



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Antalya İlindeki Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Yeşil Hidrojen Üretiminin Ekonomik Analizi

 Ahmet ARSLAN ^a,  Talha ERTÜRK ^a,  Battal DOĞAN ^{a,*},  Murat Kadir YEŞİLYURT ^{b,*}

^a Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

^b Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarların e-posta adresi: battaldogan@gazi.edu.tr; kadir.yesilyurt@bozok.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1266905

ÖZ

Çevresel sorunlar, azalan ve sınırlı fosil yakıtlar ile artan enerji ihtiyacı alternatif çevreci enerji kaynaklarını önemli hale getirmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretilebilmektedir. Ancak, elektrik enerjisinin uzun mesafelere kablolarla taşınmasının maliyeti oldukça yüksektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektriğin hidrojen üretiminde kullanılması ve üretilen hidrojenin taşınması durumunda enerji maliyetleri azalacaktır. Bu çalışmada, Antalya ilinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin, hidrojen çiftliği konseptine uygun olarak hidrojen üretiminde kullanımının ekonomik açıdan incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Antalya ilinin, insan sirkülasyonu bakımından yoğun olması ve bu ilde biyokütle enerjisi potansiyelinin, potansiyel güneş radyasyonunun ve güneşlenme süresinin fazla olmasının yanı sıra bu il güneş enerjisi, coğrafi konum, yeryüzü şekilleri, hidroelektrik ve rüzgâr enerjisi açısından verimlidir. Antalya ilinin yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik veriler kamu kuruluşlarından ve özel kuruluşlardan temin edilerek, bu kaynaklardan üretilen elektriğin direkt şebekeye verilmesi durumunda elde edilecek gelir hesaplanmıştır. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik kullanılarak yeşil hidrojen üretilmesi durumundaki gelir de belirlenmiştir. Antalya’da bulunan yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak yıllık üretililecek hidrojen miktarının yaklaşık %77’si hidroelektrik enerjisinden, %12’si biyokütle enerjisinden, %6’sı güneş enerjisinden ve %5’i rüzgâr enerjisinden elde edileceği tespit edilmiştir. Hidrojen üretiminden elde edilen gelir elektrik üretimi gelirinden %33.68 daha fazladır. Bu durum hidrojen ekonomisi açısından önemlidir.

Anahtar Kelimeler: Yeşil hidrojen, Yenilenebilir enerji, Hidrojen çiftliği

Economic Analysis of Green Hydrogen Production from Renewable Energy Sources in Antalya Province

ABSTRACT

Environmental problems, decreasing and limiting fossil fuels, and increasing energy needs make alternative environmentally friendly energy sources important. Electricity can be generated from renewable energy sources. However, the cost of transporting electrical energy over long distances by cables is quite high. If the electricity obtained from renewable energy sources is used in hydrogen production and the produced hydrogen is transported, energy costs will decrease. In this study, an economic examination of the usage of electrical energy obtained from renewable energy sources in Antalya province in hydrogen production was carried out by the concept of a hydrogen farm. Antalya province is crowded in terms of human circulation and in this province biomass energy potential, potential solar radiation, and sunbathing duration are high; meanwhile, this province is efficient in terms of solar energy, geographic location, landforms, hydroelectric, and solar energy. The data on the renewable energy resources of Antalya province were obtained from public and private institutions, and the income to be obtained if the electricity produced from these sources was directly supplied to the grid was calculated. In addition, the income in the case of green hydrogen production using electricity produced from

renewable energy sources was also determined. It has been determined that approximately 77% of the annual hydrogen production that can be produced using renewable energy sources in Antalya will be obtained from hydroelectric energy, 12% from biomass energy, 6% from solar energy, and 5% from wind energy. Income obtained from hydrogen production is 33.68% more than electricity generation revenue. This situation is essential in terms of the hydrogen economy.

Keywords: *Green hydrogen, Renewable energy, Hydrogen farm*

I. GİRİS

Fosil kökenli yakıtların teknolojinin gelişmesi ve aşırı kullanım sonucu hızla tükenmesi araştırmacıları alternatif yakıt arayışına yönlendirmiştir. Alternatif yakıt olarak hidrojen kullanımı son yıllarda araştırılmaktadır. Hidrojen doğada saf halde bulunmadığından üretilmesi gerekmektedir. Hidrojen enerjisi çok farklı yollarla doğrudan veya dolaylı olarak elde edilebilmektedir [1]. Hidrojen doğalgaz buhar reformasyonu, kömür gazlaştırma, termokimyasal su ayırma, yüksek sıcaklıkta elektroliz yoluyla üretilmektedir. Bu üretim için güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır [2]. Hidrojen üretimi gri, mavi ve yeşil olarak renk kodlarına ayrılır. Gri hidrojen kömür gazlaştırma, mavi hidrojen doğal gaz buhar reformasyonu ile yeşil hidrojen ise yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmektedir. Yeşil hidrojenin üretimi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisinin suyun elektrolizinde kullanılması ile gerçekleştirilir. En çok tercih edilen ve en gelişmiş elektroliz yöntemlerinden biri alkali elektrolizdir. Alkali elektrolizörler ortalama %85 verime sahiptir. Alkali elektrolizleri 80°C de çalışır [3]. Literatürde; hidrojenin, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özet olarak sunulmuştur.

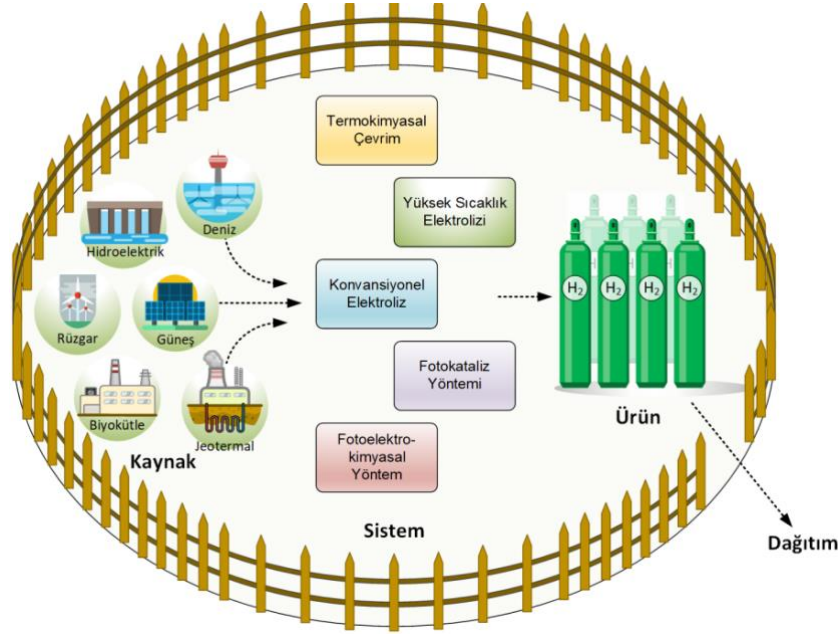
Kai ve ark. [4] çalışmalarında, Yakushima adasında hidroelektrik enerjisini kullanarak suyun elektrolizi ile hidrojen üretimini araştırmışlardır. Adalar; güneş ve rüzgâr açısından verimli olduğundan, yeşil hidrojen üretimi için uygun bölgelerdir. Acar ve Dinçer [2] yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarından hidrojen üretiminin ekonomik, sosyal ve çevresel etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında farklı hidrojen üretim yöntemlerinin maliyetlerini, enerji ve ekserji verimlerini karşılaştırmışlardır. Little ve ark. [5] yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin depolanarak şebekeden bağımsız güç kaynaklarına elektriksel entegrasyonunu incelemişlerdir. Öztürk ve ark. [6] çeşitli hidrojen üretim yöntemlerinin gelecek dönem projeksiyonunu çalışmışlardır. Akyüz [7] çalışmasında, yenilenebilir enerji kaynaklarından (güneş ve rüzgâr enerjisi) üretilen elektrik enerjisinin hidrojen üretiminde kullanımını incelemiştir. Güneş kaynaklı enerjiden elektrik üretimi ve suyun elektrolizi ile hidrojen üretiminin ekonomik açıdan değerlendirilmesini gerçekleştirmiştir. Balıkesir bölgesinde 1 kW rüzgâr ve 0,56 kW elektroliz ünitesinden yıllık 20,3 kg hidrojen üretilebileceği belirlenmiştir. Dursun [8] hibrit güç sisteminin akü grubu enerji verimliliğini, üç farklı güç kontrol algoritması kullanarak araştırmıştır. Sistemde yer alan proton geçirimli membran tipi elektrolizör Matlab-Simulink ortamında modellenerek, sistemin hidrojen üretim kapasitesini hesaplamış ve deneysel yolla üretilen hidrojen miktarı ile karşılaştırmıştır. Yapılan hesaplamaya göre sistemin yıllık hidrojen üretim kapasitesi, İstanbul'un 2010 meteorolojik şartlarına göre 34,3 kg olarak belirlenmiştir. Tutar ve Eren [9] çalışmalarında, hidrojen ekonomisinin SWOT analizini gerçekleştirmişlerdir. Üretim, depolama ve taşıma açısından hidrojenin zayıf ve güçlü yanlarını ortaya çıkaran çalışmada gelecek dönemlerde hidrojen çağının başlayacağını belirtmişlerdir. Veziroğlu ve Şahin [10] güneş-hidrojen enerjisi sistemi ve sentetik fosil yakıt sistemini, üretim maliyetleri, çevresel zararlar ve kullanımı dikkate alınarak karşılaştırmıştır. Veziroğlu ve Momirlan [11] çalışmalarında, hidrojen üretim teknolojilerini incelemişlerdir. Smith ve ark. [12] Hollandalı hidrojen paydaşları arasındaki mevcut fikirlerin modellenmesini ve simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Hidrojenin önümüzdeki yıllarda üretim ve depolama açısından daha ekonomik çözümlere ihtiyacının olduğunu belirlemişlerdir. Seymour ve ark. [13] Avrupa'da hidrojen ve yakıt hücrelerinde kamu araştırmalarının girdi ve çıktı göstergelerini karşılaştırmışlardır. Dinçer ve Acar [14] hidrojen üretiminde belirli kavramsal öğelerin tartışılmasını ve önemini araştırmışlardır. Yeşil

hidrojen üretiminin yaygınlaştırılmasının üretim maliyetlerindeki düşüşe bağlı olacağını ifade etmişlerdir. Çelik ve Yıldız [15] yeşil hidrojen üretim yöntemlerini değerlendirmişlerdir. Son yıllarda hidrojen üretimine yönelik yapılan farklı üretim yöntemleri elektroliz yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Afgan ve ark. [16] hidrojen üretiminin çok kriterli prosedür ve sürdürülebilirlik endeksi derecelendirmesine yönelik araştırma gerçekleştirmişlerdir. Wang ve ark. [17] öncelikle suya ve biyokütleyle dayalı hidrojen üretim teknolojilerini analiz etmişlerdir. Hidrojen üretim teknolojilerinin ekonomik, teknolojik ve çevresel etkilerini karşılaştırmışlardır. Rosyid ve ark. [18] hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından, nükleer enerjiden veya mevcut elektrik santrallerinin tam zamanlı işletilmesinden elde edilen elektriğin kullanılmasını araştırmışlardır. Toprak [19] çalışmasında rüzgâr enerji santralinden üretilen elektrik enerjisini elektroliz sisteminde kullanarak hidrojen üretim miktarını belirlemiştir. Bu çalışmada İzmir-Çeşme-Germiyan köyünde yer alan 3 adet rüzgâr türbinli santralin yıllık ürettikleri enerji değerlerini baz almıştır. Üretilen elektrik enerjisine göre üretilebilecek hidrojen miktarları ve birim elektrik enerji maliyeti ile birim hidrojen enerji maliyet değerlerini hesaplamıştır. Ayrıca rüzgâr santralinde yük faktörlerinin değişimine göre üretilecek enerji ve hidrojen miktarlarını da belirlemiş ve maliyet analizleri yapmıştır. Bir yılda 1. türbin 21582 kg, 2. türbin 21772,1 kg ve 3.türbin 22178,4 kg hidrojen üretebilme potansiyeline sahiptir. Santralin yıllık ortalama yük faktörünü 0,30 mertebesinde belirlenmiştir. Bu değere göre hidrojen maliyetini 4,097 \$/kg olarak bulmuştur. Aslan ve Özcan [20] sürdürülebilir kalkınma ile enerjinin ilişkisini değerlendirmişler ve hidrojen ekonomisi kavramları üzerine araştırma yapmışlardır.

Çalışma kapsamında Antalya ilindeki yenilenebilir enerji kaynaklarından yeşil hidrojen üretimi hidrojen çiftliği konsepti ile planlanmıştır. İlimizin güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve biyokütleden toplam elektrik üretimi belirlenmiştir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elektroliz yöntemiyle hidrojen üretimi miktarı ve toplam maliyeti detaylı analizlerle araştırılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda genellikle yenilenebilir kaynaklardan bir veya ikisi birlikte kullanılarak hidrojen üretimi potansiyeli hesaplanmaktadır. Çalışmada Antalya ilinin güncel nüfus ve elektrik üretim tesisleri kapasiteleri kullanılmıştır. Ek olarak; Antalya ilinde yaşayan ve ili turizm amaçlı ziyaret eden nüfusun enerji giderleri de dikkate alınmıştır. Şehirdeki yenilenebilir enerji kaynaklarından toplam elektrik üretimi belirlenmiş ve bu enerjinin yeşil hidrojene dönüşüm potansiyelinin ülkemiz ekonomisine katkısı hesaplanmıştır.

II. YÖNTEM

Bu çalışmada yenilenebilir enerji potansiyeli göz önüne alınarak Antalya ili için Şekil 1’de gösterilen hidrojen çiftliği konsepti oluşturulmuştur. Bu kapsamda, Antalya ilinde bulunan güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi, hidroelektrik enerji ve biyogaz enerji santralleri belirlenmiştir. Santrallerin kurulu güç verileri kamu kurumlarından ve özel kurumlardan temin edilmiştir. Elde edilen verilerle yenilenebilir enerji santralleri için yıllık potansiyel elektrik üretimleri hesaplanmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin suyun elektrolizinde kullanılması suretiyle üretilebilecek hidrojenin potansiyeli ve ekonomik değeri belirlenmiştir.



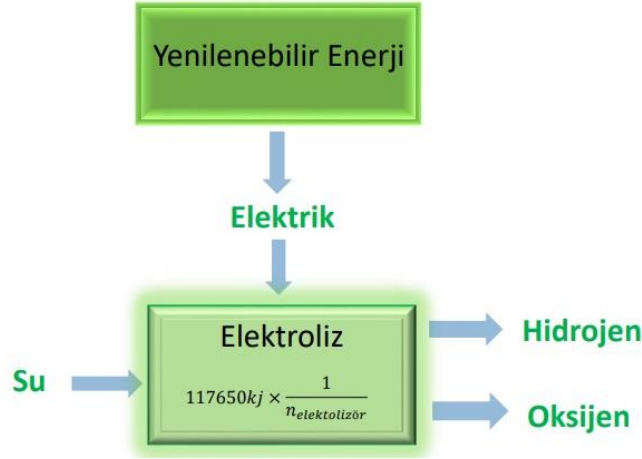
Şekil 1. Hidrojen çitliđi konsepti [3]

A. ANTALYA NÜFUS VERİLERİ

Türkiye Cumhuriyeti Kültür ve Turizm bakanlığından alınan verilere göre 2021 yılında Antalya ilini yurtdışından 12.989.618 ve yurtiçinden 3.669.437 olmak üzere toplam 16.659.055 kişi turizm amaçlı ziyaret etmiştir. Yabancı misafirler ortalama 3,89 gün; yerli misafirler ise ortalama 2,74 gün kalmıştır. Strateji ve Bütçe başkanlığından alınan verilere göre Türkiye'nin yıllık kişi başı elektrik tüketimi 2002-2019 yılları arasında yıllık ortalama %3,8 artış göstererek 1.932 kWh/kişi seviyesinden 3.652 kWh/kişi seviyesine yükselmiştir. TÜİK tarafından yayınlanan Antalya ili 2023 yılı nüfusu 2.671.301 kişidir.

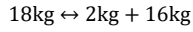
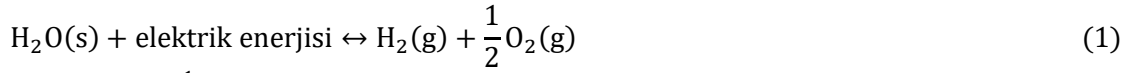
B. ELEKTROLİZ İLE HİDROJEN ÜRETİMİ

Dünyadaki hidrojen üretiminin %20'lik bölümü elektroliz yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Elektroliz yöntemi ile en saf hidrojen elde edilir. Hidrojen, elektrik enerjisinin gerekli olduğu elektrokimyasal yöntemlerle üretilebilir. Şekil 2'de gösterildiği gibi elektrik enerjisinin yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilmesi yeşil hidrojen üretimi için gereklidir. Kullanılacak olan elektrolizör elektrolit ve akışkana bağlı olarak Alkali, PEM (Proton Elektrolit Membranlı) ve Katı Oksit olarak sıralanabilir. Alkali elektroliz yönteminin verimi, birçok etkene bağlı olarak değişebilir. Elektroliz yöntemi ile üretilecek 1 kg yeşil hidrojen için gerekli enerji miktarı 117.650 kJ kadardır [21]. Elektrolizör verimine bağlı olarak verimi değişen ve çalışma kapsamında %85 verimle çalıştığı kabul edilen sistemde 1 kg hidrojen üretmek için 138.411 kJ enerji gereklidir.



Şekil 2. Yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak üretilen hidrojenin iş akış şeması

Sudan hidrojen üretiminin kimyasal reaksiyonu aşağıda verilmektedir.



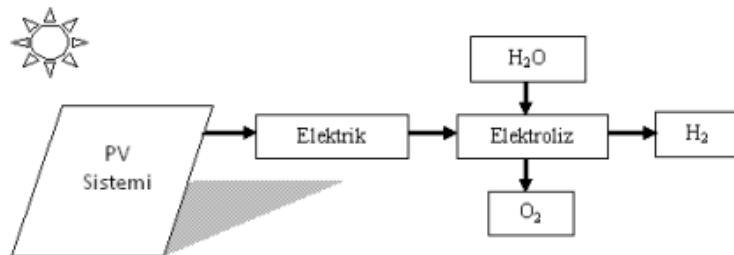
Bu kimyasal eşitlikle 1 kg su kullanılarak 0,111 kg H₂ üretilir. Yeşil hidrojen üretimi sırasında zararlı emisyonlar oluşmamaktadır. Bu nedenle çevresel açıdan uygun bir üretim metodu olduğu söylenebilir.

C. GÜNEŞ ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Antalya ili Akdeniz bölgesinde yer almaktadır. Türkiye güneş enerji potansiyeli atlasına (GEPA) göre Antalya ilinin yıllık güneşlenme süresi toplam 2.741 saattir. Buna göre Antalya günde ortalama 7,5 saat güneşlenme süresine sahiptir. Gelen yıllık toplam Güneş enerjisi 1.527 kWh/m²'dir. Güneş enerjisi kullanılarak üretilen elektrik enerjisi miktarı aşağıdaki eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$W = P \times t \times d \quad (4)$$

Burada; elektrik enerjisi miktarı (W), kurulu güç (P), tesisin günlük çalışma saati (t) ve bir yılda çalıştığı gün sayısı (d)'dir. Güneş enerjisi destekli yeşil hidrojen üretimi için iş akış şeması Şekil 3'de gösterilmiştir. PV sistemi ile üretilen elektrik enerjisi elektrolizöre aktarılarak sudan hidrojen üretimi gerçekleştirilecektir.



Şekil 3. Güneş enerjisi destekli yeşil hidrojen üretimi iş akış şeması [22]

Çalışmada Antalya’da bulunan güneş enerji santrallerinin yaklaşık yıllık üretim miktarları Tablo 1’de verilmiştir. Bu veriler Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) ve Antalya ili tesislerinin kurumsal internet sayfalarından alınmıştır. Santraller içerisinde en yüksek güneş enerjisi kurulu gücü 23,4 MW’dır.

Tablo 1. Antalya’da bulunan güneş enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANSA DERÇ EDİLEN YILLIK ÜRETİM (MWh)
AKSEKİ BÜYÜKALAN 1 GES	AKSEKİ	23,4	46.800
TAŞKESİĞİ GES	KORKUTELİ	10,39	20.751,739
SERRA GES	AKSEKİ	5,6	11.200
KÜÇÜKKÖY GES	KORKUTELİ	18,61	37.220
G3-ANTALYA-2-1	AKSEKİ	20	40.000
G3-ANTALYA-1-1-2	AKSEKİ	9	18.000
G3-ANTALYA-1-1-1	AKSEKİ	11	22.000
G3-ANTALYA-3-19 GES	KORKUTELİ	10	20.000

Antalya’daki güneş santrallerinden potansiyel olarak üretilen elektrik ve tekabül ettiği enerji miktarı Eşitlik 5’te gösterilmiştir.

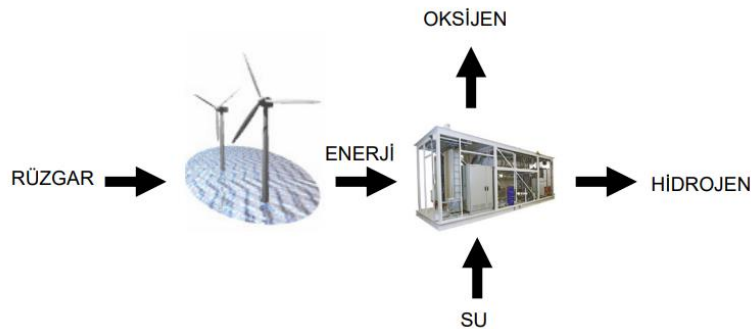
$$215.971.739 \text{ kWh} \cong 7,775 \times 10^{11} \text{ kJ} \quad (5)$$

Antalya’daki güneş enerjisi santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak elektroliz yöntemiyle üretilebilecek yıllık hidrojen miktarı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{7,775 \times 10^{11} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 5.617.328,103 \text{ kg} \quad (6)$$

D. RÜZGÂR ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Rüzgârın oluşmasındaki en temel etken; sıcak havanın yoğunluğunun soğuk havanın yoğunluğundan az olması nedeniyle sıcak havanın yükselmesi ve bu şekilde havanın yer değiştirmesinden kaynaklanan akımlardır. Sıcak hava ile soğuk havanın yer değiştirmesinin temel kaynağı güneştir. Dolayısıyla rüzgâr enerjisinin asıl kaynağı güneştir. Güneş açısından verimli olan Antalya ilinde rüzgâr kaynaklı yenilenebilir enerji potansiyeli yüksektir. Rüzgârın hızı kinetik enerjinin sebebidir. Bu kinetik enerji rüzgâr türbini yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Rüzgâr türbini yatay ve dikey olmak üzere ikiye ayrılır ve kullanılacağı yere göre farklılık gösterir. Rüzgâr enerjisinden üretilen elektrik Şekil 4’de verildiği gibi elektroliz yönteminin enerji ihtiyacını karşılamaktadır.



Şekil 4. Rüzgâr enerjisi destekli hidrojen üretimi için akış şeması [23]

Atmosferde havanın yüksekliğe bağlı olarak yoğunluğu değişmektedir. Bu değişim aşağıdaki eşitlikten belirlenebilir.

$$\rho = \rho_0 - (1,194 \times 10^{-4} \times H) \quad (7)$$

Burada; türbinin bulunduğu yükseklikteki havanın yoğunluğu (ρ), deniz seviyesindeki havanın yoğunluğu (ρ_0) ve rakım (H) ile gösterilmektedir.

Yatay eksenli rüzgâr türbinindeki süpürme alanı Eşitlik 8’de verilmektedir.

$$A = \frac{\pi \times R^2}{4} \quad (8)$$

Burada; türbinin taradığı alan (A) ve kanat çapı (R) ile gösterilmektedir.

Bir rüzgâr türbininin gücü aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \quad (9)$$

Burada; türbin gücü (P), türbinin bulunduğu yükseklikteki havanın yoğunluğu (ρ), türbinin taradığı alan (A) ve havanın ortalama hızı (v) ile gösterilmektedir.

Rüzgâr türbininden elde edilen elektrik enerjisi Eşitlik 10 kullanılarak hesaplanabilir.

$$W = P \times t \times d \times n \quad (10)$$

Burada; elektrik enerjisi miktarı (W), türbin gücü (P), günlük çalışma saati (t), yılda çalıştığı gün sayısı (d) ve türbin-jeneratör grubu verimi (n) ile gösterilmektedir.

Antalya ilinde ön lisans alan rüzgâr türbinleri Tablo 2’de verilmektedir. Bu çalışmada, hidrojen üretim potansiyeli belirlendiğinden; kurulmamış olan, ancak ön lisans almış olan santraller de hesaplara dahil edilmiştir.

Tablo 2. Antalya’da bulunan rüzgâr enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANS ALINAN YILLIK ÜRETİM (MWh)
D1 RES	MANAVGAT	10	35.000
D3 RES	AKSEKİ	10	35.000
DÖKÜKDAĞI RES	MANAVGAT	30	105.000

Antalya ilinde ön lisans alan rüzgâr santrallerinden potansiyel olarak üretilebilecek elektrik enerjisi miktarı ve bunun tekabül ettiği enerji miktarı Eşitlik 11 ile hesaplanabilir.

$$175.000 \text{ MWh} \cong 6,3 \times 10^{11} \text{ kJ} \quad (11)$$

Antalya’daki rüzgâr enerjisi santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak elektrolizle üretilebilecek yıllık hidrojen miktarı Eşitlik 12 ile hesaplanmıştır.

$$\frac{6,3 \times 10^{11} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 4.551.661,356 \text{ kg} \quad (12)$$

E. HİDROELEKTRİK ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Suyun hareketinden ve yükselti faktöründen yararlanılarak hidrolik enerji ile elektrik üretilmektedir. Bu tesislerde; suyun kinetik enerjisi, hidrolik türbin yardımıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Hidrolik sistemlerde kullanılan türbinler yükseltiye (düşü), türbin çıkış güçlerine, türbin miline, suyun akış doğrultusuna ve suyun etki tipine göre sınıflandırılabilir. Suda oluşan enerjiyi aktarmak için kullanılan hidrolik sistemlerin enerjisi Eşitlik 13 ile hesaplanmaktadır.

$$P = \dot{m} \times g \times h \quad (13)$$

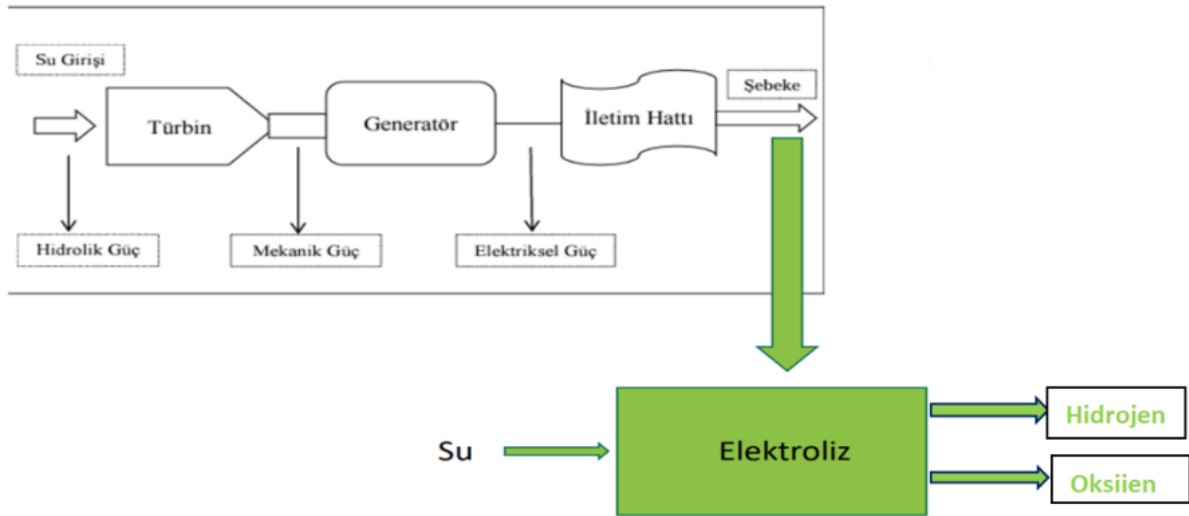
Burada kurulu güç (P), kütleli debi (\dot{m}), yerçekimi ivmesi (g) ve düşü (h) ile gösterilmektedir.

Hidroelektrik santralinden elde edilen elektrik enerjisi aşağıdaki eşitlikten belirlenebilir.

$$W = P \times t \times d \times n \quad (14)$$

Burada; elektrik enerjisi miktarı (W), kurulu güç (P), günlük çalışma saati (t), yıllık çalışma gün sayısı (d) ve türbin-jeneratör verimi (n) ile gösterilmektedir.

Hidroelektrik santralinden üretilen elektrik kullanılarak Şekil 5'teki gibi yeşil hidrojen üretilmektedir. Burada su hem elektrik hem de hidrojen üretiminde kilit rol oynamaktadır. Bu tesisler emisyonlar açısından çevrecidir.



Şekil 5. Hidroelektrik enerjisinden hidrojen üretimi iş akış şeması

Antalya ilinde yer alan hidroelektrik üretim tesislerinin kurulu güç bilgileri Tablo 3'te verilmiştir. Antalya ili hidroelektrik güç açısından ülkemizde önemli merkezlerinden birisidir. Bu nedenle yeşil hidrojen üretimi açısından ayrıca incelenmelidir.

Tablo 3. Antalya'da bulunan hidroelektrik enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANSA DERÇ EDİLEN YILLIK ÜRETİM (MWh)
TOCAK 1 HES	KUMLUCA	4,76	14.930
ALAKIR HES	KUMLUCA	2,06	14.060
KOZDERE HES	KUMLUCA	9,265	40.690
GÖKÇELER BARAJI VE HES	GAZİPAŞA	2,45	8.660
GÖNGELE HES	ALANYA	4,45	13.350
DEREKÖY REG. VE HES	KUMLUCA	5,64	11.950
YALNIZARDIÇ HES	ALANYA	41,36	97.941
MANAVGAT BARAJI VE HES	MANAVGAT	48	147.000
OYMAPINAR HES	MANAVGAT	540	1.620.000
ÇANDIR 1 REG. VE HES	KONYAALTI	1,71	6.500
KARGI REG. VE HES	ALANYA	6,144	13.706
ESKİKÖY REG. VE HES	SERİK	2,63	8.806
DİM HES	ALANYA	38,25	122.890
ÇENGER REG. VE HES	AKSEKİ	20,12	75.805
BUCAKKÖY HES	ALANYA	9,303	48.846
DEĞİRMEN REG. VE HES	AKSEKİ	6,84	19.807,644
ANAK REG. VE HES	MANAVGAT	3,75	15.066
KÜRCE REG. VE HES	KUMLUCA	12,046	47.655
TINAZTEPE HES	AKSU	7,5	37.783
KEPEZ 2 HES	KEPEZ	6	16.000
KEPEZ 1 HES	KEPEZ	26,4	114.000
KIZILDÜZ/ŞAHMALLAR HES	GAZİPAŞA	30	90.000
SİNANHOCA REG. VE HES	İBRADI	104,14	312.430
İLERİ REG. VE HES	ALANYA	9,72	29.160

Antalya'daki hidroelektrik santrallerinden potansiyel olarak üretilen elektrik enerjisi miktarı ve bunun tekabül ettiği enerji miktarı aşağıda gösterilmiştir.

$$2.927.035,644 \text{ MWh} \cong 1,05373 \times 10^{13} \text{ kJ} \quad (15)$$

Hidroelektrik enerji santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak elektrolizle üretilebilecek yıllık hidrojen miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

$$\frac{1,05373 \times 10^{13} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 76.130.509 \text{ kg} \quad (16)$$

F. BİYOKÜTLE ENERJİSİNDEN YEŞİL HİDROJEN ÜRETİMİ

Biyokütle organik bir enerji kaynağıdır. Zirai ürünler, orman ürünlerine benzer maddelerin kalıntıları, kentsel atıkların organik bileşenleri gibi maddeler biyokütle olarak kabul edilir. Biyokütle sıvı ve gaz yakıtlara biyokimyasal veya termokimyasal yollar kullanılarak dönüştürülebilir. Yakıtlar biyogaz elde edilmesi için kullanılabilir veya organik yakıt olarak direkt yakma ile yakıtın enerjisi de kullanılabilir. Türkiye'de 3.225 belediye bulunmakta olup, bunlar arasında sadece 3.129 belediye atık hizmeti vermektedir. Bu hizmeti alan toplam ortalama nüfus 57.800.347 kişidir. Kentsel atık miktarlarının ortalaması alındığında günlük olarak kişi başına düşen miktar 1,15 kg olarak belirlenmiştir [24]. Bu değere göre, bir kişi yıllık olarak ortalama 0,42 ton atık oluşturmaktadır [25]. Atık hizmeti alan toplam

nüfusun ortalama yıllık atık miktarı 24.276.145 ton/yıl'dır. Çöp gazının ısı değeri 18-27 kJ/Nm³ arasında değişmektedir. Çöp gazının ortalama enerji potansiyeli yaklaşık olarak 4,85 milyon kWh olarak bulunmuştur [26]. Bu değerler dikkate alınacak olursa ülkemiz devasa kentsel organik katı atıklara sahiptir. Bu da kentsel katı atıkların oldukça iyi bir biyogaz üretim potansiyeline sahip olduğunu açıklamaktadır.

Biyokütle tesisinden elde edilen türbin gücü ($W_{\text{türbin}}$) Eşitlik 17 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$W_{\text{türbin}} = \dot{m}_{\text{buhar}} \times (h_2 - h_3) \quad (17)$$

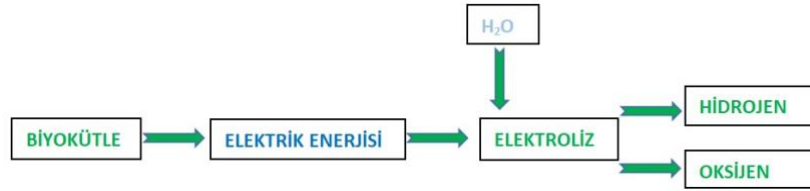
Burada; yakma sistemindeki buhar kütleli debisi (\dot{m}_{buhar}) ve özgül entalpi (h)'dir. Özgül entalpi değeri; özgül entropi (s) değerlerine göre bulunur.

Biyokütle enerjisinden üretilen gazın türbinden ve jeneratör sisteminden geçişi sonucu elde edilen elektrik enerjisi (W_{elektrik}) Eşitlik 18 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$W_{\text{elektrik}} = W_{\text{türbin}} \times \eta_{\text{jeneratör}} \quad (18)$$

Burada türbinin verim değeri ($\eta_{\text{jeneratör}}$) ile gösterilmiştir.

Şekil 6'da biyokütle kaynaklı elektroliz sistemi kullanılarak yeşil hidrojen üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 6. Biyokütle enerjisinden elektroliz ile hidrojen üretimi iş akış şeması

Antalya ilindeki biyokütle kaynaklı güç santralleri kurulu gücü Tablo 4'te verilmiştir. Bu tesislerde toplanan atıkların çürütülmesi ve yakılması sonucunda elde edilen elektrik enerjisi çevresel açıdan önem arz etmektedir. Böylesine önemli bir kaynaktan üretilen elektrik, hidrojen gibi çevreci bir yakıtın sudan üretilmesinde kullanılabilir.

Tablo 4. Antalya'da bulunan biyokütle enerji santralleri ve yıllık üretim potansiyelleri

TESİS ADI	TESİS İLÇESİ	KURULU GÜÇ (MW)	LİSANSA DERÇ EDİLEN YILLIK ÜRETİM (MWh)
ITC ANTALYA BES	KEPEZ	28,27	212.025
AGT BİYOKÜTLE TESİSİ	DÖŞEMEALTI	5,37	30.072
ITC ALANYA BES	ALANYA	5,66	39.620
AREL ENERJİ MANAVGAT BES	MANAVGAT	3,6	25.200
TEMİZ ÇEVRE BES	SERİK	6,78	47.460
ANTKEM BES	KEPEZ	4,05	30.375
T-ENERGY KUMLUCA BES	KUMLUCA	9,375	75.000

Aşağıda; Antalya'daki biyokütle santrallerinden potansiyel olarak üretilen elektrik enerjisi miktarı ve bunun tekabül ettiği enerji miktarı gösterilmiştir.

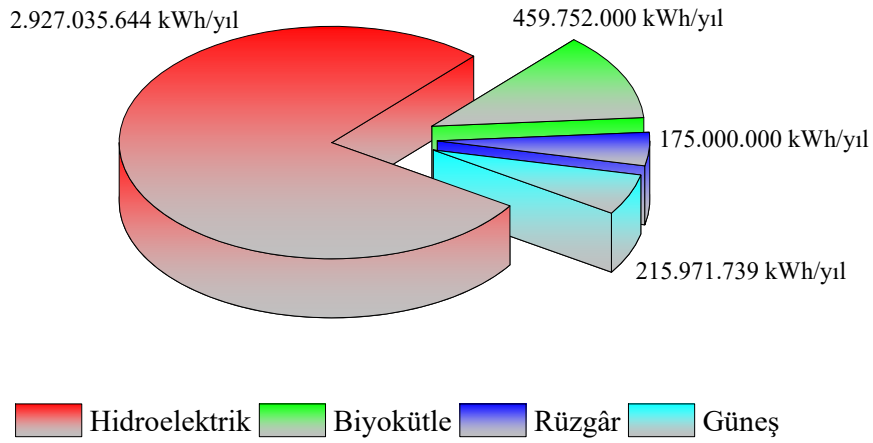
$$459.752 \text{ MWh} \cong 1,6551 \times 10^{12} \text{ kJ} \quad (19)$$

Antalya'daki biyokütle enerji santrallerinden üretilen elektrik kullanılarak üretilen yıllık hidrojen miktarı aşağıda verilmiştir.

$$\frac{1,6551 \times 10^{12} \text{ kJ}}{138.411 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 11.957.864,62 \text{ kg} \quad (20)$$

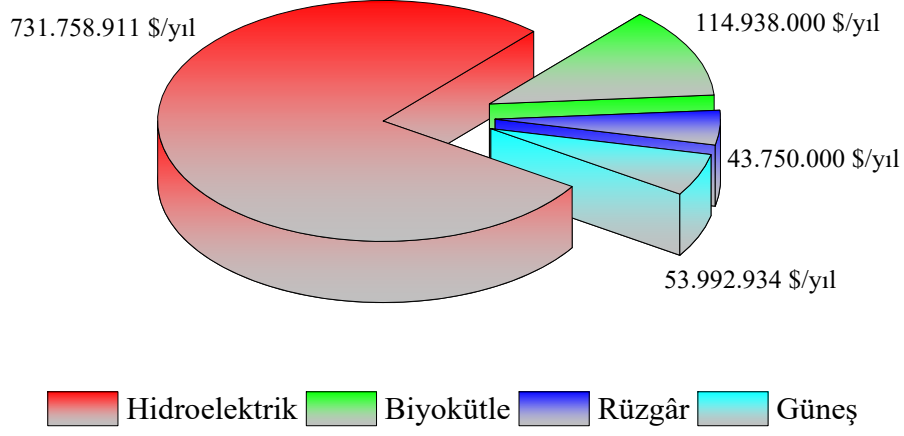
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Literatür taramasına ve EPDK'dan alınan verilere göre Antalya ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretililecek elektrik enerjisi potansiyeli Şekil 7'de gösterilmiştir. Hidroelektrik santrallerinden toplam 2.927.035.644 kWh/yıl, biyokütle enerji santrallerinden toplam 459.752.000 kWh/yıl, güneş enerji santrallerinden toplam 215.971.739 kWh/yıl ve rüzgâr enerji santrallerinden toplam 175.000.000 kWh/yıl elektrik enerjisi potansiyeli belirlenmiştir. En yüksek enerji potansiyeli hidroelektrik santrallerinde meydana gelmiştir. Bu enerjinin hidrojen üretiminde kullanılması çevresel etkiler açısından önemlidir.



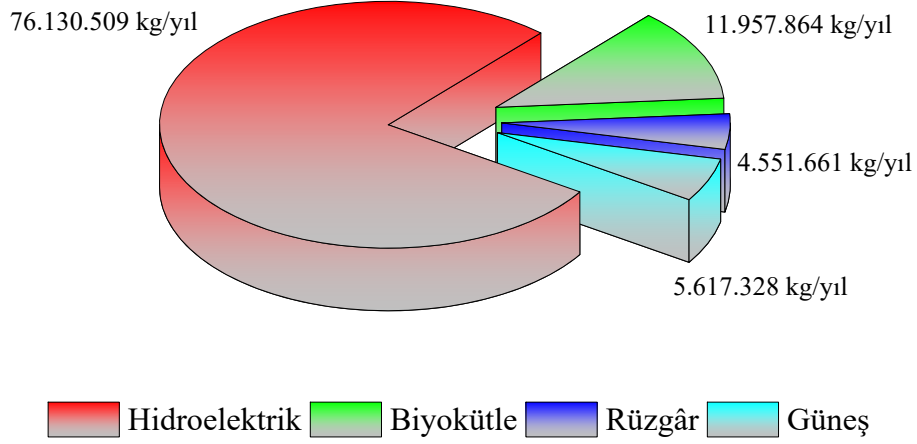
Şekil 7. Antalya'daki yenilenebilir kaynaklardan üretililecek yıllık elektrik enerjisi miktarları

Antalya ilinde yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisi, günümüz piyasa şartlarında (elektrik satış fiyatı 0,25 \$/kWh) şebekeye aktarılacak olursa, elde edilen gelir Şekil 8'de gösterilmektedir. Toplam gelir 944.439.845 \$/yıl'dır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin ekonomik boyutu oldukça yüksek olup ülkemizin enerji ekonomisine katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Ancak söz konusu elektrik üretiminin hidrojen üretimine yönlendirilmesi elde edilecek geliri arttıracaktır.



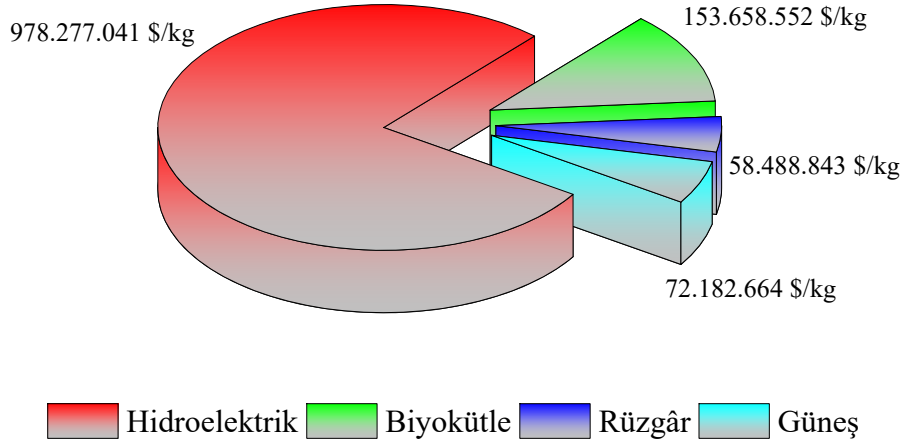
Şekil 8. Antalya'da bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilecek elektrik geliri miktarları

Bu çalışma kapsamında Antalya ilinde yenilenebilir enerji kaynaklı elektriğin kullanımıyla üretilen yeşil hidrojen miktarları hesaplanarak Şekil 9'da verilmiştir. Toplam hidrojen üretiminin yaklaşık %77'si hidroelektrik enerjisinden, %12'si biyokütle enerjisinden, %6'sı güneş enerjisinden ve %5'i rüzgâr enerjisinden elde edilmektedir. Antalya ilindeki hidroelektrik santralleri hidrojen üretimi açısından oldukça verimlidir. Kurulu gücü yüksek olan santrallere elektrolizör eklenerek hidrojen üretimi yapılması önümüzdeki yıllarda ülke ekonomisine katkı sağlayacaktır. Ülkemiz enerji üssü olma yolunda çalışmalarına devam etmektedir. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarının çevreci bir dönüşüme sahip hidrojen üretiminde kullanılması ayrıca önemlidir.



Şekil 9. Antalya'da bulunan yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak yıllık üretililecek hidrojen miktarları

Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin hidrojen üretiminde değerlendirilmesi ile ekonomik kazanç sağlanabilir. Şekil 10'da Antalya ilindeki yenilenebilir enerjiden üretilen hidrojenin ekonomik değeri verilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojenin Avrupa'da satış fiyatı 12,85 \$/kg'dır. Bu nedenle; elektrik enerjisinin, hidrojen üretimine yönlendirilmesinin uygun olacağı değerlendirilmektedir.



Şekil 10. Antalya'da bulunan yenilenebilir enerji kaynaklardan üretilen hidrojenen elde edilebilecek yıllık gelir miktarı

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Antalya ilindeki yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik direkt şebekeye transfer edilirse 944.439.845 \$/yıl gelir elde edilecektir. Ancak bu elektrik enerjisi yeşil hidrojene dönüştürülürse 1.262.607.100 \$/yıl olarak gelir sağlanacaktır. Yapılan hesaplara ve analizlere dayanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen yeşil hidrojen satışından elde edilen gelir direkt elektrik satışından elde edilen gelirden %33,68 oranında daha yüksek olarak hesaplanmıştır. Maddi gelirin yanında çevresel kazançlar ve taşıma maliyetlerindeki azalma ülke ekonomisi açısından önemlidir. Araştırma kapsamındaki bulgulara ve analizlere dayanılarak Antalya ilinde hidrojen çiftliği konsepti uygulanabilir kabul edilmiştir. Antalya ilinin potansiyel yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektriğin direkt şebekeye verilmesi yerine, bu elektriği kullanarak hidrojen üretilmesi ekonomik açıdan daha verimlidir. Türkiye yıllık güneşlenme süresi ve m² başına düşen radyasyon miktarı fazla olan bir ülkedir. Bu nedenle ülkemiz güneş enerjisi bakımından zengin bir konuma sahiptir. Ayrıca sıcaklık farklarından dolayı oluşan rüzgârın enerji potansiyeli yüksektir. Türkiye turizm amaçlı insan sirkülasyonunun fazla olduğu ve tarım konusunda önemli bir yere sahip olan bir ülkedir. Bu durum biyokütle için organik ve kentsel atığın yakıt olarak kullanılmasında alternatif yakıt seçeneği oluşturur. Ülkemizin akarsu ve göl gibi kaynakları mevcut olup bu kaynakların düşü farkından yararlanılarak hidroelektrik enerjisi üretilmesi potansiyeli yüksektir. Ülkemiz; jeotermal enerjinin de kullanılabildiği önemli ülkeler arasındadır. Türkiye'nin her ilinin kendine özgü yenilenebilir enerji kaynağı potansiyeli olduğu düşünülürse ülkemizin hidrojen çağına geçişi hızlandırılabilir.

Bu çalışma kapsamında yapılan literatür taramasında önümüzdeki dönemlerde fosil yakıtların tükeneceği ve alternatif yeşil yakıt seçenekleri üzerine çalışmaların yoğunlaşacağı görülmektedir. Türkiye'nin mevcut konumu ve potansiyeli itibari ile bu tarz yeşil enerji kökenli çalışmaların yaygınlaştırılması ve hayata geçirilmesi önem arz etmektedir. Bugün kullanılan fosil yakıtların gerek fiyat artışı gerek karbondioksit salımlarına olan etkisi göz önüne alındığında, gelecek potansiyeli olan ve temiz enerji kapsamında olan, yeni ve alternatif yakıtların ileriki dönemlerde daha yaygın olarak kullanımının artması temenni edilir.

V. KAYNAKLAR

[1] Kilinc, N., (2008), Hidrojen enerjisinin ve enerji teknolojilerinin ekonomideki yeri Pazar gelişimi ve Pazar payı üzerine bir araştırma, T.C. Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü

- [2] Acar, C., Dincer, I., (2013), Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, 2000 Simcoe Street North, Oshawa, Ontario L1H 7K4, Canada
- [3] Dincer, I., Javani, N., Karayel, G., K., (2021), Türkiye için hidrojen çiftliği konsepti raporu
- [4] T. Kai, Y. Uemura, H. Takanashi, T. Tsutsui, T. Takahashi, Y. Matsumoto, K. Fujie, M. Suzuki 2007, Ademonstration project of the hydrogen station located on Yakushima Island— Operation and analysis of the station, Department of Applied Chemistry and Chemical Engineering, Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan, Department of Bioengineering, Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan Faculty of Human Sciences, Kanagawa University, 3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa 221-8686, Japan Department of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibari-ga-oka, Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan United Nations University, 5-53-70 Jingumae, Shibuya, Tokyo 150-8925, Japan
- [5] Little, M., Thomson, M., Infield, D. 2006, Electrical integration of renewable energy into stand-alone power supplies incorporating hydrogen storage, CREST (Centre for Renewable Energy Systems Technology), Department of Electronic and Electrical Engineering, Loughborough University, Loughborough, UK
- [6] M. Öztürk, A. Elbir, N. Özek, A. K. Yakut, 2011, Güneş Hidrojen Üretim Metotlarının İncelenmesi Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta/Türkiye
- [7] Akyüz E., 2010, Hibrid Yenilenebilir Enerji Sistemleri ile Elektrik ve Hidrojen Üretiminin Araştırılması, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, Türkiye
- [8] Dursun E., 2013, şebekeden bağımsız rüzgâr, güneş ve hidrojen kaynaklı hibrit enerji sisteminin analizi, marmara üniversitesi fen bilimleri enstitüsü, İstanbul
- [9] Tutar F., Eren M. V., 2011, Geleceğin Enerjisi: Hidrojen Ekonomisi ve Türkiye, Niğde Üniversitesi, İİBF, İktisat Bölümü, Şırnak Üniversitesi, İİBF, İktisat Bölümü
- [10] Veziroğlu N. T., Şahin S., 2008, 21st Century's energy: Hydrogen energy system, Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Teknikokullar, Ankara, Turkey
- [11] Veziroğlu N. T. Ve Momirlan M., 2004, The properties of hydrogen as fuel tomorrowin sustainable energy system for a cleaner planet, aInstitute of Physical Chemistry, "I.G. Murgulescu", Romanian Academy, Spl. Independentei 202, Bucharest 77208, Romania
bClean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL 33124, USA
- [12] Smit R., Weeda M., De Groot A., 2006, Hydrogen infrastructure development in The Netherlands, Energy Research Centre of The Netherlands (ECN), P.O. Box 1, 1755 ZG Petten, The Netherlands
- [13] Seymour H. E., Borges F. C., Fernandes R., (2007), Indicators of European public research in hydrogen and fuel cells—An input–output analysis, Research Group on Energy and Sustainable Development, Mechanical Engineering Department, Instituto Superior Técnico, Pav. De Mecânica 1-2º, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
- [14] Dincer I., Acar C., (2017) Innovation in hydrogen production, Clean Energy Research Laboratory, Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, 2000 Simcoe Street North, Oshawa, Ontario, L1H 7K4, Canada Faculty of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, Yıldız Mh., 34349 Besiktas, Istanbul, Turkey Faculty of

Engineering and Natural Sciences, Bahcesehir University, C, Cıragan Caddesi No: 4- 6, 34353, Besiktas,,Istanbul, Turkey

[15] Celik D., Yildiz M., (2017), Investigation of hydrogen production methods in accordance with green chemistry principles, Kocaeli University, Department of Chemical Engineering, 41380, Kocaeli, Turkey

[16] Afgan H. N., Veziroglu A., Carvalho M. G., (2007), Multi-criteria evaluation of hydrogen system options Instituto Superior Tecnico, Av. Rovisco Pais, 1094 Lisbon, Portugal International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL 33146, USA

[17] Wang M., Wang G., Sun Z., Zhang Y., Xu D., (2019), Review of renewable energy-based hydrogen production processes for sustainable energy innovation, Guodian New Energy Technology Research Institute Co.Ltd, Beijing 102209, P.R. China Beijing Key Laboratory of Power Generation System Functional Material, Beijing 102209, P.R. China School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, P.R. China

[18] Rosyid O. A., Jablonski D., Hauptmanns U., (2007), Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy, Department of Process Design and Safety, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Postfach 4120, 39016 Magdeburg, Germany

[19] Toprak K., (2006), rüzgar enerji santralleri yardımıyla hidrojen eldesinin ekonomik analizi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

[20] Aslan O., Ozcan B., (2008), Sürdürülebilir kalkınma ve Hidrojen enerjisi, Istanbul University, Istanbul-Türkiye

[21] Cengel Y. A., Cimbala J. M., Kanoglu M., (2022), Yenilenebilir Enerji Temelleri ve Uygulamaları, 1

[22] A.S. Joshi, I. Dincer, B.V. Reddy, “Exergetic assessment of solar hydrogen production methods”, International Journal of Hydrogen Energy vol 35, pp. 4901–4908, 2010.

[23] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. (2001) Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN 0 471 48997 2,2001.

[24] 30. T.C. Başbakanlık Türkiye İstatistik Kurumu, Belediye Atık İstatistikleri. 2008. TÜİK Haber Bülteni, Sayı:50, TÜİK, Ankara, Türkiye.

[25] Sezgin N., Özcan H., Varınca K., Borat M. 2003. Katı Atık Depo Gazından Elektrik Üretiminin Türkiye’de Uygulanabilirliğine İki Örnek: İstanbul ve Bursa Tesisleri, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 3: 89-96

[26] Özcan M., Öztürk S., Yıldırım M. 2011. Türkiye’nin Farklı Kaynak Tiplerine Göre Biyogaz Potansiyellerinin Belirlenmesi, IV. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, 10-12 Mayıs, Kocaeli, Türkiye.