlardır. Bu analiz kapsamında, Türkiye'nin hidrojen üretimi konusundaki güçlü yönleri arasında; jeopolitik avantajı, doğal kaynak çeşitliliği, Ar-Ge faaliyetlerinin yürütülmesi, kamu desteği ve hem ulusal hem de uluslararası özel sektör yatırımları öne çıkmaktadır. Ancak

bu avantajlara karşın, zayıf yönler olarak sınırlı altyapı kapasitesi, yüksek teknolojik yatırım maliyetleri, nitelikli insan kaynağı eksikliği ve geleneksel enerji kaynaklarıyla rekabetin yarattığı baskılar ön plana çıkmaktadır.

Analize göre, Türkiye'nin biyo-hidrojen sektöründe önemli fırsatlara da sahip olduğu görülmektedir. Bu fırsatlar arasında, küresel pazarda artan ihracat potansiyeli, uluslararası iş birliklerinin gelişmesi, enerji sürdürülebilirliğinin sağlanması, fosil yakıt ithalatının azaltılması, çevresel iyileşmelerin desteklenmesi ve yeni istihdam alanlarının yaratılması sayılabilir. Ancak sektör aynı zamanda bazı tehditlerle de karşı karşıyadır. Bunlar arasında değişken uluslararası talep yapısı, rekabet baskısı, hidrojenin yanıcılığına dayalı güvenlik riskleri ve üretim ekipmanları açısından dışa bağımlılık yer almaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, hidrojen üretiminde çeşitli avantajları bulunmaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütle gibi temiz enerji kaynaklarıyla hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmekte; bu süreç doğrudan emisyonlara veya zararlı yan ürünlere yol açmamaktadır (Dincer & Chaab, 2025). Rüzgâr santralleri ile hidrojen üretim tesisi arasında enerji depolama entegrasyonunun sağlanması, pahalı elektrolizörlerin yüksek kullanım faktörüne göre boyutlandırılmasına ve elektrolizör performansındaki bozulmaların azaltılmasına olanak tanımaktadır (Wang vd., 2024). Güneş enerjisi ile entegre edilmiş hidrojen üretimi, iklim değişikliği ve fosil yakıtların tükenmesi gibi çevresel sorunların azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır (Barghash vd., 2025).

Ülkelerin enerji kaynakları, devletlerin coğrafyasının bir unsurudur. Bu nedenle enerji jeopolitiği, diğer unsurların yanı sıra enerji arz ve talep merkezlerinin konumu, geçiş yolları ve enerji kaynaklarının stratejik değeri gibi faktörlerin etkisini analiz etmektedir. Enerji jeopolitiği, devletin çıkarlarını anlamak amacıyla; ulusal stratejilerin etkinliği ile ekonomik büyüklüğün enerji politikalarına olan etkisini değerlendirmek için kullanılmaktadır (Campos & Fernandes, 2017). Türkiye, stratejik konumu dolayısıyla Avrupa ile Asya arasında bir köprü işlevi görmektedir ve bu özelliği sayesinde bir enerji merkezi olarak hizmet verme potansiyeline sahiptir (Hilali vd., 2024).

Türkiye, Asya ve Avrupa arasında stratejik bir köprü konumunda bulunmasının yanı sıra, sahip olduğu iklimsel çeşitlilik ve doğal kaynak zenginliği sayesinde yenilenebilir enerji üretimi açısından önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar, özellikle yeşil hidrojen üretimi açısından Türkiye'yi potansiyel bir merkez hâline getirmektedir. Ülkenin yüksek güneşlenme kapasitesi, özellikle fotovoltaik sistemlerle su elektrolizi yoluyla hidrojen üretimi için uygun koşullar sağlamaktadır. Başta Antalya olmak üzere

güneş enerjisi açısından verimli bölgelerde bu tür sistemlerin kurulumu teknik ve ekonomik olarak elverişlidir. Benzer şekilde, Türkiye'nin uzun kıyı şeridi boyunca farklı yönlerden esen rüzgarlar, özellikle Aydın ve Muğla gibi bölgelerdeki rüzgar enerjisi santralleri aracılığıyla hidrojen üretimini destekleyebilecek potansiyele sahiptir. Bunun yanı sıra, Türkiye, jeotermal enerji kaynakları açısından da zengin bir ülkedir. Kapadokya ve Pamukkale gibi sıcak su kaynaklarının bulunduğu alanlar, elektroliz yoluyla hidrojen üretiminde jeotermal enerjinin etkin biçimde kullanılabileceği bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, Türkiye'nin akarsu, göl ve çevre denizlerden oluşan su varlığı, hidroelektrik enerji yoluyla dolaylı olarak hidrojen üretimine katkı sunabilecek kapasitededir. Tarım ve ormancılığa dayalı faaliyetler sonucunda ortaya çıkan biyokütle ve organik atıklar, biyolojik süreçlerle hidrojen üretimi için değerlendirilebilecek önemli kaynaklar arasında yer almaktadır. Bu çeşitlilik, Türkiye'nin hem kaynak temelli hem de coğrafi açıdan yeşil hidrojen üretimi için önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Yılmaz vd., 2024).

2.7.Hidrojen Üretimi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Back vd. (2025) tarafından yürütülen çalışmada, İspanya'nın karbonsuzlaşma hedefleri doğrultusunda hidrojen üretiminin potansiyeli analiz edilmiştir. 2040 yılına yönelik planlanan elektrik sistemi, artan yenilenebilir enerji kapasitesiyle simüle edilmiş ve bu sistemin mevsimsel enerji dengesizlikleri oluşturabileceği tespit edilmiştir. İlkbahar, yaz ve sonbahar aylarında toplam 17,33 TWh'lik bir enerji fazlası öngörülmekte olup, bu fazla enerjiyle yaklaşık $4,33 \times 10^9 \text{ m}^3$ hidrojen üretiminin mümkün olduğu belirlenmiştir. Üretilen hidrojenin tamamının depolanabilmesi için yaklaşık 60 tuz mağarasına ihtiyaç duyulmaktadır. Mevcut durumda Torrelavega, Sales de Monzón ve Jumilla/Pinoso bölgelerinde bulunan bu mağaralar hâlihazırda yalnızca tuzlu su üretimi amacıyla kullanılmaktadır. Çalışma, yaz döneminde oluşan fazla elektriğin elektroliz yoluyla hidrojen üretiminde değerlendirilerek, kış aylarında ortaya çıkan 5,69 TWh'lik enerji açığını dengelemede kullanılmasını önermektedir. Bu senaryo, mevsimsel enerji esnekliği açısından hidrojenin kritik bir çözüm aracı olduğunu göstermektedir.

Sanchez vd. (2025), Suudi Arabistan'ın 2030 Vizyonu doğrultusunda planlanan karbonsuzlaşma sürecinde hidrojen üretimini incelemişlerdir. Tatlı su kaynaklarının kısıtlı olduğu ülkede, proton değişim membranlı (PEM) su elektrolizi yöntemi değerlendirilmiş ve tuzdan arındırma sürecinin üretim üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Araştırmada iki yenilenebilir enerji senaryosu incelenmiştir: fotovoltaiik (güneş) sistemler ve kara tipi rüzgar

türbinleri. Bulgulara göre, bu sistemlerle çalışan elektrolizörler aracılığıyla %95'e varan sera gazı azaltımı sağlanabilmektedir. Güneş enerjisiyle üretilen hidrojen için 3,66 kg CO₂ eşdeğeri/kg H₂, rüzgâr enerjisiyle üretilen hidrojen için ise yalnızca 0,76 kg CO₂ eşdeğeri/kg H₂ emisyon değeri rapor edilmiştir. Çalışma, süreç optimizasyonunun ve yenilenebilir kaynak entegrasyonunun, çevresel sürdürülebilirliği sağlama açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Karayel vd. (2023a), Türkiye'de kara ve deniz kökenli yenilenebilir kaynaklara dayalı hidrojen üretim potansiyelini analiz etmiştir. Denizaltı akıntıları dâhil olmak üzere farklı enerji kaynaklarıyla yapılan modelleme sonucunda, Erzurum (13,83 milyon ton), Van (12,81 milyon ton), Konya (12,05 milyon ton) ve Sivas (11,82 milyon ton) illerinin en yüksek üretim potansiyeline sahip bölgeler olduğu belirlenmiştir.

Karayel vd. (2023b) tarafından yürütülen başka bir çalışmada, Türkiye'de hidroelektrik kaynaklara dayalı yeşil hidrojen üretim potansiyeli incelenmiştir. Hidro bazlı üretim konsepti doğrultusunda Türkiye'nin toplam üretim potansiyeli 2,26 megaton/yıl olarak tahmin edilmiştir. En yüksek üretim kapasitelerine sahip iller sırasıyla Şanlıurfa (233,09 kt/yıl), Elazığ (204,92 kt/yıl), Diyarbakır (175,35 kt/yıl), Artvin (157,28 kt/yıl) ve Adana (140,8 kt/yıl) olarak öne çıkmaktadır.

Karayel vd. (2022) ise Türkiye'nin jeotermal kaynaklarını esas alarak yeşil hidrojen üretim potansiyelini değerlendirmiştir. Jeotermal enerjinin verimliliği; kaynakların sıcaklığı, akış hızı ve bileşimi gibi fiziksel özelliklere bağlı olarak değişmektedir. Hidrojen üretiminde alkalın elektrolizörlerin uygun bir yöntem olduğu belirtilmiştir. Türkiye'nin toplam jeotermal kaynaklı hidrojen üretim kapasitesi 559,76 kiloton olarak hesaplanmıştır. En yüksek potansiyele sahip iller arasında Aydın, Manisa ve Denizli yer almaktadır.

Dincer vd. (2022), İstanbul özelinde yapılan çalışmada yeşil hidrojen üretim potansiyelini ilçeler bazında analiz etmiştir. Elektrolizörler aracılığıyla yapılan üretim hesaplamalarında, Çatalca (1,40 milyon ton), Şile (1,19 milyon ton), Silivri (1,12 milyon ton), Arnavutköy (0,57 milyon ton) ve Beykoz (0,46 milyon ton) ilçeleri en yüksek potansiyele sahip bölgeler olarak tespit edilmiştir.

Uysal vd. (2021), deniz ve göl sularının elektroliz yoluyla hidrojen üretimindeki potansiyelini değerlendirmiştir. Karadeniz, Ege Denizi, Marmara Denizi, Akdeniz, Van Gölü, Ağcaşar Barajı, Yeşilirmak ve Kızılırmak gibi kaynaklar incelenmiş; özellikle Marmara Denizi ve Van Gölü,

diğer bölgelere göre daha yüksek hidrojen üretim kapasitesi göstermiştir. Ayrıca, üretim verimliliğinin büyük ölçüde pH değeri ve tuzluluk oranı gibi su kimyasal özelliklerine bağlı olduğu saptanmıştır. Örneğin, Akdeniz suyu, Van Gölü'ne kıyasla yaklaşık %23 daha yüksek hidrojen üretim potansiyeline sahiptir.

Genç vd. (2012) tarafından gerçekleştirilen vaka analizinde, İç Anadolu Bölgesi'ndeki beş lokasyonda rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri kullanılarak hidrojen üretimi ve maliyetleri değerlendirilmiştir. 1300 kW gücünde bir sistemle, yıllık hidrojen üretimi Niğde'de 1665,24 kg H₂ (50 m göbek yüksekliği), Pınarbaşı'nda ise 6288,59 kg H₂ (100 m göbek yüksekliği) olarak ölçülmüştür. Bu veriler, bölgesel rüzgâr profillerinin üretim verimliliği üzerindeki etkisini göstermektedir.

2.8. Türkiye'de Hidrojen Enerjisi: Stratejik Hedefler ve Geliştirilen Projeler

Dünyada hidrojen enerjisi alanındaki en iddialı projelerden biri olan Western Green Energy Hub, Batı Avustralya'nın güneydoğusunda yer alan 15.000 km²'lik bir alanda geliştirilmektedir. Proje tamamlandığında, 50 GW'ın üzerinde hibrit rüzgâr ve güneş enerjisi kapasitesiyle dünyanın en büyük yenilenebilir enerji altyapılarından biri hâline gelmesi hedeflenmektedir. Bu kapasiteyle yılda yaklaşık 3,5 milyon ton sıfır karbonlu yeşil hidrojen üretilenektir. Üretilen hidrojenin; enerji üretimi, madencilik faaliyetleri, uzun menzilli deniz taşımacılığı ve ağır taşıma sektörleri için yeşil türev yakıtların üretiminde kullanılması planlanmaktadır. Ayrıca proje kapsamında rüzgâr ve güneş santralleriyle birlikte elektrolizör sistemlerinin yaygın olarak kurulması öngörülmektedir (Western Green Energy Hub, 2023).

Bununla birlikte, Japonya'da yer alan ve 2020 yılında faaliyete geçen Fukushima Hidrojen Enerji Araştırma Sahası (FH2R), dünyanın en büyük yenilenebilir enerji destekli yeşil hidrojen üretim tesislerinden biri olarak dikkat çekmektedir. Tesis, 10 MW kapasiteli elektrolizör ve 20 MW gücünde güneş enerjisi santrali ile entegre çalışmaktadır. 180.000 m² alana kurulu olan bu yapı, saatte 1.200 Nm³ hidrojen üretim kapasitesine ulaşabilmekte ve tam kapasitede çalıştığında 150 hanenin aylık enerji ihtiyacını veya 560 hidrojen yakıtlı aracı karşılayabilecek miktarda üretim sağlayabilmektedir. Üretilen hidrojen, Fukushima Eyaleti, Tokyo Metropol Bölgesi ve çevresine boru hatları ve özel taşıma sistemleriyle dağıtılmaktadır (NEDO, 2020).

Türkiye'de de hidrojen enerjisine yönelik stratejik planlar ve projeler bulunmaktadır. Türkiye'nin 12. Kalkınma Planı (2024–2028) çerçevesinde,

hidrojen enerjisi teknolojileri stratejik öncelik olarak ele alınmıştır. Ülkenin toplam sera gazı emisyonlarının yaklaşık %70'inin enerji sektöründen kaynaklandığı dikkate alındığında, yeşil hidrojen gibi temiz enerji teknolojilerinin hızla hayata geçirilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Bu kapsamda, 2053 yılı için belirlenen net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda, hidrojenin üretimi, taşınması, depolanması ve sanayide kullanımı için yerli imkânlarla geliştirilecek teknolojilerin ticarileştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca, uluslararası iş birliklerinin artırılması, sektörel analizler ve yerli elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesiyle yeşil hidrojen üretiminin desteklenmesi hedeflenmiştir (Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından belirlenen hedefler doğrultusunda, yerli ve milli elektrolizör üretimi için mevcut eksikliklerin tespiti yapılmış ve özel projelerle bu açıkların kapatılması amaçlanmıştır. Ayrıca, linyit kökenli hidrojen üretimi için gazlaştırma teknolojilerinin geliştirilmesi, organik atıkların değerlendirilmesi ve bu kaynakların verimli şekilde kullanılması öncelikli hedefler arasındadır. Hidrojen üretiminin yenilenebilir enerji santralleriyle entegre edilmesi, böylece iletim maliyetlerinin azaltılması da öngörülmektedir. Bunun yanı sıra, kullanılmayan elektriğin hidrojen olarak depolanmasına olanak tanıyan pilot uygulamalar (örneğin pompaj depolamalı HES) ile enerji arz-talep dengesinin sağlanması ve yenilenebilir enerji yatırımlarının geri dönüş sürelerinin kısaltılması hedeflenmiştir (ETKB, 2023).

Boru hatlarında kullanılacak malzemelerin temini, basınçlı kara taşıtı depolarının ve metal hidrürlü (özellikle bor bazlı) depolama sistemlerinin geliştirilmesi, ayrıca kriyojenik tank teknolojisinin havacılık ve savunma sanayii gibi stratejik sektörlerde kullanılması için destek verilmesi planlanmaktadır. Türkiye'nin mevcut tuz mağaralarının hidrojen depolama amacıyla kullanılabilirliğine yönelik çalışmalar da yürütülmektedir. Son olarak, hidrojenin hem yerli üretim kapasitesi hem de teknoloji ihracatı potansiyeli açısından değerlendirilerek, bu alanda stratejik fırsatların belirlenmesi hedeflenmektedir.

TÜBİTAK (2023) tarafından desteklenen Hidrojen Vadisi Projesi, hidrojenin entegre biçimde üretildiği, depolandığı ve tüketildiği uçtan uca bir model olarak tasarlanmıştır. Projede, sanayide fosil yakıt kullanımının azaltılması öncelikli hedefler arasındadır. Yıllık en az 500 ton yeşil hidrojen üretimi planlanmakta olup, proje yalnızca yeşil hidrojen üretimine değil; aynı zamanda metanol ve amonyak gibi dışa bağımlı kimyasalların yenilenebilir enerji kaynaklarıyla yeşil yöntemlerle üretilmesine de odaklanmaktadır. Güney Marmara Hidrojen Kıyısı Platformu Projesi kapsamında, 30 kW

gücündeki PEM tipi elektrolizör teknolojisinin yerli imkânlarla geliştirilmesi hedeflenmiştir. Üretilen hidrojenin depolanması ve Bandırma üssünde kullanılması planlanmakta; böylece hem teknolojik kapasitenin artırılması hem de sanayiye entegrasyonun sağlanması amaçlanmaktadır.

3.SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada öncelikli olarak, “Türkiye’nin mevcut enerji politikaları, hidrojen enerjisinin üretimi ve lojistiği açısından ne ölçüde yeterlidir?” sorusuna yanıt aranmıştır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) tarafından yayımlanan 2025 yılı verilerine göre, Türkiye’nin toplam kurulu enerji gücü 118.668 MW seviyesindedir. Bu kapasitenin yalnızca %27,2’si hidrolojik (hidroelektrik) kaynaklardan sağlanmakta olup, yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam içindeki payı artış eğilimindedir. ETKB’nin stratejik belgeleri ve 12. Kalkınma Planı (2024–2028) doğrultusunda, hidrojen enerjisi üretimi konusunda yerli ve millî teknolojilerin geliştirilmesi ve hidrojenin enerji arzı içindeki payının artırılması yönünde politikalar benimsenmiştir.

Bu kapsamda yalnızca hidrojenin üretimi değil, aynı zamanda lojistiği, depolanması ve ticarileştirilmesi de politika belgelerinde öncelikli alanlar arasında tanımlanmaktadır. Boru hatlarında kullanılacak malzeme özelliklerinden kara taşıtları için geliştirilecek basınçlı depolama sistemlerine kadar pek çok teknik altyapı unsuru, yürütülmekte olan stratejik projelerin konusu hâline gelmiştir. Bu projeler arasında öne çıkan Hidrojen Vadisi Projesi, Türkiye’nin ulusal hidrojen stratejisini sahada somutlaştıran en kapsamlı girişimlerden biridir. Proje kapsamında, yılda en az 500 ton yeşil hidrojen üretimi hedeflenmekte olup, bu üretimin yerli imkânlarla geliştirilecek PEM tipi elektrolizör sistemleri aracılığıyla gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Bu gelişmelere karşın, mevcut durumda Türkiye’nin hidrojen üretim kapasitesi ve lojistik altyapısı henüz istenen düzeyde değildir. Özellikle büyük ölçekli depolama sistemlerinin eksikliği, elektrolizör üretiminde dışa bağımlılık ve taşımacılık altyapısının sınırlılığı, hidrojenin ticarileşmesi önünde yapısal engeller oluşturmaktadır. Ancak, geliştirilen pilot projeler, sanayi yatırımları ve kamu destekli Ar-Ge faaliyetleri sayesinde, önümüzdeki yıllarda hidrojen üretiminde artış ve bu üretimin lojistik sistemler aracılığıyla iç ve dış pazarlara ulaştırılması mümkün hâle gelebilecektir.

Çalışmada ikinci olarak “Türkiye’nin jeopolitik konumu ve yenilenebilir enerji potansiyeli, hidrojen ekonomisinde stratejik bir avantaj sunmakta mıdır?” sorusu ele alınmıştır. Türkiye’nin Asya ve Avrupa arasında köprü

konumunda bulunması, hidrojenin bölgesel ölçekte üretimi, taşınması ve ihracatı açısından kritik bir jeopolitik avantaj sunmaktadır. Bu stratejik konum, yalnızca coğrafi değil, aynı zamanda diplomatik ve ticari iş birlikleri bakımından da Türkiye'yi hidrojen koridorlarının merkezi hâline getirebilecek potansiyele sahiptir.

Ayrıca, Türkiye'nin sahip olduğu iklimsel çeşitlilik ve yenilenebilir enerji kaynakları hidrojen üretimi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Kıyı bölgelerinde rüzgâr enerjisi potansiyeli oldukça yüksektir ve Aydın, Çanakkale, Muğla gibi illerde kurulmuş rüzgâr santralleri bu potansiyeli desteklemektedir. Aynı şekilde, ülkenin çeşitli bölgelerinde bulunan jeotermal kaynaklar —özellikle Aydın, Denizli ve Manisa'da— hidrojenin elektroliz yoluyla üretimi için uygun enerji kaynakları sunmaktadır. Türkiye'nin zengin su kaynakları ise, hidroelektrik enerji aracılığıyla elektroliz için gerekli enerjinin sürdürülebilir şekilde sağlanmasına imkân tanımaktadır.

Türkiye için bu yerli ve yenilenebilir kaynaklar, yalnızca enerji güvenliğini artırmakla kalmayacak, aynı zamanda hidrojen ihracatı ile ekonomik kazanımlar elde edilmesini de mümkün kılacaktır. Veziroğlu & Türe'ye (2006) göre, hidrojenin yerli kaynaklarla üretilmesi, fosil yakıt ithalatını azaltarak dış ticaret dengesine olumlu katkı sağlayacaktır. Ayrıca, hidrojenin üretimi, dağıtımı ve kullanımı etrafında gelişecek yeni sanayi kolları sayesinde istihdam olanakları artacak, yerli teknoloji üretimi teşvik edilecek ve uzun vadede rekabetçi bir hidrojen ekonomisi inşa edilebilecektir.

Bu çalışma kapsamında, hidrojenin tanımı, üretimi, taşınması ve depolanması gibi temel unsurlar ele alınmış; Türkiye'nin mevcut durumu 12. Kalkınma Planı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın stratejik hedefleri ve Hidrojen Vadisi Projesi çerçevesinde analiz edilmiştir. Türkiye, sahip olduğu iklimsel çeşitlilik ve jeopolitik konumu sayesinde hidrojenin üretimi ve ticarileştirilmesi açısından önemli bir potansiyele sahiptir.

Türkiye'nin hidrojen stratejisi, yalnızca enerji üretimi ile sınırlı kalmamakta; hidrojenin depolanması, taşınması ve ihraç edilmesi gibi tüm aşamaları kapsayan entegre bir yaklaşıma dayanmaktadır. Toplumsal farkındalığın artırılması ve iletişim faaliyetlerinin yaygınlaştırılması da bu sürecin destekleyici unsurları arasında yer almaktadır. Genel olarak değerlendirildiğinde, Türkiye'nin hidrojen politikaları, net sıfır emisyon hedefi, fosil yakıtlardan bağımsızlık ve sürdürülebilir kalkınma vizyonu doğrultusunda somut adımlar içermektedir. Bu adımlar kararlılıkla sürdürüldüğü takdirde, Türkiye'nin enerji güvenliğini sağlaması, teknoloji ihracatçısı konumuna yükselmesi ve yeşil dönüşümde bölgesel liderlik rolü üstlenmesi mümkün olacaktır.

Türkiye'nin hidrojen ekonomisine geçişi, sürdürülebilir kalkınma ve enerji güvenliği açısından çok boyutlu kazanımlar sunabilir. Ancak bu dönüşüm, yalnızca teknik altyapı yatırımlarıyla sınırlı kalmamalı; aynı zamanda enerji politikalarının uygulanabilirliği, mevzuat düzenlemeleri, kamu-özel sektör iş birlikleri ve toplumsal farkındalık düzeyiyle desteklenmelidir. Çalışmada da gösterildiği üzere, hidrojen üretiminde verimliliği etkileyen faktörler arasında uygun elektroliz teknolojilerinin geliştirilmesi, düşük karbonlu enerji kaynaklarının entegrasyonu ve maliyetlerin düşürülmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra, depolama ve taşımacılık sistemlerinin modernize edilmesi, hidrojenin sanayide ve ulaşımda yaygınlaşmasını hızlandıracaktır. Boru hatlarının fiziksel uygunluğu, metallerdeki kırılganlık ve sızıntı riski gibi teknik zorlukların aşılması, hidrojenin güvenli ve sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak konumlandırılabilmesinin ön koşuludur.

Çin, Japonya ve Almanya gibi ülkelerin hidrojen altyapısına yönelik atımları, Türkiye için örnek teşkil etmektedir. Bu doğrultuda Türkiye'nin hedeflerine ulaşabilmesi için küresel iyi uygulamaları izleyerek yerli koşullara uyarlaması ve ileri teknolojiye dayalı üretim-tedarik zincirlerini geliştirmesi gereklidir.

Türkiye'nin hidrojen ekonomisine geçiş sürecinin başarıyla yönetilebilmesi, yalnızca stratejik hedeflerin belirlenmesiyle değil, bu hedeflerin somut adımlarla desteklenmesiyle mümkün olacaktır. Bu bağlamda, ilk olarak Ulusal Hidrojen Stratejisi kapsamında belirlenen politika hedeflerinin yalnızca belge düzeyinde kalmaması; uygulamaya geçirilmeleri, performans göstergeleriyle izlenmeleri ve düzenli olarak gözden geçirilmeleri büyük önem taşımaktadır. Stratejilerin etkinliği, merkezi ve yerel düzeyde koordinasyonun sağlanması ve özel sektörle güçlü iş birliklerinin kurulmasıyla artırılabilir.

Özellikle yerli elektrolizör teknolojilerinin geliştirilmesi, hidrojen üretiminde dışa bağımlılığın azaltılması açısından kritik bir önceliktir. Bu amaçla üniversiteler, araştırma kurumları ve özel sektörün dahil olduğu kamu destekli Ar-Ge programları yaygınlaştırılmalı; TÜBİTAK, KOSGEB ve Kalkınma Ajansları gibi kurumlar aracılığıyla teknoloji geliştirme projeleri teşvik edilmelidir. Yerli üretimin yanı sıra teknoloji transferi anlaşmaları ve uluslararası ortak Ar-Ge projeleri de bu süreci destekleyecek araçlar arasında yer alabilir.

Boru hattı altyapısının hidrojen taşımaya uyumlu hâle getirilmesi bir diğer temel ihtiyaçtır. Mevcut doğalgaz boru hatlarının hidrojen taşıma kapasiteleri açısından teknik uygunluklarının değerlendirilmesi ve gerekli modifikasyonların yapılması, büyük ölçekte ve maliyet etkin hidrojen

taşımacılığı açısından hayati öneme sahiptir. Bu çerçevede, özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamındaki hidrojen koridorları ile entegrasyon sağlanması, Türkiye'nin ihracat kapasitesini doğrudan etkileyebilir.

Hidrojenin güvenli ve uzun süreli depolanması ise, enerji arz-talep dengesinin sağlanması için vazgeçilmezdir. Bu nedenle metal hidrit, kimyasal bileşikler ve kriyojenik tank sistemleri gibi gelişmiş depolama teknolojilerine yatırım yapılmalı; bu sistemlerin yerli üretimi ve sertifikasyonu için gerekli teşvik mekanizmaları oluşturulmalıdır. Türkiye'de bulunan doğal tuz mağaralarının hidrojen depolama amaçlı kullanımı konusunda pilot uygulamalara başlanması, bu alandaki teknik yeterliliklerin gelişmesine katkı sağlayacaktır.

Ayrıca, bölgesel pilot projelerin hayata geçirilmesi, hidrojen teknolojilerinin farklı iklim ve altyapı koşullarında uygulanabilirliğinin test edilmesini sağlayacaktır. Özellikle Konya, Erzurum, Van ve Şanlıurfa gibi yüksek yenilenebilir enerji potansiyeline sahip iller, bu tür uygulamalara öncülük edebilecek niteliktedir. Bu bölgelerde kurulacak küçük ölçekli entegre hidrojen üretim, depolama ve kullanım tesisleri, ulusal düzeyde yaygınlaştırılacak modellerin geliştirilmesine katkı sunacaktır.

Bununla birlikte, hidrojen ekonomisinin gelişmesi yalnızca teknik değil, aynı zamanda insan kaynağı ve toplumsal farkındalık ile de doğrudan ilişkilidir. Bu doğrultuda üniversiteler, meslek yüksekokulları ve kamu kurumlarının iş birliğinde hidrojen teknolojilerine yönelik eğitim programları oluşturulmalı; teknik ve mesleki eğitimlerin yanı sıra kamuoyunu bilinçlendirmeye yönelik yaygın iletişim kampanyaları yürütülmelidir. Eğitim içerikleri, hidrojenin temel fiziksel-kimyasal özelliklerinden güvenlik önlemlerine kadar çok yönlü hazırlanmalı ve uygulamalı laboratuvar çalışmalarıyla desteklenmelidir.

Türkiye'nin hidrojen stratejisi yalnızca iç pazarı hedeflemekle sınırlı kalmamalı, aynı zamanda ihracat odaklı bir perspektifle şekillendirilmelidir. Özellikle Avrupa Birliği'nin yeşil dönüşüm hedefleri doğrultusunda artan hidrojen talebi dikkate alınarak, Türkiye'nin yeşil hidrojen üretim kapasitesi Avrupa pazarlarına entegre edilmelidir. Bu amaçla, yeşil hidrojen ihracatına yönelik ticaret anlaşmaları, altyapı ortaklıkları ve lojistik iş birlikleri geliştirilmelidir. Türkiye, bu sayede yalnızca enerji ithalatçısı değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji ihracatçısı konumuna yükselerek bölgesel bir enerji merkezi hâline gelebilir.

Gelecekte yapılacak çalışmaların, hidrojen üretim tesislerinin nerede ve neden kurulması gerektiği üzerine odaklanması, hidrojenin Türkiye açısından taşıdığı stratejik önemi daha somut bir biçimde ortaya koyacaktır.

Kaynakça

- Ajanovic, A. (2008). On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(16), 4223–4234.
- Akpasi, S. O., Smarte Anekwe, I. M., Tetteh, E. K., Amune, U. O., Mustapha, S. I., & Kiambi, S. L. (2025). Hydrogen as a clean energy carrier: advancements, challenges, and its role in a sustainable energy future. *Clean Energy*, 9(1), 52-88.
- Aziz, M. (2021). Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety. *Energies*, 14(18), 5917.
- Back, C., González-Morán, L., & Iranzo, A. (2025). Green hydrogen from renewable surplus: Production and storage potential in Spain's 2040 energy horizon. *International Journal of Hydrogen Energy*, 140, 2-10.
- Barghash, H., AlRashdi, Z., Okedu, K. E., & Hasoon, F. N. (2025). Assessing Environmental Benefits of Green Hydrogen Production from Sewage Treatment Plants Considering Solar PV PEM Electrolysis. *Results in Engineering*, 105559. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105559>
- Benjelloun, A., & Crainic, T. G. (2008). Trends, challenges, and perspectives in city logistics. In *Transportation and Land Use Interaction Proceedings TRANSLU* (Vol. 8, pp. 269–284).
- Bozdağlıoğlu, Y. E., & Keşir, B. (2022). Türkiye'de lojistik sektörünün dış ticarete etkisi. *İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi*, 10(1), 1–17.
- Burke, A., Ogden, J., Fulton, L., & Cerniauskas, S. (2024). *Hydrogen storage and transport: Technologies and costs*.
- Caldeira, R., & Infante-Moro, A. (2025). Strategic hydrogen management: driving a sustainable energy future. *Frontiers in Energy Research*, 13, 1540396.
- Campos, A., & Fernandes, C. P. (2017). The geopolitics of energy. In *Geopolitics of energy and energy security* (pp. 23–40). Instituto da Defesa Nacional.
- Chen, P., & Zhu, M. (2008). Recent progress in hydrogen storage. *Materials Today*, 11(12), 36–43. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(08\)70315-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(08)70315-3)
- Chen, Z., Zhao, Y., Jia, Y., Zheng, X., Shao, G., Li, Y., ... & Gu, C. (2025). The impacts of the hydrogen economy on climate: Current research and future projections to 2050. *International Journal of Hydrogen Energy*, 119, 204–217.
- Cipriani, G., Di Dio, V., Genduso, F., La Cascia, D., Liga, R., Miceli, R., & Galluzzo, G. R. (2014). Perspective on hydrogen energy carrier and its automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16), 8482–8494. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.03.092>

- Çolak, E., Aksoy, H., & Sanlı, B. (2021). *Türkiye'nin yeşil hidrojen üretim ve ihracat potansiyelinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesi*. SHURA Enerji Dönüşüm Merkezi
- Dincer, I., Javani, N., & Karayel, G. K. (2022). Sustainable city concept based on green hydrogen energy. *Sustainable Cities and Society*, 87, 104154.
- Dincer, M., & Agelin-Chaab, M. (2025). Sustainability analysis of electrolysis based green hydrogen production pathways: A life cycle perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 138, 617-625.
- Dunn, S. (2001). *Hydrogen futures: toward a sustainable energy system*. Worldwatch Paper 157, Worldwatch Institute, Washington, DC.
- Elgowainy, A., & Reddi, K. (2024). *Hydrogen delivery scenario analysis model (HDSAM) V4.5*. Argonne National Laboratory.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2023). *Türkiye hidrojen teknolojileri stratejisi ve yol haritası*. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. <https://www.enerji.gov.tr/>.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB). (2025). *Elektrik – Nisan 2025 kurulu güç verileri*. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>.
- Erdoğan, A., Geçici, E., & Güler, M. G. (2024). Hidrojen lojistiğine genel bakış ve Türkiye'deki durum. *Makina Mühendisleri Odası Yayını*.
- Genç, M. S., Çelik, M., & Karasu, İ. (2012). A review on wind energy and wind-hydrogen production in Turkey: A case study of hydrogen production via electrolysis system supplied by wind energy conversion system in Central Anatolian Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(9), 6631–6646.
- Gün, D. (2007). *Hava kargo pazarının lojistik açıdan değerlendirilmesi ve Türkiye için durum analizi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Anadolu Üniversitesi
- Hamzaçebi, C. (2007). Forecasting of Turkey's net electricity energy consumption on sectoral bases. *Energy Policy*, 35(3), 2009–2016.
- Hilali, İ., Işiker, Y., & Ulker, N. (2024). The hydrogen perspective for Türkiye, which is on the Asia-Europe energy transition route. Can Türkiye become hydrogen hub?. *International Journal of Hydrogen Energy*, 75, 88-97.
- International Energy Agency. (2024). *Global Hydrogen Review 2024*. Uluslararası Enerji Ajansı. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- Irmak, E., & Pelit, İ. (2020). Türkiye'de lojistik sektörünün değerlendirilmesi (2000-2018). *Turkish Studies Economy*, 15(3), 1397-1415.
- Jorschick, H., Preuster, P., Bösmann, A., & Wasserscheid, P. (2021). Hydrogenation of aromatic and heteroaromatic compounds—a key process for future logistics of green hydrogen using liquid organic hydrogen carrier systems. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(5), 1311–1346.

- Karayel, G. K., Javani, N., & Dincer, I. (2022). Effective use of geothermal energy for hydrogen production: A comprehensive application. *Energy*, 249, 123597.
- Karayel, G. K., Javani, N., & Dincer, I. (2023a). Green hydrogen production potential in Turkey with wind power. *International Journal of Green Energy*, 20(2), 129–138.
- Karayel, G. K., Javani, N., & Dincer, I. (2023b). Hydropower for green hydrogen production in Turkey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(60), 22806–22817.
- Momirlan, M., & Veziroğlu, T. N. (2002). Current status of hydrogen energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(1–2), 141–179.
- New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation, Tohoku Electric Power Co., Inc., & Iwatani Corporation. (2020, March 7). The world's largest-class hydrogen production, Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) now is completed at Namie town in Fukushima. NEDO. https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html
- Nunes, P., Oliveira, F., Hamacher, S., & Almansoori, A. (2015). Design of a hydrogen supply chain with uncertainty. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(46), 16408–16418.
- Oğuz, İ. H., & Oğuz, D. (2020). Türkiye ekonomisinde lojistik. *International Journal of Business and Economic Studies*, 1(2), 65–74.
- Osman, A. I., Abd-Elaziem, W., Nasr, M., Farghali, M., Rashwan, A. K., Hamada, A., & Elsheikh, A. H. (2024). Enhanced hydrogen storage efficiency with sorbents and machine learning: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(4), 1703–1740.
- Raj, A., Larsson, I. A. S., Ljung, A.-L., Forslund, T., Andersson, R., Sundström, J., & Lundström, T. S. (2024). Evaluating hydrogen gas transport in pipelines: Current state of numerical and experimental methodologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.140>
- Rosen, M. A., & Koochi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: An overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1, 10–29.
- Sanchez, V. H., Okeke, I. J., Singh, E., Baaqel, H., Saville, B. A., MacLean, H. L., & Sarathy, S. M. (2025). A life cycle assessment of e-hydrogen production using proton-exchange membrane water electrolysis coupled with desalination in Saudi Arabia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 139, 792–805.

- Sharma, S., & Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151–1158.
- Solomon, B. D., & Banerjee, A. (2006). A global survey of hydrogen energy research, development and policy. *Energy Policy*, 34(7), 781–792.
- Staffell, I., Scamman, D., Abad, A. V., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., ... & Ward, K. R. (2019). The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491.
- Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *On İkinci Kalkınma Planı (2024–2028)*. T.C. Cumhurbaşkanlığı. <https://www.sbb.gov.tr/kalkinma-planlari/>
- Sukurova, N., et al. (2023). *Ukrainian Hydrogen Export Potential: Opportunities and Challenges in the Light of the Ongoing War*. Fraunhofer ISI.
- Timalsina, S., Zhang, C., Kumar, D., & Holubnyak, E. (2025). Optimizing hydrogen transportation infrastructure and supply chain under uncertainty: An integrated mixed integer linear programming and real options analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 111, 635–647.
- Tunç, M., & Solmaz, R. (2025). Occupational health and safety assessment of hydrogen transport by trucks. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.073>
- Tunçbilek, Ö. F. (2024). Hidrojen enerjisi ve çevresel etkileri üzerine değerlendirilmeler. *Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 15(2), 189–197.
- Tutar, E., Tutar, F., & Yetişen, H. (2009). Türkiye’de lojistik sektörünün gelişmişlik düzeyinin seçilmiş AB Ülkeleri (Romanya ve Macaristan) ile karşılaştırmalı bir analizi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 2009(2), 190–216.
- TÜBİTAK. (2023). *Türkiye’nin ilk hidrojen vadisi ve Türkiye’nin en büyük kapasiteli ilk yerli yeşil hidrojen tesisi kuruluyor*. <https://tubitak.gov.tr/tr/haber/turkiyenin-ilk-hidrojen-vadisi-ve-turkiyenin-en-buyuk-kapasiteli-ilk-yerli-yesil-hidrojen-tesisi-kuruluyor>
- Türkiye Karayolu ve Demiryolu Taşımacılığı Sektör Araştırması Raporu (2023). *Uluslararası Taşımacılık İşçileri Federasyonu*. https://turkey.fes.de/fileadmin/user_upload/Türkiye-kara-demiryolu-arastirma-2023.pdf
- Uysal, S., Kaya, M. F., Demir, N., Hüner, B., Özcan, R. U., Erdem, Ö. N., & Yılmaz, M. (2021). Investigation of hydrogen production potential from different natural water sources in Turkey. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(61), 31097–31107.
- Veziroğlu, N., & Türe, E. (2006). 21. yüzyılın enerjisi: Hidrojen enerji sistemi. In *Türkiye 10. Enerji Kongresi*, İstanbul, Türkiye.
- Veziroğlu, T. N., & Şahi, S. (2008). 21st Century’s energy: Hydrogen energy system. *Energy conversion and management*, 49(7), 1820–1831.

- Wallington, T. J., Woody, M., Lewis, G. M., Keoleian, G. A., Adler, E. J., Martins, J. R. R. A., & Collette, M. D. (2025). Hydrogen as a sustainable transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217, 115725.
- Wang, Z., Wang, H., Sant, T., Zhao, Z., Carriveau, R., Ting, D. S., ... & Xiong, W. (2024). Subsea energy storage as an enabler for floating offshore wind hydrogen production: Review and perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, 71, 1266-1282.
- Western Green Energy Hub. (2023). *Green energy from Mirning traditional lands* (Case study). <https://wgeh.com.au/>.
- Yang, X., Zhang, Y., Li, H., & Wang, S. (2025). *Life cycle assessment of green hydrogen production from renewable sources: A global perspective*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113456.
- Yilmaz, G., Sadvakasova, A. K., Kossalbayev, B. D., Bauenova, M. O., Zhar-mukhamedov, S. K., Ziyayeva, G. K., ... & Allakhverdiev, S. I. (2024). Hydrogen energy development in Turkey: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 52, 1304-1311.
- Zhang, Y. H., Jia, Z. C., Yuan, Z. M., Yang, T., Qi, Y., & Zhao, D. L. (2015). Development and application of hydrogen storage. *Journal of Iron and Steel Research International*, 22(9), 757-770.
- Zhu, Y., Keoleian, G. A., & Cooper, D. R. (2025). The role of hydrogen in decarbonizing US industry: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 214, 115392.