



# Yeşil Hidrojen Üretimi ve İhracatı Açısından Balıkesir'in Potansiyelinin Değerlendirilmesi

## *Evaluating Balıkesir's Potential for Green Hydrogen Production and Export*

Sevgi SEZER<sup>1</sup>

### Öz

Bu çalışma, Balıkesir ilinin yeşil hidrojen üretimi ve ihracatı için bir merkez olma potansiyelini değerlendirerek, onu Türkiye'nin yenilenebilir enerjide lider olma yönündeki daha geniş stratejisi içerisine yerleştirmektedir. Coğrafi, ekonomik ve teknolojik analizlerden yararlanan bu çalışma, Balıkesir'i yeşil hidrojen tesislerinin, özellikle de rüzgâr ve güneş enerjisi gibi bol yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi için uygun bir yer haline getiren temel faktörleri belirlemektedir. Araştırma, bölgedeki yeşil hidrojen projelerinin fizibilitesini etkileyen altyapı, politika ortamını ve yatırım eğilimlerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bulgular, Balıkesir'in hem yerel hem de küresel olarak hidrojen dağıtımını kolaylaştıran önemli endüstriyel pazarlara ve ihracat limanlarına yakınlığı da dâhil olmak üzere stratejik faydalarını vurgulamaktadır. Ancak yapılan literatür taramasında, bu faydaların gerçekleşmesi için önemli miktarda mali harcama gerekliliği ve özel teknoloji ve yeteneklerin geliştirilmesi gibi önemli engelleri tespit etmiştir. Ayrıca büyüyen hidrojen ekonomisini desteklemek için gereken düzenleyici değişiklikleri analiz etmiştir. Bu çalışma, Balıkesir'in yeşil hidrojene geçişi için düzenleyici öneriler ve iş birliği modelleri de dâhil olmak üzere bir yol önererek sürdürülebilir enerji üretimine ilişkin bilimsel söyleme katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda yatırımcılara ve düzenleyicilere hidrojen teknolojisinin bölgesel bağlamlarda ölçeklenebilirliği konusunda faydalı bilgiler de sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** İhracat Potansiyeli, Sürdürülebilir Kalkınma, Yeşil Hidrojen, Yenilenebilir Enerji

### ABSTRACT

This study evaluates the potential of Balıkesir Province to become a hub for green hydrogen production and export, situating it within Türkiye's broader strategy to lead in renewable energy. Utilizing geographic, economic, and technological analyses, the research identifies the key factors that make Balıkesir an ideal location for the development of green hydrogen facilities, particularly through abundant renewable energy sources like wind and solar power. The study aims to assess the infrastructure, policy environment, and investment trends that affect the feasibility of green hydrogen projects in the region. The findings highlight Balıkesir's strategic advantages, including its proximity to significant industrial markets and export ports that facilitate hydrogen distribution both locally and globally. However, the literature review identifies major challenges, such as the need for substantial financial investments and the development of specialized technologies and skills to realize these benefits. Additionally, it examines the regulatory changes necessary to support the growing hydrogen economy. By proposing a roadmap for Balıkesir's transition to green hydrogen, including regulatory recommendations and collaboration models, this study contributes to the scientific discourse on sustainable energy production. It also provides valuable insights for investors and regulators regarding the scalability of hydrogen technology within regional contexts

**Keywords:** Export Potential, Sustainable Development, Green Hydrogen, Renewable Energy

<sup>1</sup> Corresponding Author: Prof. Dr., Balıkesir Üniversitesi Burhaniye Uygulamalı Bilimler Fakültesi, [sevgi.sezer@balikesir.edu.tr](mailto:sevgi.sezer@balikesir.edu.tr), ORCID: 0000-0001-6958-3329.



## GİRİŞ

Günümüzde nüfusun hızlı büyümesi nedeniyle enerji talebi giderek artmaktadır. Büyüyen insan nüfusunun enerji ihtiyacının, atmosferi koruma ve yıkıcı iklim değişikliklerini önleme acil ihtiyacı çerçevesinde temiz kaynaklar lehine geliştirilmesi açısından çeşitli kaynakları gerektireceği inkâr edilemez bir durumdur. Yirmi birinci yüzyılın en iyi alternatif ve verimli enerji kaynağı, doğada kolayca bulunabilmesi ve çok çeşitli uygulamalara sahip olması nedeniyle temiz enerjidir. Sürdürülebilir kaynaklar, zararlı kirleticilere, sera etkisine ve ozon tabakasının tükenmesine neden olan kloroflorokarbon (CFC) emisyonlarını engellemek açısından umut vaat etmektedir. Yenilenebilir enerjinin, erişilmesi kolay olmasına rağmen maruz kaldığı düşük verimlilik ve yüksek başlangıç tesis maliyetleri gibi birçok engeller, küresel bakımdan her geçen gün yürütülen araştırma ve geliştirme çalışmaları sayesinde azaltılmakta ve verimlilik artırılmaktadır.

Yenilenebilirlik, yeniden doldurulabilir veya yeniden üretilebilir ve geri kazanılabilir kapasite anlamına gelir. Kullanımla tükenmeyen enerji, yenilenebilir enerji olarak bilinir. Üretilen enerji doğrudan kullanılabilir veya bataryalarda depolanabilmektedir. Yenilenebilir enerji, çeşitli kaynaklardan farklı yöntemlerle farklı enerji formlarını toplayarak üretilebilmektedir. Bazı yenilenebilir enerji kaynakları güneş, rüzgâr, biyokütle, hidroelektrik, jeotermal, gelgit ve diğerleri olarak sıralanabilir (Sattar vd., 2020: 6042-6042).

Yenilenebilirlerde devam eden yenilikleri ve ekolojik davranışları takip etme taleplerini göz önünde bulundurarak, şirketler de enerji sektöründe iyileştirmeler yapmaya teşvik edilmektedir. Özellikle otomobil endüstrisindeki şirketler, sürdürülebilir üretim uygulamalarını benimsemeye başlamıştır (Pechancová, 2017: 537-539).

Yenilenebilir enerji kaynakları, sera gazı azaltımında önemli bir katkı sağlamaktadır. Elektrikli ve hibrit araçlardaki yenilikler, otomobil üreticilerinin işlerini nasıl yürüttükleri, işlerini nasıl yönettikleri ve uzun vadeli stratejilerini nasıl planladıkları konusunda yeni pazar trendini yansıtmaktadır (Isac, 2019: 1-2).

Son yıllarda, fotovoltaik teknolojiler alanındaki son araştırma ve gelişmeler sayesinde hibrit ve elektrikli araçları güçlendirmek için güneş enerjisinden yararlanma girişimleri artmıştır (Rizzo, 2010: 174-175). Günümüzde güneş enerjisi, ısı ve elektrik üretimi için başlıca kullanılmaktadır ancak tahminlere göre 21. yüzyılın ortalarında dünya enerji ihtiyacının yaklaşık %45'i güneş paneli kurulumları tarafından karşılanabilecektir. Ayrıca, güneş termal enerjisi sanayi uygulamalarında önemli bir yer kazanmıştır. Bize, güç üretmek, alanları ısıtmak veya hatta kimyasalları işlemek için alternatif bir yol sunmaktadır. Gıda işleme endüstrisinde, inşaat sektöründe, imalat sektöründe ve birçok işletmede çeşitli uygulamaları vardır. Öte yandan, güneş ışınlarından üretilen elektrik, birçok sanayi ve evsel ihtiyacı karşılayabilecektir (Mekhilef vd., 2011: 1779-1781).

Günümüzde dünya enerjisinin %80'den fazlası yenilenebilir olmayan kaynaklardan üretilmektedir. Enerji kaynaklarının değiştirilmesi ihtiyacı, 20. yüzyıl ortalarında nükleer enerjinin keşfi ile ertelendi; bu, fosil yakıtlardan 20 kat daha fazla enerji üretebilme potansiyeline sahiptir. Ancak, daha fazla güç üretme potansiyeli ve kapsamına rağmen, sadece büyük ölçekli güç üretimi mümkün olduğu, toryum ve uranyum cevherlerinin de fosil yakıtlar olduğu gibi sınırlamalar nedeniyle kullanılmamaktadır. Bu nedenle, insanların fosil yakıtlara bağımlı kalmadan sürekli hayatta kalabilmeleri için yerel ve küçük ölçekli uygulamalar için mevcut doğru seçenek yenilenebilir enerjidir.

21. yüzyılda artan enerji talebi kaçınılmazdır. Talepteki bu artış, çevreye yönelik şüpheli ve bilinen tehditlerin miktarını artıracaktır. Küresel elektrik ihtiyacının 2060 yılına kadar %50 artarak yeni bir zirveye ulaşması beklenmekte ve geleneksel olmayan kaynakların küresel enerji üretimine önemli bir katkıda bulunacak sürdürülebilir bir kaynak olma potansiyeline sahip olduğu öngörülmektedir (Abulfotuh, 2007: 275-277).

Enerji, ulusların sosyal ve ekonomik kalkınma hedeflerine ulaşmada kesişen bir faktör olarak algılanmaktadır (Şener vd., 2018: 2335-2336). Elektrik, yemek pişirme, soğutma, ısıtma ve günlük

yaşamda önemli olan birçok ürünün üretimi için gerekli olduğundan, insanların yaşam koşullarını yükseltmek için enerji hayati bir gerekliliktir. Sürdürülebilir bir enerji sisteminin temel özelliği, kaynakları tüketmeden gerekli tesisleri sunma yeteneğidir. Böyle bir strateji oluşturmanın ilk yaklaşımı, mevcut kaynakların verimli kullanımını artırarak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını en üst düzeye çıkarmaktır (Reddy ve Painuly, 2004: 1431-1433). Yenilenebilir olmayan kaynaklardan yenilenebilir enerjiye geçiş, sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlerken öncelikli husus olmalıdır. Yenilenebilir kaynaklar, tekrar tekrar elektrik üretmek için kullanılacak varlıklardır, örneğin rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi, hidroelektrik vb. Yenilenebilir enerji, sürdürülebilir kalkınmanın temel bir bileşenidir (Amer ve Daim, 2011: 420).

Ekonomiler, endüstriyel sektörde yenilenebilir enerji için bir yol haritası oluşturmaya karar vermiştir (Taibi vd., 2012: 735). 2006 yılında, yeşil enerji için güçlü pazar sübvansiyonları ile tanınan Almanya, yenilenebilir sektörde toplam 21.6 milyar avro ciro ve çoğunlukla son 10 yılda güçlü yerel enerji politikaları altında üretilen yaklaşık 200.000 iş imkânı göstermiştir. Yeni enerji gelişmeleri ve kaynakları karşılığında büyüyen pazarlarda iş ve ihracat fırsatları yaratmaktadır. Yükselen enerji teknolojilerini teşvik etmek için çeşitli stratejiler vardır. Strateji seçimini etkileyebilecek birkaç faktör vardır, örneğin mevcut kaynaklar, endüstrilerin durumu, inovasyon sistemi vb. Yerel pazarları geliştirme meselesi, sonunda küresel ihracatlara katkıda bulunabilecek yerel endüstrileri güçlendirmek olarak da önemli bir faktör olarak ortaya çıkmıştır (Lund, 2009: 53-54).

Termik santraller sosyal sürdürülebilirlik açısından oldukça önemlidir ve mevcut en uygun teknolojilerle birlikte geliştirilmeli ve işletilmelidir. Santralin çıkışı, üretilen gücün frekansı ve voltajı gibi parametrelerle ilişkilidir ve uygun standartlara göre karşılaştırılır. Elektrik, herhangi bir ülkenin sosyo-ekonomik büyümesine bağlı temel bir altyapıdır (Choudhary ve Shankar, 2012: 510-511). Son yıllarda, güneş termal santralleri önemli endüstriyel ve teknolojik büyüme kaydetmiştir. Bu santraller, sıvıları ısıtmak ve elektrik üretmek için güneşin radyasyonundan yararlanır (Aragonés-Beltrán vd., 2014: 222-223). Bu teknolojinin büyüme aşamasında olması, maliyetlerinin gelecekteki olası düşüşü ve başarısı, yatırım firmaları için arzu edilen bir beklenti haline getirir (Caldés vd., 2009: 1628-1630).

Fosil yakıtların tüketimi hızla artmaktadır; bu da gelişmekte olan ülkelerin sanayi devrimi, küresel nüfus artışı ve yaşam kalitesindeki değişikliklerle birlikte gerçekleşmektedir (Panwar vd., 2011: 1513-1514). Fosil yakıtların sürdürülemez kullanımının, fosil yakıt kaynaklarının azalma oranındaki artışa katkıda bulunmanın yanı sıra, atmosfere büyük olumsuz etkileri olduğu ve sağlık tehditlerinin artmasına ve küresel ısınma ile iklim değişikliğine katkıda bulunduğu daha önce gösterilmiştir (Farhad vd., 2008: 2-3). Yenilenebilir enerji teknolojileri (RET), enerji piyasasını karbonsuzlaştırmanın ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmanın mümkün yollarından biri olarak kabul edilmektedir (Farhad vd., 2008: 1; Özcan, 2018: 2629-2630; Al Irsyad vd., 2017).

Küresel nüfus ve ekonomik büyüme genişlemeye devam ediyor ve artan kentleşme, enerji tüketimini önemli ölçüde artırmıştır. Geleneksel enerji üretim yöntemi, bulunması ve çıkarılması açısından sınırlı olan ve sonlu olan petrol ve gaz enerjisini kullanmaktadır (Dicks ve Rand, 2018). Endüstrileşme başladığından beri fosil yakıtların yakılması sonucu CO2 emisyonları sürekli olarak artmaktadır (Boudellal, 2023). Uzun vadeli enerji sürdürülebilirliği ve istikrarını sağlamak amacıyla, dünya yenilikçi, temiz ve yenilenebilir enerjilerin kullanımına odaklanarak enerji üretimi ve taşımacılık sektörlerinde karbon salınımını azaltmayı hedeflemektedir. Sürdürülebilir bir geleceğe geçiş, bol miktarda yenilenebilir enerji kaynağı gerektirmektedir (Gielen vd., 2019: 38-40).

Yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrikle suyun elektrolizi yoluyla üretilen yeşil hidrojen, taşımacılık, sanayi ve ısıtma dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde karbon salınımını azaltma hedefine ulaşmada kilit bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır (Çelebi vd., 2021: 1-2; Pradhan vd., 2024: 1-6). Geleneksel hidrojen üretim yöntemlerinin aksine, fosil yakıtlara dayanmayan yeşil hidrojen üretimi, gelecekteki temiz enerji sistemlerinin temel taşıdır ve karbon dioksit salımı yapmaz. Avrupa Birliği, hidrojeni bir enerji taşıyıcısı olarak potansiyelini tanımış ve iklimden bağımsız bir ekonomi için stratejik uzun vadeli vizyonuna dâhil etmiştir (Avrupa Komisyonu, 2020).

Yüzde yüz yenilenebilir enerjiye geçiş, bu kaynakların değişken ve aralıklı doğası nedeniyle engellenmektedir. Bu zorluklara yanıt olarak, Yeşil Hidrojen, arzu edilen özellikleri nedeniyle geleceğin karbonsuz ve sürdürülebilir enerji sistemlerinde kritik bir bileşen olarak küresel olarak ortaya çıkmıştır. Bunlar arasında yüksek kütle-enerji yoğunluğu, hafif yapısı ve kolay elektrokimyasal dönüşümü bulunmaktadır. Bu özellikler, Yeşil Hidrojen'in boru hatları aracılığıyla uzun mesafelere taşınması veya amonyak gibi sıvı yakıtlar formunda kargo gemileriyle taşınması için uygun olmasını sağlar (Oliveira vd., 2021).

Yeşil Hidrojen, çeşitli sektörlerde uygulama bulmaktadır; kimyasal hammadde olarak, ısı kaynağı olarak, sentetik yakıt üretimi için reaktan olarak ve yakıt hücreleri aracılığıyla elektrik üretimi için kullanılmaktadır. Ayrıca, Yeşil Hidrojen, uzun süreler boyunca tanklarda veya yeraltı mağaralarında depolanabilir, bu da onu farklı mevsimlerde enerji depolayabilen birkaç yenilenebilir teknolojiye biri yapar (Tarkowski, 2019: 86-87).

Bu nedenle Yeşil Hidrojen, sera gazı emisyonlarını azaltmaya, yenilenebilir enerjinin etkin bir şekilde entegre edilmesine, depolanmasına ve fazla gücün kullanılmasına katkıda bulunan daha temiz ve daha sürdürülebilir bir enerji taşıyıcısı olarak enerji tartışmasının ön saflarında yer almaktadır (Schrotenboer vd., 2022).

Dünya genelinde hükümetler, endüstriler ve topluluklar, mevcut enerji kaynaklarını tamamlayacak şekilde H<sub>2</sub>'yi devreye alma çabalarını yoğunlaştırmaktadır. Küresel olarak, H<sub>2</sub> üretimi nükleer güç, fosil yakıtlar ve yenilenebilir kaynaklar dâhil olmak üzere çeşitli kaynaklardan, çeşitli ham maddeler kullanılarak ve çeşitli süreçler ve teknolojiler aracılığıyla gerçekleştirilebilir.

Yeşil hidrojen, enerji depolama ortamı, enerji vektörü ve taşımacılık, sanayi ve diğer uygulamalar için yakıt olarak gelecek enerji piyasası için en uygun seçim olarak kabul edilmektedir. Son yirmi yılda, yeşil hidrojen teknolojilerinin geliştirilmesine artan çabalar sarf edilmiş olmasına rağmen, hala bu teknolojinin büyük ölçekli uygulamasında yaşanan gecikmeler ve pazarın durgunluğunu haklı çıkaran bir dizi sorun mevcuttur. Sera gazı emisyonlarını azaltmak ve enerji piyasasının fosil yakıtlara olan bağımlılığını düşürmek amacıyla, dünya genelindeki çoğu ülke, enerji geçişini sağlamak ve dış kaynaklara olan bağımlılıklarını azaltmak için yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine odaklanmaktadır. Bu çabalar, yeşil elektriğin artan bir paya sahip olması ve yeşil hidrojenin kademeli olarak tanıtılmasıyla sonuçlanacaktır. Kalan biyokütleden biyogaz ve hidrojen üretmek mümkün olsa da diğer yenilenebilir enerji kaynak formları (hidrolik, güneş, rüzgâr, jeotermal, deniz dalgaları ve gelgit akıntıları gibi) kolaylıkla elektrik veya ısıya dönüştürülebilir (Lui vd., 2020; Lepage vd., 2021; Şimşek vd., 2024:10846-10848).

Özellikle, fotovoltaik (PV) ve rüzgâr, büyük ölçekli uygulama ve enerji üretim potansiyeli açısından en uygun ve maliyet etkin teknolojiler olarak kabul edilir ve bu, enerji karışımı içinde sürekli ve önemli bir büyümeye yol açmıştır. Ne yazık ki hem fotovoltaik hem de rüzgâr enerjisi üretimi, konum ve hava koşullarına büyük ölçüde bağımlıdır. Bu kısıtlamalar, sıklıkla enerji arzı ve talebinin zamanlamasının uyuşmaması sorununu ortaya çıkarmaktadır (Gan vd., 2020; Kockel vd., 2022; Smith vd., 2022; Dumrul vd., 2023: 183-185).

Bu nedenle, depolama teknolojileri, bu yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjinin tam olarak kullanılabilmesi için kritik bir rol oynamaktadır (Pleißmann vd., 2014: 22-23). En yaygın ve ortak depolama sistemleri arasında, %90'dan fazla dönüş elektrik verimliliği ile karakterize edilen bataryalar en yaygın depolama tesisidir. Bir bataryada, elektrik enerjisi, elektrokimyasal tersinir bir süreçle kimyasallara dönüştürülür (şarj aşaması), bu kimyasallar gerekli olduğunda tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir (deşarj aşaması). Bataryalar, merkezi olmayan enerji depolamasına izin verdikleri için diğer enerji depolama sistemleriyle de rekabetçidir (Hiesl vd., 2020: 1176-1182).

Ancak, bu cihazların şu anda sınırlı sayıda kullanışlı döngü (şarj-deşarj), kritik ham madde kullanımı ve/veya kirlilik yaratan bileşenler, geri dönüşümün zorluğu (maliyetli ve/veya mevcut olmayan

teknolojiler) gibi bir dizi teknik eksikliği bulunmaktadır (Dehghani-Sanij vd., 192-194). Bu nedenle, enerji depolama için çevre dostu ve ekonomik olarak rekabetçi bir çözüm olarak hidrojen ilgisi dramatik bir şekilde artmaktadır. Hidrojen, çevresel etkisi genellikle bir “renk” niteliği ile ilişkilendirilen farklı yollarla üretilebilir. Bugün, hidrojenin üretim yoluna bağlı olarak CO2 emisyonları ile sınıflandırmak için çeşitli renkler kullanılmaktadır (Noussan vd., 2020).

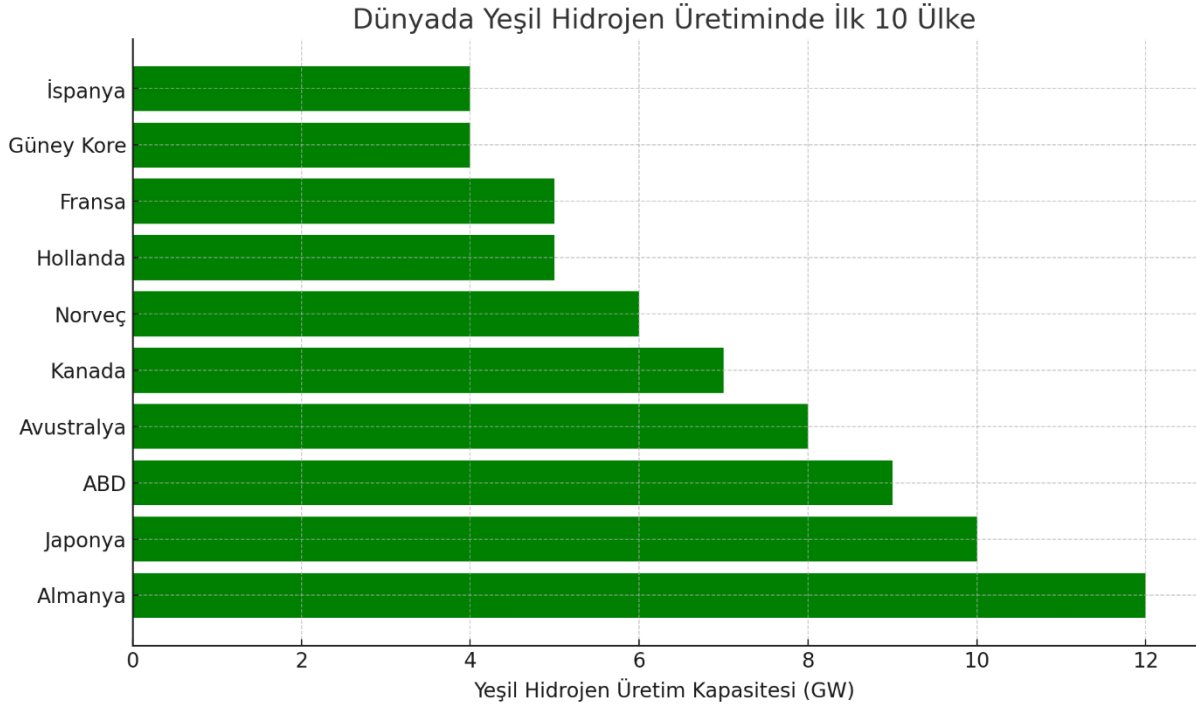
Hidrojen, CO2 emisyonu olmadığında yeşil olarak tanımlanır; en uygun ve iyi geliştirilmiş teknoloji, elektrokimyasal su ayrıştırması (elektroliz) temellidir. Dolayısıyla “Yeşil Hidrojen” terimi, “Yenilenebilir elektrik kullanılarak elektroliz yoluyla üretilen Hidrojen” olarak yaygın olarak kabul edilmektedir. Bu yeşil hidrojen tanımı, elektrolizi gelecekteki hidrojen üretimi için tercih edilen ve ana yol olarak gören belgelerde ve makalelerde yer almaktadır. Bataryalarda olduğu gibi, su elektrolizinde elektrik, kimyasallara (hidrojen ve oksijen) dönüştürülür. Elektrolizin, dış bir güç kaynağı tarafından yönlendirilen isteğe bağlı olmayan bir reaksiyona dayanması dışında, bataryalarla ana fark, hidrojenin birçok olası uygulamasının olmasıdır (Squadrito vd., 2014: 451-455; Squadrito vd., 2010: 9983-9984; Maggio vd., 2019: 11371-11374; Nicita vd., 2020: 11395-11397; Çelebi vd., 2021: 1-2; Squadrito vd., 2023).

Gerçekte, hidrojen, yakıt hücrelerinde elektrokimyasal süreçle tekrar elektrik enerjisine dönüştürülebilir; içten yanmalı motorlar ve türbinlerde mekanik enerji için yakıt olarak kullanılabilir; ısı üretmek için fırınlarda yakılabilir; fosil yakıtların işlenmesiyle elde edilen hidrojeni kullanan birçok sanayi uygulamasında hammadde olarak kullanılabilir (örneğin, metan, petrol ve türevleri, karbon); ve doğal gazın yerini alabilecek diğer sanayi ve sivil uygulamalarda kullanılabilir. Bu nedenlerden dolayı, birçok ülke, gelecekteki enerji yönetimi çözümü olarak hidrojeni görüyor ve giderek “karbonsuz” bir ekonomiye yönelik hidrojen teknolojilerinin tanıtımını destekliyor. Bu amaçla, son zamanlarda “hidrojenin geliştirilmesi ve dağıtımı için planlar ve stratejiler” hazırlanmıştır (Kovaç vd., 2021: 10016-10017; Şimşek vd., 2024:10846-10848).

Bu planları desteklemek için, hükümetler hem yeni teslimat altyapılarının inşası hem de yeşil hidrojen üretimi için teşvikler sağlama politikaları başlatmaktadır. Yeşil hidrojenin üretim maliyetleri, yeşil hidrojenin tanıtımı ve büyük ölçekli uygulamasının ana engeli olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, son yıllarda, su elektrolizi yoluyla hidrojen üretiminin su kullanılabilirliği ve rezervleri ile ilişkili etkileri tartışılmıştır. Çünkü yeşil hidrojenin sadece yenilenebilir kaynaklar tarafından desteklenen elektroliz yoluyla üretilen hidrojen olarak düşünülmesinin bir sonucu olarak, büyük miktarda su talep edilmektedir.

İklim değişikliği, küresel ekonomiler, altyapılar ve toplumlar üzerinde önemli riskler oluşturmaktadır, bu nedenle net sıfır emisyonla ulaşmak amacıyla küresel eylem konusunda geniş bir uzlaşmaya varılmıştır. Bu hedefin teşvik edilmesinde enerji sektörü, dünya çapında en büyük CO2 emisyonu kaynağı olması nedeniyle kritik bir rol oynamaktadır. Dolayısıyla, enerji sektörünün daha sürdürülebilir kaynaklara geçişi, emisyonları azaltmak ve net sıfır hedefini gerçekleştirmek için hayati öneme sahiptir ve bu geçişte yenilenebilir enerji kilit bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, yenilenebilir enerji kullanılarak su elektrolizi yoluyla üretilen yeşil hidrojen, fosil yakıtlara temiz ve sürdürülebilir bir alternatif sunarak net sıfır hedefleriyle uyum sağlamaktadır. Düşük emisyonlu hidrojen üretimi için açıklanan girişimlerin sayısı keskin bir artış göstermektedir; örneğin, tüm önerilen projelerin başarıyla uygulanabilmesi durumunda yıllık düşük emisyonlu hidrojen üretiminin 2030 yılına kadar 38 milyon tona çıkması beklenmektedir. Hidrojen üretimi sırasında, elektroliz yoluyla suyun hidrojen ve oksijene ayrılması için gerekli elektrik enerjisini sağlayan elektrolizörler kilit rol oynamaktadır. Bugüne kadar, elektroliz yoluyla hidrojen üretim kapasitesi sürekli bir genişleme göstermiş olup, kurulu kapasitenin 2023 yılına kadar yaklaşık 3 GW'a ulaşması öngörülmektedir. Elektrolizörler çeşitli biçimlerde bulunmakta olup, su elektrolizörleri sürdürülebilir hidrojen üretimiyle doğrudan ilişkilidir. Kömür gazlaştırması veya buhar metan reformasyonu gibi endüstriyel hidrojen üretimi ile karşılaştırıldığında, yenilenebilir enerji tabanlı hidrojen üretimi, sera gazı veya zararlı emisyon yaymadığından, enerji-dönüşüm yollarını teşvik etmek için çok daha sürdürülebilir bir yöntemdir. Su elektrolizörlerinin uygulanması, geniş ölçekli hidrojen üretimi için giderek daha uygulanabilir bir seçenek sunmakta,

yenilenebilir enerjinin değişken özelliklerini yönetebilen ve uzun süreli enerji depolama için bir çözüm sağlayabilen sürdürülebilir ve esnek bir enerji sistemine katkıda bulunmaktadır.



**Grafik 1. Yeşil Hidrojen Üretiminde İlk 10 Sıradaki Ülkelerin Durumu**

Elektroliz teknolojisi ile ilgili yeşil hidrojen tanımı, CO<sub>2</sub> döngüsünü içerecek şekilde genişletilmeli ve bu nedenle tüm karbon nötr teknolojileri kapsamaludur. Örneğin, biyokütleden elde edilen hidrojen CO<sub>2</sub> nötrdür ve karbon yakalama olmadan da 'yeşil' olarak adlandırılabilir, çünkü son hidrojen üretim adımındaki CO<sub>2</sub> çıkışı, bitkiler tarafından yapılan önceki bir yakalama işleminden gelmektedir. Küresel enerji manzarası, karbon emisyonlarını azaltma ve iklim değişikliği ile mücadele etme gerekliliği tarafından yönlendirilen önemli bir dönüşüm süreci içindedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, fosil yakıtlara sürdürülebilir alternatifler sunarak bu paradigma değişiminde kritik bir rol oynamaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA)'na göre, Paris Anlaşması hedeflerine ulaşabilmek için yenilenebilir enerjinin 2030 yılına kadar küresel güç üretiminin çoğunluğunu oluşturması gerekmektedir (Goncalves vd., 2020: 533-534). Bu geçiş, yalnızca çevresel endişeleri ele almakla kalmayıp aynı zamanda enerji güvenliğini artırarak dünya genelinde çeşitli bölgelerde ekonomik büyümeyi desteklemektedir.

**Balıkesir'in Önemi:** Stratejik olarak Türkiye'nin kuzeybatısında yer alan Balıkesir İli, özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyeli olmak üzere zengin yenilenebilir kaynaklara sahiptir. İlin coğrafi manzarası, hem kara hem de deniz üstü rüzgâr çiftliklerinin geliştirilmesini kolaylaştıran geniş kıyı şeritleri ve dağlık alanları içermektedir. Ekonomik olarak, Balıkesir, üretim, tarım ve enerji sektörlerine yapılan önemli yatırımlar ile çeşitli bir sanayi tabanına sahiptir ve bu özellikleri ile yeşil hidrojen girişimleri için öncü bir aday haline gelmektedir (Biniş, 2020: 199-209). Balıkesir, Türkiye'de yenilenebilir enerji benimsemesinde öncü rol oynamış olup, ülkenin en büyük rüzgâr çiftliklerine ve güneş enerjisi santrallerine ev sahipliği yapmaktadır. Bölgenin sürdürülebilir enerjiye olan bağlılığı, yenilenebilir teknolojileri yerel sanayilere ve topluluklara başarıyla entegre eden çok sayıda projeden açıkça görülmektedir. Bu girişimler, sadece ilin enerji bağımsızlığını güçlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın ülkenin toplam enerji karışımında yenilenebilir kaynakların payını artırma hedeflerine de katkıda bulunmaktadır (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2023).

**Araştırma Amaçları:** Bu çalışma, Balıkesir'in yeşil hidrojen üretimini destekleme kapasitesini kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Değerlendirme, yenilenebilir enerji kaynaklarının

mevcudiyeti, mevcut altyapı ve bölgenin hidrojen üretim teknolojilerini benimseme ve ölçeklendirme teknolojik hazırlığına odaklanacaktır. Bu faktörleri analiz ederek, çalışma Balıkesir'i bölgesel bir yeşil hidrojen merkezi olarak kurmanın uygunluğunu belirlemeyi amaçlamaktadır. Üretim potansiyelini değerlendirme ile birlikte, çalışma hem iç kullanım hem de ihracat için hidrojen üretiminin ölçeklendirilmesinin uygulanabilirliğini araştıracaktır. Balıkesir'in büyük sanayi pazarlarına ve ihracat limanlarına yakınlığı göz önünde bulundurularak, bu araştırma lojistik, ekonomik ve düzenleyici çerçeveleri inceleyecektir. Bulgular, Balıkesir'i küresel hidrojen ekonomisinde önemli bir oyuncu haline getirmek için gerekli stratejik adımlara dair içgörüler sağlayacaktır.

## 1. Literatür İncelemesi

### 1.1. Yeşil Hidrojen Teknolojisi

Yeşil hidrojen, suyun yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik kullanılarak hidrojen ve oksijen bileşenlerine ayrılması işlemi olan elektroliz yoluyla esas olarak üretilir. Bu süreçte kullanılan üç ana elektrolizör tipi bulunmaktadır: alkalın elektrolizörler, proton değişim membranı (PEM) elektrolizörler ve katı oksit elektrolizörler (Ang vd., 2022: 3-9). En eski teknoloji olan alkalın elektrolizörler, güvenilirlikleri ve sağlamlıkları ile bilinirken, PEM elektrolizörler yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken yüklerine uygun olarak daha yüksek verimlilik ve dinamik işletme sunmaktadır. Geliştirme aşamasında olan katı oksit elektrolizörler ise yüksek sıcaklıklarda yüksek verimlilik vaat etmektedir (Ahmed vd., 2022: 37227-37235). Yeşil hidrojen pazarı, ağır sanayi ve taşımacılık gibi elektrikleştirilmesi zor sektörlerin karbonsuzlaştırılması gereksinimi tarafından hızla genişlemektedir (Elam vd., 2003: 601-602). Teknolojik ilerlemeler, elektrolizörlerin verimliliğini sürekli olarak artırmakta ve maliyetlerini azaltmaktadır. Örneğin, PEM teknolojisindeki son gelişmeler, platin gibi pahalı katalizör malzemelerinin kullanımını azaltarak sistemleri daha ekonomik olarak uygulanabilir hale getirmiştir (Zainal vd., 2024: 1-3). Ayrıca, dünya genelindeki hükümetler, Avrupa Hidrojen Stratejisi ve Japonya Hidrojen Yol Haritası gibi sübvansiyonlar ve politika çerçeveleri aracılığıyla hidrojen ekonomilerinin büyümesini teşvik etmektedir (Avrupa Komisyonu, 2020; Delaval vd., 2022).

Foto-elektrokimyasal (PEC), güneş enerjisinden hidrojen üretimi için üç ana yöntemden biridir. Doğrudan güneş hidrojeninin üretimi için PEC su parçalama süreci umut verici bir potansiyele sahiptir. PEC su parçalamanın birçok avantajı arasında, karşılaştırmalı olarak yüksek güneşten kimyasal enerjiye dönüşüm verimliliği, basit ve güvenli ürün toplama, yüksek güvenilirlik ve büyük ölçekli üretimde sürdürülebilirlik bulunmaktadır. Foto-elektrokimyasal (PEC) su parçalama, güneş enerjisinin doğrudan hidrojen, temiz ve yenilenebilir bir enerji taşıyıcısına dönüştürülmesi için umut verici bir yöntemdir. Bu süreç, güneş ışığına maruz kaldığında suyun hidrojen ve oksijene ayrılmasını sağlamak için fotoelektrot olarak yarı iletken malzemeleri kullanmaktadır. PEC su parçalamanın avantajları arasında yüksek güneşten kimyasal enerjiye dönüşüm verimliliği, basit ürün toplama ve sürdürülebilirlik yer almakta olup, bu da onu yenilenebilir enerji çözümleri arayışında önemli bir teknoloji haline getirmektedir (Cheng, 2021: 3096-3097).

### 1.2. Ekonomik ve Çevresel Etki

Yeşil hidrojen teknolojisine yapılan yatırımlar, yenilenebilir enerji teknolojisi, altyapı ve bakım alanlarında yeni endüstriler ve iş fırsatları yaratma gibi çeşitli ekonomik faydalar sunmaktadır. Hidrojenin bir depolama ortamı ve yakıt olarak çok yönlülüğü, özellikle enerji fiyatlarında yüksek dalgalanmalar yaşayan ülkeler için enerji güvenliğine önemli katkılar sağlar (Ajiboye vd., 2024: 1-5). Ayrıca, bir hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi, özellikle bol yenilenebilir kaynaklara sahip bölgeler için önemli ihracat fırsatlarına yol açabilir (Otaki ve Shaw, 2024: 127-128). Yeşil hidrojen, önemli çevresel faydalar sunmaktadır. Üretimi, yenilenebilir enerji kaynaklarından yapıldığı için, fosil yakıtlardan elde edilen geleneksel hidrojen üretimine kıyasla düşük bir karbon ayak izi sağlar. Kullanıldığında hidrojen, yalnızca su buharı üretir ve böylece azot oksitleri, kükürt dioksit ve partikül maddeler gibi kirleticilerin önemli ölçüde azalmasına katkıda bulunur. Bu özellikleri ile hidrojen, çevresel etkilerini azaltmayı

amaçlayan kentsel alanlar ve endüstriler için cazip bir seçenek haline gelmektedir (Ahad vd., 2023: 2-7).

### 1.3. Vaka Çalışmaları

Birçok ülke, teknolojinin potansiyelini sergileyen başarılı yeşil hidrojen projelerini hayata geçirmiştir. Almanya'da, Energiepark Mainz rüzgâr enerjisini kullanarak hidrojen üretmekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretimi ile başarılı entegrasyonunu göstermektedir (Schwabe, 2024: 1-6).

Avustralya'da, Hydrogen Energy Supply Chain projesi, kahverengi kömürü hidrojene dönüştürmeyi ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını yakalayıp depolayarak büyük ölçekte neredeyse sıfır emisyonlu bir yakıt kaynağı yaratmayı amaçlamaktadır. Avustralya ve Japonya gibi ülkelerde de yeşil hidrojenin rolü üzerine önemli çalışmalar yapılmaktadır. Kar vd. (2022), Avustralya'nın yeşil hidrojen ekonomisindeki stratejik adımlarını ve bu alandaki uluslararası iş birliklerini incelemektedir. Çalışmada, Avustralya'nın iç pazardaki hidrojen penetrasyonunu artırmak ve Japonya, Çin ve Güney Kore'ye ihracat yapmak için iddialı hedefler belirlediği bulunmuştur. Avustralya'nın ulusal hidrojen stratejisi, bol yenilenebilir kaynaklardan yararlanmak için güçlü bir hidrojen değer zinciri oluşturmayı vurgulamaktadır. Bu çalışma, Avustralya'nın maliyet açısından rekabetçi yeşil hidrojen üretimi ve ihracı için muazzam bir potansiyele sahip olduğunu doğrulamaktadır. Modern tedarik zinciri altyapısıyla Avustralya'nın maliyet açısından rekabetçi yeşil hidrojen üretimi, diğer ihracatçılara göre rekabet avantajları sunacaktır. Eyaletler/bölgeler, hidrojen politikalarını ve stratejilerini ulusal strateji doğrultusunda uyumlu hale getirmeye çalışmaktadır. Avustralya, hidrojenin iç pazardaki benimsenmesini artırmak için yatırım eksikliği, düşük kamu bilinci ve yetersiz altyapı gibi çoklu zorlukları ele almalıdır. Ayrıca, Avustralya, Japonya, Çin ve Güney Kore'deki ortaya çıkan hidrojen pazarlarından yararlanmak için güçlü yönlerini kullanmalıdır.

Küresel başarı örnekleri, Balıkesir için değerli dersler sunmaktadır. Hidrojen üretiminin mevcut yenilenebilir enerji altyapıları ile entegrasyonu, maliyetleri ve enerji verimliliğini optimize edebilir. Güçlü yenilenebilir kaynak tabanına sahip olan Balıkesir, bu başarılı örneklerden stratejiler benimseyerek, yerel kapasiteleri rüzgâr ve güneş enerjisi ile bir yeşil hidrojen ekosistemini hızlandıracak şekilde kullanabilir (IRENA, 2022).

Yeşil hidrojen üretimi ve ihracatı, küresel enerji geçişinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu bağlamda, farklı ülkelerdeki yeşil hidrojen projeleri ve politikaları üzerine yapılan akademik çalışmalar, bu alandaki potansiyeli ve zorlukları anlamak için kritik öneme sahiptir.

Örneğin, Rusya'daki yeşil hidrojen projeleri üzerine yapılan bir çalışmada, ülkenin coğrafi avantajları ve mevcut projelerin uluslararası pazardaki rekabetçi konumu ele alınmıştır. Gomonov vd. (2023), Rusya'nın çeşitli bölgelerinde gerçekleştirilen projeleri inceleyerek, bu projelerin Çin ve Almanya gibi pazarlara yönelik potansiyelini vurgulamaktadır. Yapılan araştırmalar, Rusya tarafından duyurulan projelerin çoğunun (%53) yeşil hidrojen üretimine odaklandığını ortaya koymuştur. Hidrojen üretimi için gerekli elektriği sağlamak amacıyla kullanılan spesifik enerji kaynaklarıyla ilgili olarak, araştırmada hidroelektrik santrallerinin en yaygın kaynak olduğunu ve projelerin %15'ini oluşturduğu bulunmuştur. Bu durum, Rusya'nın birçok büyük nehir ve hâlihazırda mevcut hidroelektrik tesislere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Rüzgâr enerjisi, projelerin %13'ünde kullanılan ikinci en yaygın kaynak olmuştur. Bu da, rüzgâr enerjisinin geleneksel fosil yakıtlarla giderek daha rekabetçi hale geldiğini yansıtmaktadır. Güneş enerjisi de projelerin %13'ünde kullanılmıştır ve bu durum güneş teknolojisinin büyük ölçekli enerji üretimi için daha uygulanabilir hale geldiğini önermektedir. Nükleer ve gelgit enerji santralleri ise projelerin %26'sında kullanılmaktadır. Genel olarak, bu projelerde hidroelektrik ve rüzgâr enerji santralleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, hidrojen üretim sürecinin karbon ayak izini azaltma yönünde olumlu bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Ayrıca, Odenweller vd. (2022), yeşil hidrojen yatırımlarını teşvik etmek için düzenleyici belirsizliklerin nasıl yönetilmesi gerektiğini tartışarak, yeşil hidrojenin uzun vadeli potansiyelinin değerlendirilmesi

gerektiğini belirtmektedir. Çalışmada, yeşil hidrojen ve türev elektro yakıtlar, doğrudan elektrifikasyonun mümkün olmadığı uygulamalarda fosil yakıtların cazip ikameleri olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, onları iklim nötrlüğü açısından kritik hale getirirken, arzın hızla artırılması da hayati öneme sahip ve zorlu bir süreçtir. Burada, elektroliz kapasitesinin rüzgâr ve güneş enerjisi gibi hızlı bir şekilde büyümesine rağmen, yeşil hidrojen arzının kısa vadede kıt kalacağını ve uzun vadede belirsiz olacağı gösterilmiştir.

MENA (Orta Doğu ve Kuzey Afrika) bölgesinde, yeşil hidrojenin geleceği üzerine yapılan araştırmalar, bu ülkelerin enerji geçişinde nasıl bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Rezk vd. (2023), Mısır örneği üzerinden yeşil hidrojenin potansiyelini ve üretim maliyetlerini ele alarak, ölçek ekonomileri ve teknolojik yeniliklerin önemini vurgulamaktadır. Çalışmada ele alınan Mısır'ın yeşil hidrojen endüstrisi için gelecekteki senaryolar, en iyi ve en kötü sonuçlar arasında keskin bir tezat sunmaktadır. "Sürdürülebilirliğin Kumları: Mısır'da Yeşil Hidrojenin Kullanımı" başlıklı en iyi senaryo, Mısır'ı 2050 yılı itibarıyla yeşil hidrojen üretimi ve teknolojisinde küresel bir lider olarak tasvir etmektedir. Stratejik planlama, hükümet politikaları, uluslararası iş birliği ve eğitim reformları aracılığıyla Mısır, doğal kaynaklarını başarıyla kullanarak küresel yeşil hidrojen pazarında önemli bir oyuncuya dönüşmüştür. Bu senaryo, yeşil hidrojen sektörünün büyümesiyle yönlendirilen ekonomik refah, istihdam yaratma, teknolojik yenilik ve çeşitlendirilmiş bir enerji manzarası resmetmektedir. Öte yandan, "Durgunluğun Kumları: Mısır'ın Yeşil Hidrojen Vizyonunu Engelleyen Engeller" başlıklı en kötü senaryo, bir uyarı hikâyesi olarak hizmet etmektedir. Bu senaryo, Mısır'ın fırsatları değerlendirememesi veya beklenmedik dış engellerle karşılaşması durumunda karşılaşılabileceği potansiyel tuzakları ve zorlukları göstermektedir. Organizasyonel başarısızlıklar, uluslararası iş birliğinin eksikliği, ekonomik ve finansal zorluklar, teknolojik duraklama ve eğitimdeki durağanlık, Mısır'ın yeşil hidrojen hedeflerinin engellendiği bir senaryoya katkıda bulunmaktadır. Bu durum, ekonomik büyüme, iş fırsatlarının kaybı ve küresel yeşil hidrojen pazarında belirgin bir varlık oluşturma başarısızlığı ile sonuçlanabilir.

Bunun yanı sıra, Ersoy vd. (2023) çalışması, Ürdün, Fas ve Umman gibi ülkelerde yeşil hidrojen üretimi ve ihracatı için gerekli endüstriyel ve altyapısal koşulları incelemektedir. Vaka çalışması analizi, Ürdün, Fas ve Umman'ın yeşil hidrojen ve sentetik yakıtların üretimi ve ihracı için önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, ülkelerin yeşil ekonomi geliştirme yönündeki adım hızları ve somut atılan adımlar farklılık göstermektedir. Ürdün, henüz tartışmaların başında olduğundan, bu doğrultuda somut hedefler belirlenmemiştir. Şu ana kadar hem siyasi hem de özel sektörden yalnızca birkaç faaliyet gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, Fas, somut ihracat hedefleriyle birlikte bir hidrojen stratejisi yayımlamıştır. Umman'da ise, somut niceliksel hedeflere sahip hidrojen stratejisinin yayımlanması aşamasındadır. Ayrıca, Umman'da zaten bir dizi büyük ölçekli proje duyurulmuş olup, Fas'ta ilk demonstrasyon tesislerinin planlandığı belirtilmektedir. Altyapı açısından incelenen ülkeler de farklılık göstermektedir. Enerji ihracatçısı olan Umman, belirli koşullar altında dönüştürülebilecek geniş bir şarj ve depolama altyapısına sahipken, fosil yakıt ithalatçısı olan Ürdün ve Fas'ın karşılaştırmalı olarak daha az altyapısı ve bu altyapının yönetiminde teknik deneyimi bulunmaktadır. Sanayi yapısı açısından, Ürdün ve Fas, yenilenebilir enerji sektöründe geniş bir uzmanlığa sahipken, Umman bu alanda sınırlı kapasite ve uzmanlık göstermektedir. Öte yandan, Umman'daki kimya sanayisi, teorik olarak yeşil yakıtlar yönünde dönüştürülebilecek önemli bir ihracata yönelik sektördür.

Güney Afrika'da, yeşil hidrojenin ekonomik etkileri üzerine yapılan Hamukoshi vd. (2022) çalışmasında, bu enerji kaynağının bölgedeki enerji talebini nasıl karşılayabileceği ve istihdam yaratma potansiyeli üzerinde durulmaktadır. Çalışma, yeşil hidrojen değer zincirinin sosyo-ekonomik etkilerini değerlendirerek, bu alandaki gelişmelerin bölge ekonomisine katkı sağlayabileceğini belirtmektedir. Bu inceleme, Güney Afrika'da yeşil hidrojen ekonomisini sürdürebilecek yeterli yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut olduğunu desteklemektedir. Yeşil hidrojen politikası oluşturma ve düzenleme, Güney Afrika'da yeşil ekonomi aracılığıyla ekonomik büyümeyi teşvik etmede önemli bir faktör olacaktır. Hem doğrudan hem de dolaylı yatırımlardan elde edilecek geri dönüşün, tarım ve sanayi sektörlerinin dönüşümü ile yeşil hidrojen enerjisinin üretilmesi, işlenmesi ve tedarik edilmesi yoluyla değer zinciri eklemeleri aracılığıyla gerçekleşmesi öngörülmektedir. Ekonomik faydalar, bölgedeki

sosyal refah ve altyapının iyileştirilmesinde kritik bir rol oynayacaktır. Bu ekonomiye nasıl yatırım yapılacağı ve keşfedileceği konusunda bazı tercihlerin yapılması gerekecekken, bölgedeki doğal kaynakların ve yenilenebilir güneş enerjisinin mevcudiyeti maliyetlerin düşürülmesi açısından önemli olacaktır. Ancak, başlangıçta yapılacak tercih kararları, mevcut sosyal refahın iyileştirilmesi açısından maliyetli olabileceğinden kolay olmayacaktır; özellikle gerekli elektrik gücünün pahalı olduğu göz önüne alındığında. Fosil yakıt sektörlerinde olası iş kayıpları, yeşil hidrojen ekonomisinin bir diğer olumsuz sonucu olabilir, ancak bu durum mevcut sanayilerde çalışanların yeniden beceri kazandırılması ve yeni yeşil işlerin yaratılması ile telafi edilecektir.

Japonya'da ise, Salimi vd. (2022), temiz hidrojenin enerji geçişindeki önemini ve bu süreçte karşılaşılan zorlukları ele almaktadır. Çalışma bulgularına göre, kaynak ve ham madde açısından yetersiz, ancak ekonomik olarak gelişmiş bir ülke olan Japonya, enerji ve iklim sorunlarını ele almak için önümüzdeki birkaç on yıl içinde enerji altyapısında hidrojen geliştirmek zorundadır. Hükümet, üretimden taşımaya ve nihai kullanım uygulamalarına kadar tam sıfır karbon hidrojen tedarik zincirine odaklanmaktadır. Japonya'nın iddialı yaklaşımı, yerel ve yurtdışındaki sanayi ve hükümet aktörlerini içeren çeşitli sektörler arası deneysel girişimleri kapsamaktadır. Şu anda, ekonomik ve teknolojik engeller ile belirsizlikler devam etmektedir. Hükümet, hidrojenin büyük ölçekli ekonomik ve enerji programlarına entegrasyonunu düşünmeden önce pilot projelerin sonuçlarını beklemektedir. Kamu bütçesi istikrarlı bir şekilde artarken, hükümetin uzun vadeli taahhütlere karşı temkinliliği sınırlı ve yansıtıcı kalmaktadır. Japonya'nın enerji altyapısının karbon azaltımı, hala nükleer enerji, yenilenebilir enerji kaynakları, enerji verimliliği önlemleri ve doğal gaz üzerine dayanmaktadır. Japonya'nın başarısı, alternatif yakıtlarla karşılaştırılabilir maliyetle büyük miktarlarda temiz hidrojen üretme ve kullanma kapasitesine bağlıdır. Maliyet paritesi, etkili bir karbon vergisi ve karbon fiyatlandırmasının uygulanmasına da bağlıdır. Bu nedenle, küresel politika koordinasyonu ve sektörler arası iş birliği giderek daha fazla gerekecektir.

## 2. Araştırma Yöntemi

Karma yöntem yaklaşımı, nicel ve nitel araştırma tekniklerini birleştirerek, her iki yöntemin güçlü yanlarından yararlanarak karmaşık olguları incelemeyi amaçlar (Creswell ve Plano Clark, 2023: 21-26). Bu çalışmada, Balıkesir ilinin yeşil hidrojen üretimi ve ihracat potansiyelinin kapsamlı bir analizini sağlamak amacıyla karma yöntem yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu tasarım, elde edilen detaylı içgörüler ile bütünleştirerek hem ampirik verilerin hem de bağlamsal faktörlerin bütüncül bir değerlendirilmesini sağlar. Nicel veriler, Balıkesir'de yeşil hidrojen üretiminin potansiyelini ve uygulanabilirliğini değerlendirmek için objektif ölçümler sağlayacak olup, yenilenebilir kaynakların mevcudiyeti ve altyapı hazırlığı gibi konuları içerecektir. Nicel analiz kapsamında kullanılan veriler hem ulusal hem de uluslararası güvenilir kaynaklardan derlenmiştir. Veriler, özellikle yenilenebilir enerji kapasitesi, hidrojen üretim potansiyeli, ihracat altyapısı ve enerji tüketim oranları üzerine odaklanmıştır. Başlıca veri kaynakları şunlardır: Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK): Balıkesir'in enerji üretim ve tüketim verileri, ekonomik büyüme oranları ve ihracat-ithalat istatistikleri. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB): Yenilenebilir enerji yatırımları ve potansiyel kaynaklar üzerine güncel raporlar. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA): Küresel hidrojen üretimi, tüketimi ve ihracat eğilimleri. Balıkesir Büyükşehir Belediyesi ve ilgili yerel kurumlar: Bölgesel enerji altyapısı ve mevcut yatırımlarla ilgili güncel veriler.

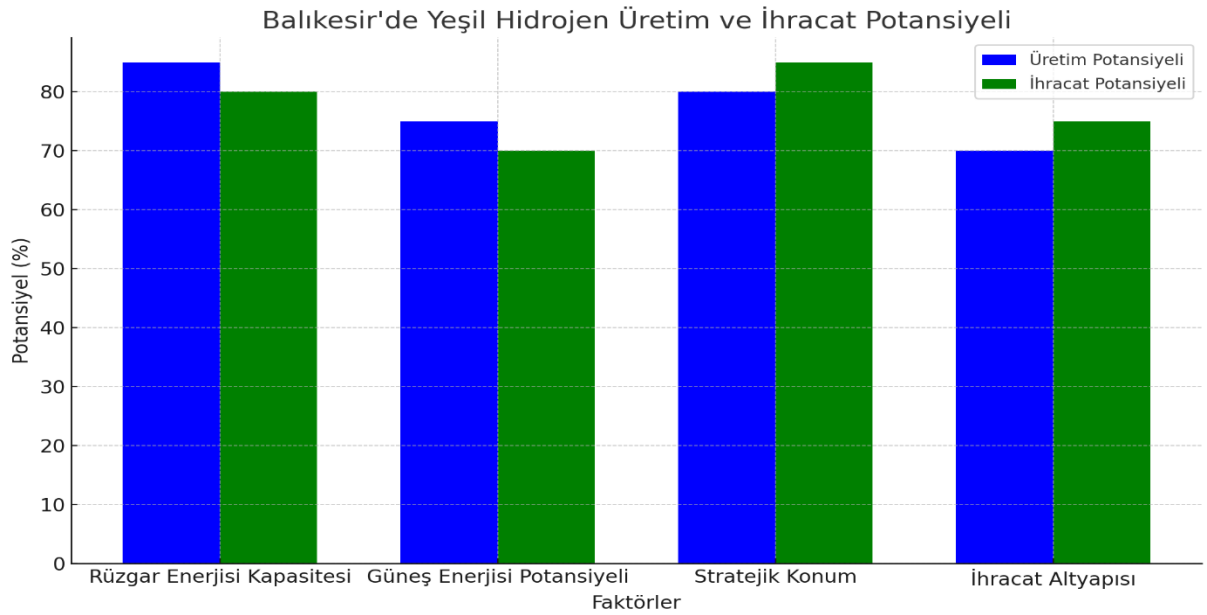
Öte yandan, nitel veriler, yeşil hidrojen ekonomisinin geliştirilmesinde engelleri ve fırsatları belirlemede kritik algıları, deneyimleri ve görüşleri anlamada yardımcı olacaktır. Nitel analiz kapsamında, Balıkesir'in yeşil hidrojen üretiminde öncü bir bölge olma potansiyelini belirlemek amacıyla paydaş görüşleri alınmıştır. Örneklem, konuyla doğrudan ilgili kurum ve uzmanlardan oluşturulmuştur. Örneklem grubu aşağıdaki şekilde belirlenmiştir: Kamu Kurumları Temsilcileri: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı yetkilileri, Balıkesir Büyükşehir Belediyesi enerji uzmanları. Özel Sektör Temsilcileri: Yenilenebilir enerji yatırımları yapan şirketlerin yöneticileri ve mühendisleri. Akademisyenler: Enerji politikaları, sürdürülebilir kalkınma ve ekonomi alanında çalışan uzman akademisyenler. Sivil Toplum Kuruluşları (STK): Çevre ve enerji odaklı çalışan yerel ve ulusal STK temsilcileri.

Her iki tür veriyi kullanmak, teknolojik, ekonomik ve sosyal unsurların karmaşık etkileşimini yakalayarak, dengeli politika önerileri formüle etmeyi sağlayacaktır (Tashakkori vd., 2020).

### 3. Bulgular

#### 3.1. Balıkesir'in Yenilenebilir Kaynaklarının Analizi (Rüzgâr, Güneş) Coğrafi ve Ekonomik Uygunluğu

Balıkesir İli, özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi olmak üzere önemli yenilenebilir enerji potansiyeli ile karakterizedir. Türkiye Enerji Bakanlığı verilerine göre, Balıkesir ülkedeki en yüksek rüzgâr enerjisi kapasitesine sahiptir ve kurulu kapasitesi 1.000 MW'ı aşmaktadır. İl genelindeki rüzgâr çiftlikleri, özellikle kuzey ve batı bölgelerinde yer almakta ve ortalama 7,5 metre/saniye rüzgâr hızı ile ulusal ortalamadan yüksek bir değer sunmaktadır (Demircan ve Bayraktar, 2020: 84-88). Ayrıca, Türkiye Devlet Meteoroloji Hizmeti tarafından sağlanan güneş ışınımı haritaları, Balıkesir'in yıllık yaklaşık 1.500 kWh/m<sup>2</sup> güneş radyasyonu aldığını göstermekte, bu da bölgeyi güneş enerjisi projeleri için uygun hale getirmektedir (Beyoğlu, 2011).



**Grafik 2. Balıkesir'de Yeşil Hidrojen Üretim ve İhracat Potansiyeli**

#### 3.2. Altyapı ve Pazarlara Yakınlık

Ekonomik değerlendirme, Balıkesir'in büyük ölçekli enerji projelerini desteklemek için gelişmiş bir altyapıya sahip olduğunu göstermektedir. İl, birkaç yüksek kapasiteli elektrik alt istasyonuna ev sahipliği yapmakta ve malzemelerin taşınması ve hidrojenin ihrac edilmesini kolaylaştıran sağlam bir yol ve liman ağına sahiptir. İstanbul ve İzmir gibi büyük sanayi pazarlarına 300 kilometreden daha az bir mesafede olması, hidrojenin dağıtımını için stratejik bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, Bandırma ve Gönen sanayi bölgelerinin il sınırları içinde yer alması, yerel olarak üretilen hidrojenin imalat süreçlerinde kullanılmasını kolaylaştırmaktadır (Türkoğlu vd., 2021: 197-199).

#### 3.3. Balıkesir'deki Teknolojinin Güncel Durumu

Balıkesir'de yeşil hidrojen üretimi için teknolojik manzara henüz başlangıç aşamasındadır. Şu anda, hidrojen üretimi için PEM elektrolizörlerini kullanan iki pilot proje yürütülmektedir. Bu projeler esas olarak araştırma odaklı olup Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurulu tarafından finanse edilmektedir. Küçük ölçekli olmalarına rağmen, mevcut yenilenebilir enerji kaynakları ile elektroliz teknolojisinin entegrasyonunun uygulanabilirliğini göstermektedirler (Karagüç, 2013).

### 3.4. Teknoloji Gelişimi İçin Gerekli Boşluklar ve İhtiyaçlar

Bu başlangıç adımlarına rağmen, hidrojen üretimini ölçeklendirmek için yerel teknolojik kapasitede önemli boşluklar bulunmaktadır. Analiz, ileri elektroliz sistemlerinin bakımı ve işletilmesi konusunda yerel uzmanlık eksikliğini göstermektedir. Ayrıca, mevcut teknolojilerin Balıkesir'in özel iklim ve coğrafi koşullarına uyum sağlanması için araştırma ve geliştirme alanında daha büyük yatırımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bölge, ileri elektrolizör malzemeleri ve hidrojen depolama çözümleri gibi alanlarda uluslararası ortaklıklar ve bilgi transferinden faydalanabilir (Li vd., 2022: 139-142).

## 4. Tartışma

### 4.1. Balıkesir'de Yeşil Hidrojenin Stratejik Konum ve Kaynakların Mevcudiyeti

Balıkesir'in stratejik coğrafi konumu ve bol yenilenebilir kaynakları, yeşil hidrojen ekonomisinin geliştirilmesi için benzersiz bir konum sağlamaktadır. İl, İstanbul ve İzmir gibi büyük sanayi pazarlarına yakınlığı ile hidrojen üretimi ve dağıtımı için bir merkez olarak potansiyelini artırmaktadır. Bu coğrafi avantaj, sürdürülebilir yeşil hidrojen üretimi için kritik olan yüksek düzeyde güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli ile desteklenmektedir. Bu faktörler, hidrojen üretimi için gerekli ana girdilerin güvenilir bir şekilde sağlanmasını garanti ederken, aynı zamanda hidrojenin yurt içi ve uluslararası pazarlara dağıtımıyla ilişkili taşıma ve lojistik maliyetlerini azaltmaktadır (Öner ve Çam, 2022: 1154-1157).

### 4.2. Finansal, Teknolojik ve Düzenleyici Engeller

Balıkesir önemli bir potansiyele sahip olmasına rağmen, yeşil hidrojen sektörünün gelişimini engelleyebilecek birkaç engel bulunmaktadır. Finansal olarak, hidrojen üretim tesislerinin kurulması için gereken ilk yatırım büyüktür. Yenilenebilir enerji tesislerinin ve elektrolizörlerin sermaye yoğun doğası, güçlü finansman mekanizmalarını zorunlu kılar. Teknolojik olarak, bölge şu anda üretimi ölçeklendirmek ve operasyonel verimliliği sağlamak için gerekli olan ileri hidrojen teknolojilerinde yeterli altyapıya ve yerel uzmanlığa sahip değildir. Ayrıca, mevcut düzenleyici çerçeve, özellikle güvenlik standartları ve çevresel etki değerlendirmeleri gibi alanlarda, hidrojen teknolojilerinin hızlı genişlemesini tam olarak desteklememektedir (Downie, 2020: 2-4).

### 4.3. Diğer Bölgelerle veya Vaka Çalışmalarıyla Karşılaştırma

Karşılaştırmalı olarak, Almanya'nın Kuzey Ren-Vestfalya bölgesi ve Danimarka'nın Jutland yarımadası gibi bölgeler, kamu-özel ortaklıklarını teşvik eden bütünsel bölgesel stratejiler ve güçlü hükümet desteği sayesinde hidrojen girişimlerinde daha ileri gitmiştir. Bu bölgeler, hedefe yönelik sübvansiyonlar, kapsamlı düzenleyici çerçeveler ve kurulmuş teknolojik ekosistemlerden faydalanır, bu da hidrojen projelerinin daha sorunsuz bir şekilde uygulanmasını kolaylaştırır (Vivanco-Martín ve Iranzo, 2023).

### 4.4. Politika Önerileri

Mevcut engellerin üstesinden gelmek için Türk hükümetinin ve Balıkesir bölgesel yetkililerinin birkaç düzenleyici değişiklik yapmayı düşünmeleri gerekmektedir:

1. Mali Teşviklerin Artırılması: Yeşil hidrojen üretimi için sübvansiyonlar sunmak, yenilenebilir enerji ekipmanları için vergi muafiyetleri veya indirimler ve araştırma ve geliştirme için hibeler sunmak, erken benimseyenler üzerindeki finansal yükü azaltabilir.
2. Onay Süreçlerinin Basitleştirilmesi: Yeni hidrojen tesisleri için onay sürecini basitleştirmek ve hızlandırmak, yatırımı teşvik eder ve proje başlangıç sürelerini azaltır.
3. Güvenlik ve Çevresel Düzenlemeler: Hidrojen üretimi ve depolama tesisleri için özel olarak net güvenlik standartları belirlemek, yanı sıra katı çevresel etki değerlendirme gereklilikleri sağlamak, hidrojen sektöründe sürdürülebilir uygulamaları garanti edecektir (Ajanovic ve Haas, 2018: 280-282).

#### 4.5. Kamu ve Özel Sektörler İçin İşbirliği Modelleri

Balıkesir'de yeşil hidrojenin geliştirilmesi, kamu ve özel sektörlerin dâhil olduğu işbirliği modellerinden faydalanacaktır:

1. Kamu-Özel Ortaklıkları (PPP): Bunlar, kamu kurumları ve özel yatırımcılar arasında risklerin ve ödüllerin paylaşılmasını kolaylaştırarak hidrojen altyapısının geliştirilmesini ileriye taşıyabilir.
2. Endüstri Kümeleri: Üniversiteler, teknoloji sağlayıcıları ve enerji şirketlerini içeren hidrojen kümeleri kurmak, Almanya'daki Kimya Park Marl modelinde kullanıldığı gibi, inovasyon ve teknoloji transferini teşvik edebilir ve bu model, hidrojen kullanımında endüstriyel simbiyozun önde gelen bir örneği haline gelmiştir (Luttikus, 2002: 475-476).
3. Uluslararası İşbirlikleri: Kurulmuş hidrojen ekonomileriyle ortaklıklar kurmak, ileri teknolojilere ve en iyi uygulamalara erişim sağlayabilir. Örneğin, Japonya veya Güney Kore gibi öncü hidrojen teknolojilerine sahip ülkelerle yapılan anlaşmalar, Balıkesir'de teknolojik ilerlemeyi ve kapasite oluşturmayı hızlandırabilir (Rolo vd., 2023: 1-7).

#### SONUÇ

Bu çalışmada yapılan analiz, Balıkesir'in yeşil hidrojen pazarında önemli bir oyuncu olarak önemli potansiyeline işaret etmektedir. İl'in coğrafi ve ekonomik özellikleri, bol yenilenebilir kaynakları ve büyük sanayi ve ihracat merkezlerine yakın stratejik konumu, sürdürülebilir enerji çözümlerine olan artan talepten faydalanma konusunda benzersiz bir konum sağlamaktadır. Mevcut altyapı, devam eden yenilenebilir enerji projeleriyle birleştiğinde, yeşil hidrojen üretim tesislerinin entegrasyonu için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Bu faktörler, Balıkesir'in yeşil hidrojen üretimini verimli bir şekilde gerçekleştirme kapasitesini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda yerel ve uluslararası hidrojen dağıtımını da kolaylaştırmaktadır ve ilin Türkiye'nin hidrojen ekonomisinde lider bir konumda olmasını sağlayabilir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgular, Balıkesir'deki yeni hidrojen endüstrisini destekleyebilecek kapsamlı politika çerçevelerinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Yerel ve ulusal politika yapıcılar, hidrojen teknolojisine yatırımı teşvik eden, düzenleyici süreçleri basitleştiren ve hidrojen sektöründe inovasyon ve büyümeye elverişli bir ortamı teşvik eden politikalar oluşturmayı düşünmelidir. Bu, hidrojen üretimi ve depolanması için özel güvenlik standartlarının geliştirilmesini ve hidrojen projelerini düşünen firmalar için başlangıç finansal engelleri azaltabilecek teşvikleri içermelidir. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretimiyle entegrasyonunu artıran politikalar, bu girişimlerin çevresel ve ekonomik faydalarını maksimize edebilir.

Yatırımcılar ve endüstri paydaşları için, Balıkesir'in yenilenebilir enerji kapasiteleri ve lojistik avantajları göz önüne alındığında, yeşil hidrojen gelişimi umut verici bir fırsat sunmaktadır. Yatırımcılar, yerel uzmanlığı ve altyapıyı kullanarak küresel liderlerden ileri teknoloji ve uygulamaları getiren uzun vadeli ortaklıklar ve ortak girişimlere odaklanmalıdır. Ayrıca, enerji şirketleri ve teknoloji sağlayıcıları gibi endüstri paydaşları, inovasyonu teşvik etmek ve hidrojen projelerinin sürdürülebilirliğini ve karlılığını sağlamak için akademik kurumlar ve hükümet organları ile yakın işbirliği yapmalıdır. Hidrojen enerjisinin uygulanabilirliğini ve faydalarını gösteren pilot projelere katılmak, daha geniş toplum ve hükümet kesimlerinden daha fazla yatırım ve destek çekebilir.

Gelecekteki araştırmalar, bu çalışmada tanımlanan teknolojik, finansal ve düzenleyici boşlukları hedeflenmiş pilot projeler ve ileri düzey çalışmalar aracılığıyla ele almayı hedeflemelidir. Balıkesir'deki pilot projeler, çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının hidrojen üretimiyle entegrasyonunu test etmek ve yerel koşullarda hidrojen teknolojilerinin verimliliğini ve ölçeklenebilirliğini artırmak için odaklanabilir. Başarılı hidrojen ekonomileri uygulanan diğer bölgelerle karşılaştırmalı çalışmalar, Türk bağlamına uyarlanabilecek değerli içgörüler ve en iyi uygulamalar sağlayabilir. Hidrojen gelişiminin

yerel ekonomiler, istihdam ve çevresel sürdürülebilirlik üzerindeki etkisini değerlendiren uzun süreli çalışmalar da, ileriye dönük politika ve yatırım kararlarına rehberlik etmede faydalı olabilir.

Sonuç olarak, Balıkesir, sürdürülebilir bir hidrojen bazlı enerji sistemine geçişte kritik bir dönemeçtedir. İl'in doğal ve stratejik avantajları, odaklanmış politika ve yatırım girişimleri ile birleştiğinde, Türkiye'nin küresel yeşil hidrojen pazarında lider olma hedeflerine öncülük edebilir. Balıkesir'in yeşil hidrojen potansiyelini tam olarak gerçekleştirmesini sağlayacak yaklaşımları ve stratejileri geliştirmek için daha fazla araştırma ve pilot projeler şarttır, böylece bölgesel ve ulusal ekonomik ve çevresel hedeflere önemli katkılarda bulunabilir.

### **Etik Standartlara Uyum**

#### **Çıkar Çatışması**

Yazar, bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışmasının bulunmadığını beyan eder

#### **Etik Kurul İzni**

Bu çalışma için etik kurul iznine gerek yoktur. Buna ilişkin ıslak imzalı onam formu, makale süreç dosyasına eklenmiştir

### **KAYNAKÇA**

- Abulfotuh, F. (2007). Energy Efficiency and Renewable Technologies: The Way to Sustainable Wnergy Future. *Desalination*, 209(1-3), 275-282.
- Ahad, M. T., Bhuiyan, M. M. H., Sakib, A. N., & Siddique, Z. (2023). An Overview of Challenges for the Future of Hydrogen. *Materials (Basel, Switzerland)*, 16(20), 1-28.
- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Rafa, N., Musharrat, A., Lam, S. S., & Boretti, A. (2022). Sustainable Hydrogen Production: Technological Advancements and Economic Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), 37227-37255.
- Ajanovic, A., & Haas, R. (2018). Economic Prospects and Policy Framework for Hydrogen as Fuel in the Transport Sector. *Energy Policy*, 123, 280-288.
- Ajiboye, Y., Ojo, O. L., Kayode, J. F., Awolusi, T., Jayesimi, B., Afolalu, S. A., ... & Ilevbare, M. (2024, April). The Future of Green Hydrogen in the Global Economy: Opportunities, Challenges and Implications. In 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG) (pp. 1-28). IEEE.
- Al Irsyad, M. I., Halog, A. B., Nepal, R., & Koesrindartoto, D. P. (2017). Selecting Tools for Renewable Energy Analysis in Developing Countries: An Expanded Review. *Frontiers in Energy Research*, 5, 34.
- Amer, M., & Daim, T. U. (2011). Selection of Renewable Energy Technologies for A Developing County: A Case of Pakistan. *Energy for Sustainable Development*, 15(4), 420-435.
- Ang, T. Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022). A Comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, Sthallenges and Suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 1-27.
- Aragonés-Beltrán, P., Chaparro-González, F., Pastor-Ferrando, J. P., & Pla-Rubio, A. (2014). An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process)-Based Multi-Criteria Decision Approach for the Selection of Solar-Thermal Power Plant Investment Projects. *Energy*, 66, 222-238.

- Avrupa Komisyonu (European Commission). (2020). A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.
- Barkhouse, D. A. R., Gunawan, O., Gokmen, T., Todorov, T. K., & Mitzi, D. B. (2012). Device Characteristics of a 10.1% Hydrazine-Processed Cu<sub>2</sub>ZnSn (Se, S) 4 Solar Cell. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20(1), 6-11.
- Beyoğlu, M. F. (2011). Balıkesir İlinde Çift Eksenli Güneş Takip Sistemi ile Sabit Eksenli PV Sistemin Verimlerinin Karşılaştırılması (Master's Thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Biniş, M. (2020). Çeşitli Sosyo-Ekonomik Göstergeler Açısından Balıkesir İlinin Görünümü. Vergi ve Sosyoekonomik Göstergeler Çerçevesinde Türkiye, 199-231.
- Boudellal, M. (2023). Power-to-gas: Renewable Hydrogen Economy for the Energy Transition. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Caldés, N., Varela, M., Santamaría, M., & Sáez, R. (2009). Economic Impact of Solar Thermal Electricity Deployment in Spain. *Energy Policy*, 37(5), 1628-1636.
- Cheng, W., Calle, A. d. I., Atwater, H. A., Stechel, E. B., & Xiang, C. (2021). Hydrogen from Sunlight and Water: A Side-by-side Comparison Between Photoelectrochemical and Solar Thermochemical Water-splitting. *ACS Energy Letters*, 6(9), 3096-3113.
- Choudhary, D., & Shankar, R. (2012). An STEEP-fuzzy AHP-TOPSIS Framework for Evaluation and Selection of Thermal Power Plant Location: A Case Study from India. *Energy*, 42(1), 510-521.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2023). Revisiting Mixed Methods Research Designs Twenty Years Later. *Handbook of Mixed Methods Research Designs*, 21-36.
- Creutzig, F., Goldschmidt, J. C., Lehmann, P., Schmid, E., von Blücher, F., Breyer, C., ... & Wiegandt, K. (2014). Catching two European Birds with one Renewable Stone: Mitigating Climate Change and Eurozone Crisis by an Energy Transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 1015-1028.
- Çelebi, N., Arlı, F., Soysal, F., & Salimi, K. (2021). Z-scheme ZnO@ PDA/CeO<sub>2</sub> Heterojunctions Using Polydopamine as Electron Transfer Layer for Enhanced Photoelectrochemical H<sub>2</sub> Generation. *Materials Today Energy*, 21, 100765.
- Delaval, B., Rapson, T., Sharma, R., Hugh-Jones, W., McClure, E., Temminghoff, M., & Srinivasan, V. (2022). Hydrogen RD&D collaboration opportunities: Japan.
- Dehghani-Sanij, A. R., Tharumalingam, E., Dusseault, M. B., & Fraser, R. (2019). Study of Energy Storage Systems and Environmental Challenges of Batteries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 192-208.
- Demircan, N., & Bayraktar, B. (2020). Rüzgâr Enerjisi ve Balıkesir Bölgesindeki Potansiyeli. *Balıkesir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 1(2), 84-105.
- Dicks, A. L., & Rand, D. A. (2018). *Fuel Cell Systems Explained*. John Wiley & Sons.
- Downie, C. (2020). Strategies for Survival: The International Energy Agency's Response to a New World. *Energy Policy*, 141, 1-7.
- Dumrul, H., Fatih, A. R., & Taşkesen, E. (2023). Dust Effect on PV Modules: Its Cleaning Methods. *Innovative Research in Engineering*, 183-200.

- Elam, C. C., Padró, C. E. G., Sandrock, G., Luzzi, A., Lindblad, P., & Hagen, E. F. (2003). Realizing the Hydrogen Future: The International Energy Agency's Efforts to Advance Hydrogen Energy Technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(6), 601-607.
- Ersoy, S. R., Terrapon-Pfaff, J., Pregger, T., Braun, J., Jamea, E. M., Al-Salaymeh, A., ... & Viebahn, P. (2024). Industrial and Infrastructural Conditions for Production and Export of Green Hydrogen and Synthetic Fuels in the MENA Region: Insights from Jordan, Morocco, and Oman. *Sustainability Science*, 19(1), 207-222.
- Farhad, S., Saffar-Avval, M., & Younessi-Sinaki, M. (2008). Efficient Design of Feedwater Heaters Network in Steam Power Plants Using Pinch Technology and Exergy Analysis. *International Journal of Energy Research*, 32(1), 1-11.
- Gan, L., Jiang, P., Lev, B., & Zhou, X. (2020). Balancing of Supply and Demand of Renewable Energy Power System: A Review and Bibliometric Analysis. *Sustainable Futures*, 2, 100013.
- García-Olivares, A., Ballabrera-Poy, J., García-Ladona, E., & Turiel, A. (2012). A Global Renewable Mix with Proven Technologies and Common Materials. *Energy Policy*, 41, 561-574.
- García-Olivares, A., Solé, J., & Osychenko, O. (2018). Transportation in a 100% Renewable Energy System. *Energy Conversion and Management*, 158, 266-285.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The Role of Renewable Energy in the Global Energy Transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24, 38-50.
- Gomonov, K., Reshetnikova, M., & Ratner, S. (2023). Economic Analysis of Recently Announced Green Hydrogen Projects in Russia: A Multiple Case Study. *Energies*, 16(10), 4023.
- Goncalves, C., Pinson, P., & Bessa, R. J. (2020). Towards Data Markets in Renewable Energy Forecasting. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 533-542.
- Hamukoshi, S. S., Mama, N., Shimanda, P. P., & Shafudah, N. H. (2022). An Overview of the Socio-economic Impacts of the Green Hydrogen Value Chain in Southern Africa. *Journal of Energy in Southern Africa*, 33(3), 12-21.
- Harmon, R. R., & Cowan, K. R. (2009). A Multiple Perspectives View of the Market Case for Green Energy. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(1), 204-213.
- Hiesl, A., Ajanovic, A., & Haas, R. (2020). On Current and Future Economics of Electricity Storage. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 10(6), 1176-1192.
- Isac, N. (2019). Sustainable Development in Renewable Energy: The New Strategy Direction for the Automotive Industry. *Ecoforum Journal*, 8(1), 1-5.
- Jacobson, M. Z., & Delucchi, M. A. (2011). Providing all Global Energy with Wind, Water and Solar Power, Part I: Technologies, Energy Resources, Quantities and Areas of Infrastructure, and Materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154-1169.
- Kar, S. K., Sinha, A. S. K., Bansal, R., Shabani, B., & Harichandan, S. (2023). Overview of Hydrogen Economy in Australia. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 12(1), 1-27.
- Karagüç, B. (2013). Balıkesir İlinde Jeotermal Enerji Potansiyeli ve Ekonomik Etkileri (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Kockel, C., Nolting, L., Priesmann, J., & Praktijnjo, A. (2022). Does Renewable Electricity Supply Match with Energy Demand?—A Spatio-Temporal Analysis for the German Case. *Applied Energy*, 308, 118226.

- Kovač, A., Paranos, M., & Marciuš, D. (2021). Hydrogen in Energy Transition: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016-10035.
- Lepage, T., Kammoun, M., Schmetz, Q., & Richel, A. (2021). Biomass-to-hydrogen: A Review of Main Routes Production, Processes Evaluation and Techno-Economical Assessment. *Biomass and Bioenergy*, 144, 105920.
- Li, L., Lin, J., Wu, N., Xie, S., Meng, C., Zheng, Y., ... & Zhao, Y. (2022). Review and Outlook on the International Renewable Energy Development. *Energy and Built Environment*, 3(2), 139-157.
- Lui, J., Chen, W. H., Tsang, D. C., & You, S. (2020). A Critical Review on the Principles, Applications, and Challenges of Waste-to-hydrogen Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110365.
- Lund, P. D. (2009). Effects of Energy Policies on Industry Expansion in Renewable Energy. *Renewable Energy*, 34(1), 53-64.
- Luttkus, M. (2002). External Company Management: The Example of the Marl Chemical Park. *Chemical Engineering & Technology*, 25(5), 475-479.
- Maggio, G., Nicita, A., & Squadrito, G. (2019). How the Hydrogen Production from RES Could Change Energy and Fuel markets: A Review of Recent Literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(23), 11371-11384.
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2011). A Review on Solar Energy Use in Industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1777-1790.
- Mohr, D., Muller, N., Krieg, A., Gao, P., Kaas, H. W., Krieger, A., & Hensley, R. (2013). The Road to 2020 and Beyond: What's Driving the Global Automotive Industry? Mc Kinsey & Company. *Inc. Stuttgart*.
- Nicita, A., Maggio, G., Andaloro, A. P. F., & Squadrito, G. J. I. J. (2020). Green Hydrogen as Feedstock: Financial Analysis of a Photovoltaic-Powered Electrolysis Plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(20), 11395-11408.
- Noussan, M., Raimondi, P. P., Scita, R., & Hafner, M. (2020). The Role of Green and Blue Hydrogen in the Energy Transition-A Technological and Geopolitical Perspective. *Sustainability*, 13(1), 298.
- Odenweller, A., Ueckerdt, F., Nemet, G. F., Jensterle, M., & Luderer, G. (2022). Probabilistic Feasibility Space of Scaling up Green Hydrogen Supply. *Nature Energy*, 7(9), 854-865.
- Oliveira, A. M., Beswick, R. R., & Yan, Y. (2021). A Green Hydrogen Economy for a Renewable Energy Society. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 33, 100701.
- Otaki, T., & Shaw, R. (2024). Global Hydrogen Energy: Potentials and Challenges. *Energy, Sustainability and Resilience: A Futuristic Vision from Asia*, 127-138.
- Öner, Ş., & Çam, B. (2022). Akıllı Kent Vizyonu ve Balıkesir Akıllı Kent Girişimleri. *Kafkas Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(26), 1154-1187.
- Özcan, M. (2018). The Role of Renewables in Increasing Turkey's Self-sufficiency in Electrical Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2629-2639.
- Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1513-1524.

- Pechancová, V. (2017). Renewable Energy Potential in the Automotive Sector: Czech Regional Case Study. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 6(4), 537–545.
- Pleißmann, G., Erdmann, M., Hlusiak, M., & Breyer, C. (2014). Global Energy Storage Demand for a 100% Renewable Electricity Supply. *Energy Procedia*, 46, 22-31.
- Pradhan, B. B., Limmeechokchai, B., Chaichaloempreecha, A., & Rajbhandari, S. (2024). Role of Green Hydrogen in the Decarbonization of the Energy System in Thailand. *Energy Strategy Reviews*, 51, 1-16.
- Reddy, S., & Painuly, J. P. (2004). Diffusion of Renewable Energy Technologies-Barriers and Stakeholders' Perspectives. *Renewable Energy*, 29(9), 1431-1447.
- Rezk, M. R., Piccinetti, L., Saleh, H. A., Salem, N., Mostafa, M. M., Santoro, D., ... & Sakr, M. M. (2023). Future Scenarios of Green Hydrogen in the MENA Countries: The Case of Egypt. *Insights Into Regional Development*, 5(4), 92-114.
- Rizzo, G. (2010). Automotive Applications of Solar Energy. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(7), 174-185.
- Rolo, I., Costa, V. A., & Brito, F. P. (2023). Hydrogen-Based Energy Systems: Current Technology Development Status, *Opportunities and Challenges*. *Energies*, 17(1), 1-74.
- Salimi, M., Hosseinpour, M., & N. Borhani, T. (2022). The Role of Clean Hydrogen Value Chain in a Successful Energy Transition of Japan. *Energies*, 15(16), 6064.
- Sattar, M. A., Sameeroddin, M., Deshmukh, M. K. G., & Sami, M. A. (2020). Renewable Energy and its Industrial Applications. *Int. Res. J. Eng. Technol.(IRJET 2020)*, 7(6), 6042-6046.
- Schrotenboer, A. H., Veenstra, A. A., uit het Broek, M. A., & Ursavas, E. (2022). A Green Hydrogen Energy System: Optimal Control Strategies for Integrated Hydrogen Storage and Power Generation with Wind Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168, 112744.
- Schwabe, J. (2024). Regime-driven Niches and Institutional Entrepreneurs: Adding Hydrogen to Regional Energy Systems in Germany. *Energy Research & Social Science*, 108, 1-11.
- Sgouridis, S., Csala, D., & Bardi, U. (2016). The Sower's Way: Quantifying the Narrowing Net-Energy Pathways to a Global Energy Transition. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094009.
- Smith, O., Cattell, O., Farcot, E., O'Dea, R. D., & Hopcraft, K. I. (2022). The Effect of Renewable Energy Incorporation on Power Grid Stability and Resilience. *Science Advances*, 8(9), eabj6734.
- Squadrito, G., Andaloro, L., Ferraro, M., & Antonucci, V. (2014). Hydrogen Fuel Cell Technology. In *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution* (pp. 451-498). Woodhead Publishing.
- Squadrito, G., Giacoppo, G., Barbera, O., Urbani, F., Passalacqua, E., Borello, L., ... & Rosso, I. (2010). Design and Development of a 7kW Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack for UPS Application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(18), 9983-9989.
- Squadrito, G., Maggio, G., & Nicita, A. (2023). The Green Hydrogen Revolution. *Renewable Energy*, 216, 119041.
- Şener, Ş. E. C., Sharp, J. L., & Anctil, A. (2018). Factors Impacting Diverging Paths of Renewable Energy: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2335-2342.

- Şimşek, S., Uslu, S., Şahin, M., Arlı, F., & Bilgiç, G. (2024). Impact of a Novel Fuel Additive Containing Boron and Hydrogen on Diesel Engine Performance and Emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 10846-10860.
- Taibi, E., Gielen, D., & Bazilian, M. (2012). The Potential for Renewable Energy in Industrial Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 735-744.
- Tarkowski, R. (2019). Underground Hydrogen Storage: Characteristics and Prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 86-94.
- Tashakkori, A., Johnson, R. B., & Teddlie, C. (2020). *Foundations of Mixed Methods Research: Integrating Quantitative and Qualitative Approaches in the Social and Behavioral Sciences*. Sage Publications.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023), "2019 – 2023 Stratejik Planı"
- Türkoğlu, E., Çolak, U., Kayakutlu, G., & Argun, I. D. (2021, August). Renewable Energy Investment Decision Evaluation for Local Authorities. In IFIP International Workshop on Artificial Intelligence for Knowledge Management (pp. 197-214). Cham: Springer International Publishing.
- Vivanco-Martín, B., & Iranzo, A. (2023). Analysis of the European Strategy for Hydrogen: A Comprehensive Review. *Energies*, 16(9), 3866.
- Zainal, B. S., Ker, P. J., Mohamed, H., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Rahman, S. A., ... & Mahlia, T. I. (2024). Recent Advancement and Assessment of Green Hydrogen Production Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 1-30.

## EXTENDED SUMMARY

### Research Problem:

This study evaluates the potential of Balıkesir Province, Türkiye, for becoming a central hub for green hydrogen production and export, which aligns with the broader strategy of Türkiye aiming to be a leader in renewable energy. Using geographical, economic, and technological analyses, the research identifies the key factors that make Balıkesir an appropriate location for green hydrogen facilities, especially given its rich renewable energy resources like wind and solar power.

### Methodology:

The research adopts a mixed-methods approach combining data analysis with stakeholder interviews to evaluate the infrastructure, policy environment, and investment trends that affect the feasibility of green hydrogen projects in the region.

### Results and Conclusions:

The findings underscore Balıkesir's strategic advantages, including its proximity to major industrial markets and export ports which facilitate both local and global hydrogen distribution. However, the literature review points out considerable barriers to realizing these benefits, such as the need for substantial financial investment and the development of specialized technologies and skills. The study also explores the regulatory changes needed to support a growing hydrogen economy and offers recommendations for Balıkesir's transition to green hydrogen production, contributing to the scientific discourse on sustainable energy production. The key insights of the study are as follow:

1. Strategic Location and Resource Availability: Balıkesir's geographic position and abundant renewable resources uniquely position it for the development of a green hydrogen economy. Its proximity to key markets like Istanbul and Izmir enhances its potential as a production and distribution hub for hydrogen, complemented by high levels of solar and wind energy potential.

2. **Technological and Economic Aspects:** The current state of technology in Balıkesir for green hydrogen production is in its nascent stages, with two pilot projects using PEM electrolyzers underway. These are primarily research-oriented and indicate the viability of integrating electrolysis technology with existing renewable energy sources. Economically, Balıkesir possesses a well-developed infrastructure capable of supporting large-scale energy projects, making it an ideal candidate for green hydrogen initiatives.

3. **Regulatory and Policy Recommendations:** The study highlights the need for regulatory adjustments to facilitate green hydrogen production, including enhancing financial incentives, streamlining approval processes, and establishing clear safety and environmental regulations.

4. **Barriers and Challenges:** Financial, technological, and regulatory hurdles remain significant obstacles. The capital-intensive nature of renewable energy installations and electrolyzers calls for robust financing mechanisms, and the lack of local expertise in advanced hydrogen technologies needs addressing to scale production.

5. **Comparison with Global Practices:** The study compares Balıkesir's potential with regions like North Rhine-Westphalia in Germany and the Jutland peninsula in Denmark, which have advanced further in hydrogen development due to stronger government support and integrated regional strategies.

6. **Stakeholder Insights and Economic Impact:** Stakeholder interviews reveal a strong consensus on the potential of green hydrogen to act as a catalyst for Balıkesir's economic development. Local government officials, business leaders, and academic experts express a favorable outlook towards aligning green hydrogen projects with regional sustainability goals. These projects are seen not only as a means to achieve energy independence but also as drivers of economic growth by attracting investments, creating jobs, and fostering technological innovation.

7. **Global Integration and Export Potential:** The strategic geographical location of Balıkesir, situated near significant maritime and land routes, offers unique export capabilities to Europe and Asia. By capitalizing on this position, Balıkesir can become a critical node in the international green hydrogen supply chain. This potential is underscored by the global shift towards decarbonization, where countries seek reliable suppliers of clean energy. Thus, developing a robust export infrastructure is deemed crucial, and recommendations include enhancing port facilities and logistics services to handle high volumes of hydrogen export.

8. **Environmental Considerations and Sustainability:** The adoption of green hydrogen in Balıkesir is projected to have significant environmental benefits. By transitioning away from fossil fuels, the region can substantially reduce its carbon footprint and mitigate the effects of climate change. This shift is particularly important for Türkiye, given its commitments under international environmental agreements. Furthermore, the local biodiversity and ecosystems stand to benefit from reduced air and water pollution. The study emphasizes the importance of conducting comprehensive environmental impact assessments prior to the development of hydrogen facilities to ensure sustainable practices are adhered to.

9. **Future Research Directions and Technological Development:** The study identifies areas for future research, particularly in enhancing the efficiency and cost-effectiveness of electrolysis technologies. Continued innovation and technological advancements are critical to overcoming the current limitations of green hydrogen production, such as high energy requirements and associated costs. Collaborations with universities and international research institutions are recommended to spearhead these developments. Additionally, exploring alternative methods of hydrogen production, such as biological processes or advanced chemical pathways, could provide supplementary routes to increase the overall efficiency and sustainability of hydrogen production.

10. **Policy Frameworks and Incentive Structures:** To support the growth of the green hydrogen sector, comprehensive policy frameworks are necessary. These should include incentives for both large-scale and small-scale producers, facilitating a diverse and resilient hydrogen economy. Subsidies, tax rebates, and grants for research and development are suggested to lower the barriers to entry and stimulate innovation. Moreover, policy initiatives should aim to integrate hydrogen into the broader energy system, including support for hydrogen-compatible infrastructure such as fueling stations and grid integration technologies.

The future of Balıkesir's green hydrogen production is not only promising but also critical to Türkiye's goal of establishing itself as a global leader in renewable energy. The region's untapped potential lies in its capacity to balance both energy production and environmental sustainability, creating a model for other provinces and nations aiming to achieve similar objectives. With adequate investment and focused policy initiatives, Balıkesir

can serve as a blueprint for other regions within Türkiye and beyond, demonstrating how local resources can be leveraged to create a sustainable and economically viable energy solution.

One of the key aspects of this study is its focus on the broader economic implications of green hydrogen production in Balıkesir. The shift toward hydrogen as a major energy source could significantly impact local industries, particularly those linked to agriculture, manufacturing, and transportation. The region's abundant wind and solar resources provide a natural synergy with hydrogen production, and by integrating these industries into the hydrogen economy, Balıkesir can diversify its economic base while reducing its dependency on traditional energy sources. This transformation has the potential to create thousands of new jobs and boost the local economy.

Moreover, the global hydrogen economy is expanding rapidly, and Balıkesir's ability to position itself within this emerging market can lead to long-term strategic benefits. As more countries commit to reducing carbon emissions, the demand for green hydrogen will rise, making Balıkesir an attractive partner for international collaborations. This study highlights the importance of aligning local development plans with global sustainability goals to ensure Balıkesir's green hydrogen sector grows in a way that is both profitable and ecologically responsible.

Ultimately, the transition to green hydrogen production in Balıkesir represents an essential step towards a sustainable and prosperous future, with far-reaching benefits for both the region and the nation.