

GAZİ

JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

Design and Analysis of Hydrogen Production Combined System from Hydrogen Sulfide with Renewable Energy Source

Kemal Gök^{a,*}, Adnan Sözen^b

Submitted: 22.04.2022 Revised: 21.06.2022 Accepted: 27.06.2022 doi:10.30855/gmbd.0705010

ABSTRACT

Keywords:
Hydrogen, hydrogen sulfide, wind energy, solar energy, Black Sea, economic analysis

^{a,*} Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems of Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0001-8030-6509
e mail: kemalgokk@gmail.com

^b Gazi University,
Technology Faculty,
Dept. of Energy Systems of Engineering
06560 - Ankara, Türkiye
Orcid: 0000-0002-8373-2674

*Corresponding author:
kemalgokk@gmail.com

The importance of clean energy resources has increased with the gradually decrease of energy resources and increasing environmental conscious. Hydrogen energy, comes at the forefront of environmentally friendly energy sources, can also be produced from hydrogen sulfide which is abundant in the bottoms of the Black Sea. The Black Sea has a great energy potential with a hydrogen capacity of 270 million tons. In this research, a study has been carried out that the energy required for the production of hydrogen from hydrogen sulfide at the bottom of the Black Sea by direct electrolysis method can be obtained from renewable energy sources on the Black Sea coast. A plant design which can produce 50 tons of hydrogen per year with approximately 640 MWh obtained from solar and wind energy on the Black Sea coasts has been considered. It was concluded that a hybrid system that can benefit from both solar and wind energy could be established in Istanbul and Zonguldak Filyos as a result of the solar and wind energy potential analyzes and economic analyzes were carried out in order to investment evaluation in these locations. Net present value method and internal rate of return method have been preferred and two different scenarios where the investment is realized by receiving 100% loan or by receiving 25% equity capital and 75% loan are discussed. Investment feasibility assessment and profitability ratios for both Istanbul and Filyos seem to be quite good, and it has been observed that the payback period of solar power plants is shorter compared to wind power plants.

Yenilenebilir Enerji Kaynağı ile Hidrojen Sülfürden Hidrojen Üretim Kombine Sistem Tasarımı ve Analizi

ÖZET

Enerji kaynaklarının giderek azalması ve artan çevre bilinci ile temiz enerji kaynaklarının önemi artmıştır. Çevre dostu enerji kaynaklarının en başında hidrojen enerjisi gelmekte olup hidrojen Karadeniz'in diplerinde bol miktarda bulunan hidrojen sülfürden de üretilmektedir. Karadeniz, 270 milyon ton hidrojen kapasitesi ile büyük bir enerji potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, doğrudan elektroliz yöntemi ile Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden hidrojen üretiminde gerekli olan enerjinin Karadeniz kıyılarındaki yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanabileceği üzerine bir çalışma yapılmıştır. Karadeniz kıyılarındaki güneş ve rüzgar enerjisi kullanılarak yaklaşık 640 MWh'lik bir enerji ile yıllık 50 tonluk hidrojen üretebilecek bir tesis tasarlanmıştır. Yapılan güneş ve rüzgar enerjisi potansiyel analizleri neticesinde hem güneş enerjisinden hem de rüzgar enerjisinden yararlanılabilecek hibrit bir sistemin İstanbul ve Zonguldak Filyos'da kurulabileceği sonucuna varılmış ve bu lokasyonlarda yatırım yapılabilirliği görebilmek adına ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Net bugünkü değer yöntemi ile iç karlılık oranı yöntemi tercih edilmiş olup yatırımın %100 kredi çekilerek ya da %25 öz sermaye, %75 kredi çekilerek gerçekleştirildiği iki farklı senaryo ele alınmıştır. Hem İstanbul hem de Filyos için yatırım yapılabilirlik ve karlılık oranları gayet iyi gözükmemekte olup rüzgar enerjisi santrallerine göre güneş enerjisi santrallerinin geri dönüş sürelerinin daha kısa olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler:
hidrojen, hidrojen sülfür, rüzgar ve güneş enerjisi, Karadeniz, ekonomik analiz

1. Giriş (Introduction)

Nüfus artışı, küreselleşme, sanayileşme ve teknolojinin gelişmesi gibi nedenlerle sınırlı miktarlarda bulunan enerji kaynakları tükenmekte ve enerji maliyetleri sürekli bir artış göstermektedir. Enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, enerji maliyetlerinin artması ve çevre bilinci gibi nedenlerle birçok ülke yenilenebilir ve sürdürülebilir temiz enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu enerji kaynaklarından da teknolojisi hızla gelişen, çevre dostu ve doğada bol miktarda bulunan hidrojen enerjisi ön plana çıkmıştır. Hidrojen hem fosil yakıtlardan; hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebildiği gibi hidrojen sülfür, hidrokarbon gibi maddelerden de elde edilir. Hidrojen üretiminde kullanılabilecek en önemli kaynaklardan biri de Karadeniz'in diplerinde bulunan hidrojen sülfürdür. Karadeniz'de bulunan hidrojen sülfürden hidrojen üretilebileceği ve bu proste yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabileceği ön görülmüştür.

Sherif ve ark. hidrojen üretimi, depolanması, dağıtımı ve kullanılması ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Rüzgâr enerjisinden ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrojen üretiminin mümkün olup olmayacağını araştırmış ve bu mümkün olursa hidrojenin çevre dostu bir yakıt olacağını öngörmüştür [1]. Levene ve ark. yapmış oldukları çalışmada hidrojen üretiminde kullanılabilecek yenilenebilir enerji kaynaklarını, elektroliz yöntemi ile hidrojen üretiminin maliyetini incelemiştir. Sonuç olarak da rüzgâr ve güneş enerjisinden bol miktarda hidrojen üretilebileceğini belirtmiştir [2].

Baykara ve ark. yaptıkları çalışmada Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürü potansiyel bir hidrojen kaynağı olarak görmüşlerdir. H_2S 'den hidrojen üretimi için öne çıkan teknikleri inceleyip Karadeniz'deki H_2S 'den hidrojen üretimi ile ilgili bir mühendislik değerlendirmesi yapmışlar ve H_2S 'nin önemli bir kaynağı olduğu vurgulamışlardır. [3]. Midilli ve ark. Karadeniz'in dip sularında, H_2S konsantrasyonu ve su tabakası derinliğine bağlı olarak hidrojen enerji potansiyelini tahmin etmek için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmaya göre Karadeniz dip sularındaki tahmini H_2S miktarı yaklaşık olarak 4,587 milyar tondur. H_2S 'nin hidrojene %100 dönüştüğü varsayılarak Karadeniz dip sularındaki 4,587 milyar ton H_2S 'den yaklaşık 270 milyon ton hidrojen enerjisi üretilebileceği tahmin edilmiştir [4].

Petrov ve ark. Karadeniz dip sularında bulunan H_2S 'den H_2 ve S üretimi proseslerini araştırmışlardır. Deniz suyunun ekstraksiyonu, H_2S adsorpsiyonu, hidrojen ve polisülfürlerin elektrokimyasal üretimi; deniz suyunun tuzdan arındırılmasıyla tatlı su üretimi ve ortaya çıkan tuzlu çözeltiden klorealkalin elektrolizi yoluyla daha fazla hidrojen üretimi gibi prosesin aşamalarının ekonomik ve çevresel yönleri ile ilgili incelemelerde ve değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Karadeniz dip sularında bulunan H_2S 'den H_2 ve S üretiminde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanabilen ve ekolojik dengeli bozmayan teknolojilerin geliştirilebileceğini ileriye sürmüşlerdir [5]. Şanlı ve Mat yaptıkları çalışmada bir yakıt hücresinde yakıt olarak H_2S içeren Karadeniz suyunun doğrudan kullanılmasını önermişlerdir. Karadeniz suyunun elektrolizi ile hidrojen üretiminde proses ve tesis tasarımı, deniz suyunun derinliklerden pompalanması, işlenmiş deniz suyunun deşarj hattı ile tekrar denize salınması ve üretilen hidrojenin taşınması vb. konuların maliyetli olacağını bunun yerine yakıt pili sistemini kullanarak hem elektrik üretilebileceğini hem de maliyetlerin daha az olacağını savunmuşlardır [6].

Türkaslan çalışmasında, laboratuvar ortamında sentetik olarak Karadeniz suyunun kompozisyonunu oluşturmuştur. Dolaylı elektroliz yöntemini kullandığı deneysel çalışmasında kükürt eldesi ve hidrojen üretimi için optimum sıcaklıklar, süre, çözelti miktarları vb. parametreleri belirlemeye çalışmıştır. Yaptığı hesaplamalarda elde edilen hidrojen enerjisinin yaklaşık %35'i elektroliz için harcanırken, geri kalan enerji yararlanılabilir enerji olarak kullanılabilecektir. Ayrıca, CHEMCAD simülasyon programı ile Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden 1 MW teorik enerji elde edilebilecek bir hidrojen üretim tesisi tasarımı yapmıştır [7]. Stavros Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden hidrojen eldesinin fizibilite çalışmasını ve ekonomik analizini yapmıştır. Karadeniz'deki deniz suyunun çıkarılması, deniz suyundan H_2S 'in elde edilmesi, H_2S 'den hidrojen ile kükürt üretimi ve bu ürünlerin depolanması aşamalarını Aspen Plus simülasyon programı ile tasarlamıştır. Karadeniz için H_2S 'den hidrojen üretiminin hem çevresel hem ekonomik olarak öneminden bahsetmiştir. Yaptığı ekonomik analizler sonucu tasarlamış olduğu tesisin geri ödeme süresini 5,5 yıl olarak hesaplamıştır [8]

Karapekmez ve Dinçer jeotermal enerji santrallerin çalışması esnasında ortaya çıkan H₂S gazından H₂ üretilebileceğine dair bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada AMIS teknolojisi ile donatılan bir jeotermal enerji santralinde, bir PEM elektrolizörü kullanarak H₂S gazından H₂ üretimi için yeni bir model oluşturmuşlardır [9]. Karapekmez ve Dinçer başka bir çalışmasında jeotermal, güneş ve rüzgar enerji sistemlerinin olduğu kombine bir enerji santralinde çevre için zararlı olan H₂S gazından H₂ üretimi ile ilgili bir sistem tasarlamışlardır. Yenilebilir enerji kaynaklarının potansiyellerini inceleyip termodinamik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan sistemde saniyede 0,7388 kg hidrojen sülfürden 0,0433 kg hidrojen üretecekleri sonucuna varmışlardır [10].

Öztürk ve ark. Karadeniz’de bulunan hidrojen sülfür ve doğalgazın birlikte olduğu bir sistem üzerine çalışma yapmışlardır ve bunu Aspen Plus programında modellemişlerdir. Tasarladıkları sistemde, enerji ihtiyacı açık denizde kurulan güneş ve rüzgâr enerji santrallerinden sağlanan bir PEM elektrolizör Karadeniz’de bulunan olan H₂S gazından H₂ ve S üretiminde kullanılmaktadır. Sistemde daha sonra üretilen hidrojen ve Karadeniz’de bulunan doğalgaz ile karıştırılmaktadır. Sistemin enerji ve ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir ve yanmanın verimliliğinin arttığı gözlemlenmiştir [11].

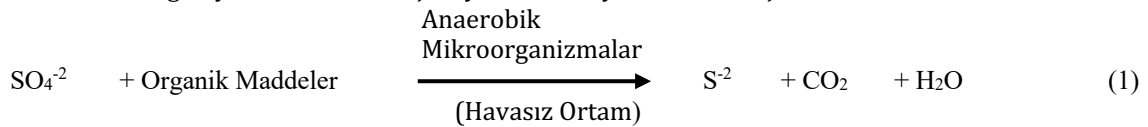
Şeker ve Aydın Karadeniz’in dip sularındaki hidrojen enerjisi potansiyeline istinaden Karadeniz Bölgesi’nde hidrojen sülfürden hidrojen üretim tesisi kurmak için en uygun yerin neresi olabileceği üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yer seçiminde dört ana ve on iki alt kriter ile Samsun, Sinop, Giresun ve Zonguldak olmak üzere dört alternatif yer belirlemişlerdir. Çok kriterli karar verme yöntemlerinden TOPSIS yöntemini bu kriterlere ve alternatif lokasyonlara uygulayarak tesis için en uygun yerin Sinop olabileceğine karar vermişlerdir [12].

Literatür taraması sonucunda, hidrojen enerjisinin gelecekte önemli bir yere sahip olacağı ve ülkelerin hidrojen enerjisi teknolojileri üzerinde çalışmalar yaptığı görülmüştür. Hidrojen üretimi için farklı yöntemler mevcut olup hidrojen üretiminde güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının da kullanılabilirliği vurgulanmıştır. Hidrojen üretimi için Karadeniz’de bol miktarda bulunan H₂S’den yararlanılması ve Karadeniz’in kıyılarına ya da denizin altına bir hidrojen üretim tesisi kurulabileceğinden bahsedilmiştir.

Karadeniz’in dip sularında bulunan hidrojen sülfürden hidrojen üretiminin enerji olarak ne kadar önemli olduğu ve hidrojen sülfürden hidrojen üretiminde rüzgâr ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılabilirliği bu çalışmada ön görülmüştür. Bu bağlamda, Aspen Plus simülasyon programında tasarlanmış olan bir hidrojen sülfürden hidrojen üretim tesisinin kurulacağı lokasyonda rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyelleri incelenmiş ve tesis için gerekli enerjinin bu kaynaklardan sağlanması amaçlanmıştır. Hem güneş enerjisi hem de rüzgâr enerjisinden yararlanmak için hibrit bir enerji santralinin kurulmasının daha uygun olacağı ön görülerek kurulacak santrallerin üretebileceği enerji miktarları hesaplanmış ve ekonomik analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. Karadeniz’in Diplerindeki Hidrojen Sülfürden Hidrojen Üretimi (Hydrogen Production from Hydrogen Sulfide at the Bottom of the Black Sea)

Hidrojen doğal bir yakıt olmayıp, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak farklı hammaddelerden üretilebilen, güvenli ve kolayca taşınabilen, ulaşımdan ısınmaya, ısınmadan sanayiye birçok alanda yararlanılabileceğimiz çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Hidrojen; kömür, doğalgaz gibi hidrokarbonlar ile su, biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra hidrojen sülfürden de üretilebilir.



Normal şartlar altında yanıcı ve renksiz bir gaz olan hidrojen sülfür aynı zamanda uçucu ve çok zehirli bir gazdır. Hidrojen sülfür, genellikle oksijensiz ortamda organik maddelerin bakteriler tarafından parçalanmasıyla oluşmaktadır. Oksijensiz ortamlarda bol olarak bulunan sülfat (SO₄²⁻), sülfat indirgeyici bakterilerin yardımı ile sülfüre dönüşür. Sülfür iyonu da hidrojen iyonu ile reaksiyona girerek hidrojen sülfür gazını meydana getirir. Volkanik gazlar, doğal gaz ve petrol rezervleri, okyanus

tabanlarındaki termal bacalar ve jeotermal bölgeler, bataklıklar ve Karadeniz'in dip suları hidrojen sülfürün doğal olarak üretildiği yerlerdir. Hidrojen sülfür, insanlar ve hayvanlar için son derece zehirli bir gazdır. Çürük yumurta kokusuna sahip bu gaza uzun süre maruz kalındığında, kısmi felç, baygınlık ve ölüme kadar sonuçlanabilen durumlar ortaya çıkabilmektedir [13].

Toksik ve korozyif özellik gösteren hidrojen sülfür gazının çevre açısından tehlikeli olduğu aşikârdır ve bunun yok edilmesi gerekmektedir. H₂S yüksek ısıl değere sahip olmasına rağmen doğrudan yakıt olarak kullanıldığında çevre için tehlikeli olan sülfür dioksit gazını oluşturmaktadır [14]. H₂S gazının hava ile kısmi oksidasyon neticesinde saf kükürt ve suyun ortaya çıktığı Claus Prosesi endüstride kullanılan en yaygın ve gelişmiş yöntemdir [15].

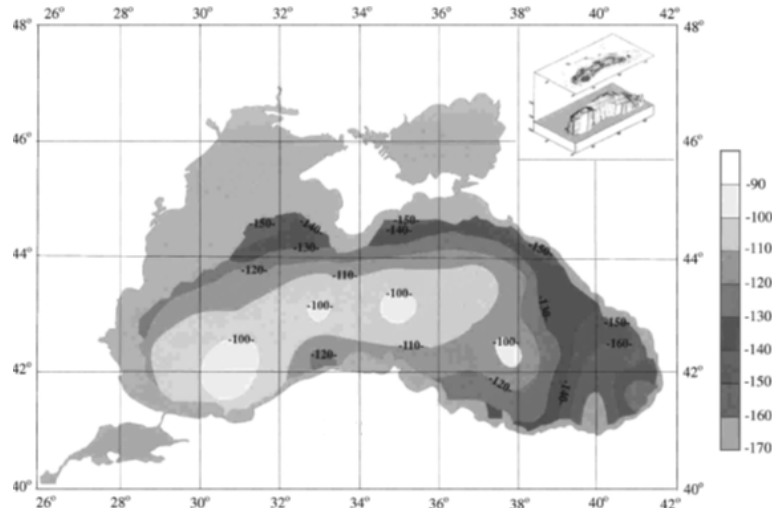
Gaz tesislerinden, rafinerilerden ve metalürjik proseslerden sürekli yan ürün olarak H₂S ortaya çıkmaktadır. H₂S gazından hidrojen üretilebilmesi ve H₂S'in bertaraf edilmesi gerekliliğinden dolayı hidrojen sülfüre ilgi artmış olup H₂S, H₂ ve S kaynağı olarak düşünölmeye başlanmıştır [16]. Hidrojen sülfür gazından hidrojen üretimi, gelişmekte olan çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Termal, termokimyasal, fotokimyasal, plazma, elektrokimyasal, doğrudan ve dolaylı elektroliz yöntemleri gibi birçok yöntem ile hidrojen sülfürden hidrojen üretimi gerçekleştirilebilmektedir [7].

Hem suyun elektrolizi hem de hidrojen sülfürün elektrolizi endotermik yani dışarıdan enerji gereken reaksiyonlardır. Normal şartlar altında suyun elektrolizi için gereken enerji 237,1 kJ/mol iken, H₂S'nin elektrolizi için gereken enerji 73,28 kJ/mol'dür. Suyun elektrolizinde kullanılan enerji miktarı, hidrojen sülfürün elektrolizinde kullanılan enerji miktarından yaklaşık 3,235 kat daha fazladır [17].

H₂S'den elde edilen hidrojen enerjisi, H₂O'dan elde edilen hidrojen enerjisine göre daha kârlı olmakla birlikte H₂S'den H₂ üretiminde yan ürün olarak endüstride kullanımı yaygın olan S açığa çıkmaktadır. H₂S'den hidrojen üretimi yöntemlerinde yüksek sıcaklıklarda çalışmaktan kaçınmak için elektroliz yöntemi tercih edilmiş olup ekseriyetle bu yöntemle yapılan çalışmalar irdelenmiştir.

2.1. Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfür (Hydrogen sulfide at the bottom of the Black Sea)

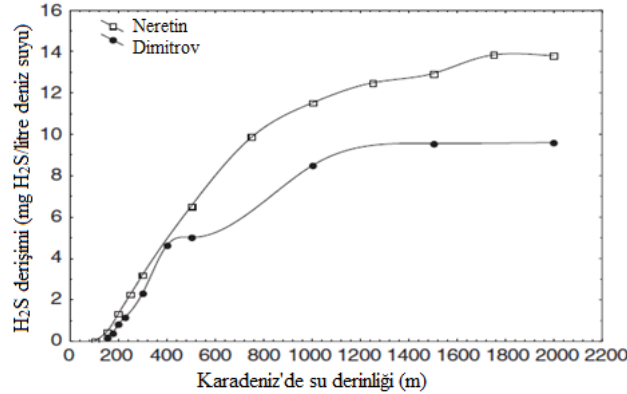
%90'ı anaerobik olan Karadeniz'de de bol miktarda H₂S bulunmaktadır. Karadeniz'in dip sularında aşırı kirlenme ve tuz yoğunluğundan dolayı oksijen miktarı azalmakta ve deniz canlıları ölmektedir. Bunun sonucunda meydana gelen birikimler ile de Karadeniz'in dip sularındaki H₂S yoğunluğunun arttığı söylenebilir [18].



Şekil 1. Karadeniz'deki hidrojen sülfür dağılımı (Hydrogen sulfide distribution in the Black Sea) [19]

Şekil 1'de Karadeniz'deki hidrojen sülfür dağılımı verilmiştir. Karadeniz'in orta bölgelerinde yaklaşık 100 m'de H₂S'ye ulaşılabilirken kıyı bölgelerinde 125-150 m'de H₂S tabakasına ulaşılabilir [4]. Şekil 2'de Karadeniz'in derinliklerindeki hidrojen sülfürün derinlik ile değişimi verilmiştir. Neretin ve Dimitrov yapmış oldukları çalışmalarda Karadeniz'in 100-2000 m derinliklerindeki hidrojen sülfür konsantrasyonunu belirlemişlerdir. Neretin'e göre 2000 m maksimum H₂S derişimi 13,8 mg H₂S /L iken, Dimitrov'a göre 9,6 mg H₂S /L 'dir [20]. İki çalışmadan Karadeniz'in derinliklerinde enerji kaynağı

olarak yeterli miktarda H_2S olduğu sonucu çıkarılabilir. Bunun sonucunda H_2S 'in bir hidrojen kaynağı olduğu kanısına varılmıştır.

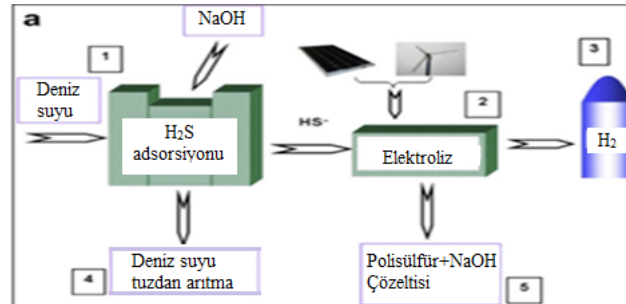


Şekil 2. Karadeniz derinliklerindeki hidrojen sülfürün derinliğe göre değişimi (Variation of hydrogen sulfide in the Black Sea with depth) [20]

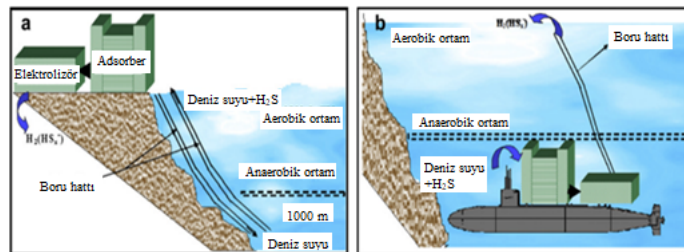
Karadeniz dip sularındaki 4,587 milyar ton H_2S 'den elde edilebilecek hidrojen yaklaşık 270 milyon tondur. Bu değerler H_2S 'nin %100 verimli bir şekilde parçalanması ile hidrojen enerjisine dönüştüğü varsayılarak hesaplanmıştır. 270 milyon ton hidrojen enerjisinden yaklaşık 38,3 TJ ısı enerjisi; yaklaşık 8,97 milyon GWh elektrik enerjisi üretilebilir. Bu ısı enerjisi de 808 milyon ton benzin, 766 milyon ton doğalgaz, 841 milyon ton fueloil ve 851 milyon ton petrole yaklaşık olarak eşdeğerdir [18].

2.2. Karadeniz'in diplerindeki hidrojen sülfürden hidrojen üretim tesisi (Hydrogen production facility from hydrogen sulfide in the black sea)

Karadeniz'in diplerindeki H_2S 'den hidrojen üretim yöntemleri ile ilgili literatürde pek fazla çalışma mevcut değildir. Literatürde Karadeniz'in diplerindeki H_2S 'den hidrojen üretimi için H_2S 'nin deniz suyundan ayrıştırılması ve H_2S 'nin maksimum verimle hidrojen ve kükürde dönüşmesi en önemli iki adım olarak belirlenmiştir. Diğer önemli husus da kurulacak olan tesisin denizin kıyısında mı yoksa denizin altında mı olacaktır.



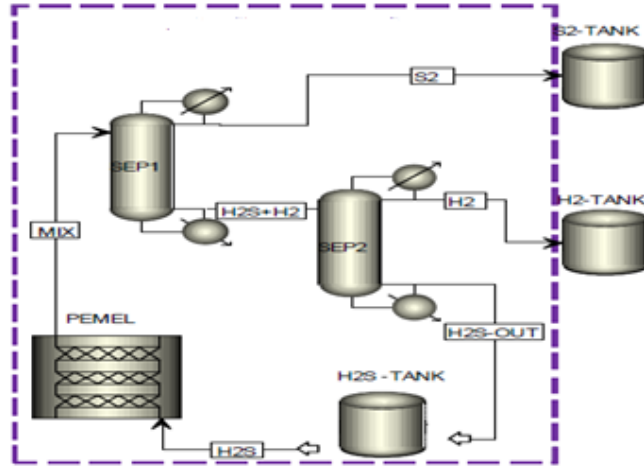
Şekil 3. Tasarlanan sistemin proses akış şeması (Process flowsheet of the designed system) [5]



Şekil 4. Tasarlanan sistemin muhtemel kurulumları (Possibilities for installation of the designed system) [5]

Daha önceki çalışmalarda tasarlanan sistemler incelendiğinde, mevcut teknolojilere uygun olarak hidrojen ve kükürdün üretimi ile tatlı suyun üretimi olarak iki ana proses belirlenmiştir. Birincisi deniz suyundan HS^- ayrıştırılması ardından hidrojen ve sülfürün elektrokimyasal üretimidir. İkincisi de deniz suyunun arıtılmasıdır (Şekil 3). Adsorpsiyon ve elektroliz modülleri tasarlanan sistemin ana bileşeni oluşturmaktadır. Elektroliz için gereken elektrik güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji

kaynaklarından elde edilebilir. Karadeniz'de, ana ünite kıyıya (Şekil 4a) veya deniz tabanına (Şekil 4.6b) kurulabilir [5].



Şekil 5. Aspen Plus programında tasarlanan sistemin proses akış şeması (The process flowsheet of the system designed in the Aspen Plus program) [11]

Midilli ve ark. bir PEM elektrolizörde H₂S'yi, H₂ ve S'ye ayırmışlardır. Şekil 5'te H₂S'nin elektroliz proses şeması verilmiştir. Aspen Plus programında modellenen elektroliz prosesinde, hidrojen sülfür 800 kPa basınçta 100 kg/h olarak PEM elektrolizörüne girmektedir. Öncelikle Sülfür, birinci separatörde (SEP1) ayırmakta ve S₂ tankında depolanmaktadır. Daha sonra hidrojen sülfür ile hidrojen karışımı ikinci separatöre (SEP2) girmekte ve oradan üretilen hidrojen, H₂ tankında; hidrojen sülfür de H₂S tankında depolanmaktadır [11].

Yapılan bu çalışmada, hidrojen sülfürden hidrojen üretiminde yani H₂S'nin elektrolizinde kullanılacak olan enerji kaynaklarının potansiyeli üzerine bir çalışma yapılacağı göz önüne alınırsa, daha çok H₂S'nin elektrolizi ile ilgilenilmiştir. Daha önce yapılan çalışmaların incelenmesi neticesinde, Karadeniz'in diplerinde bulunan H₂S'den hidrojen üretimi için düşünülen tesisin özelliklerine karar verilmiştir. Bu tesis tasarlanırken elektroliz aşamasında bazı kabuller yapılmıştır:

- * Tüm gazlar ideal kabul edilmiş olup ortam sıcaklığı 25 °C, basınç 101,325 kPa'dır.
- *Sistem ve çevre arasındaki ısı alışverişi ihmal edilebilir seviyededir.
- *Ekserjiler ile kinetik ve potansiyel enerjilerin değişimleri ihmal edilebilir seviyededir.
- *Proses kararlı ve sürekli akış olarak kabul edilmiştir.
- *Tüm bileşenlerin sabit sıcaklık ve basınçta çalıştıkları varsayılmıştır.
- *Elektrik kayıpsız olarak iletilebilmektedir.
- * H₂S, H₂ ve S'nin elektroliz sırasında basınç ve sıcaklıkları (150 °C, 0,8 MPa) sabittir
- *Hidrojen sülfürün kütle debisi 100 kg/h olarak kabul edilmiştir [11].

Bu kabuller neticesinde kullanılan simülasyon programında, 100 kg/h hidrojen sülfürün elektroliz sonucunda 5,87 kg/h hidrojen üretebilmek için gerekli enerji miktarı da 0,075 MW olmaktadır [11]. Kurulacak olan tesis, günlük 140,8 kg; yıllık 50 tonluk hidrojen üretebilecek kapasitede düşünülmüştür. Bakım, arıza gibi durumlar düşünülerekten bir yıl 355 gün olarak alınmıştır. Elektroliz prosesi bu şekilde tasarlandığında yaklaşık olarak 638,85 MWh'lik bir enerjiye ihtiyaç vardır. Bu sistemde yıllık 852 ton hidrojen sülfür 50 ton hidrojene dönüşecektir.

3. Yenilebilir Enerji Kaynakları Kullanılarak Hidrojen Sülfürden Hidrojen Üretimi (Hydrogen Production from Hydrogen Sulfide Using Renewable Energy Sources)

Tasarlanan tesiste yıllık enerji ihtiyacı 638,85 MWh hesaplanmıştır. Çalışmanın amacı bu enerjiyi Karadeniz'de bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktır. Karadeniz'deki güneş ve rüzgar enerji potansiyelleri analiz edilerek H₂S'den H₂ üretim tesisinin nereye kurulması gerektiğine yön verilmiştir.

Karadeniz'in orta bölgelerinde yaklaşık 100 m'de H₂S'ye ulaşılabilirken kıyı bölgelerinde 125-150 m'de H₂S tabakasına ulaşılabilir. Ancak doğu ve orta Karadeniz kıyılarına göre Marmara ve batı

Karadeniz kıyılarında daha sığ yüzeylerde H_2S 'ye ulaşmak daha mümkün gözükmetedir [19]. Üretim tesisinin yeri belirlenirken farklı parametrelere dikkat edilmesi gerekmektedir. İstenilen her yere istediğimiz şekilde bir tesis kurulması mümkün değildir. Bunun için aşağıda belirtilen hususlar göz önüne alınmıştır:

*Kıyıda kurulan enerji santrallerinin, açık denizde kurulan enerji santrallerine göre kurulum ve işletme maliyetlerinin daha düşük olması ve kullanımının daha yaygın olması sebebiyle tasarlanacak tesisin karada olması tercih edilmiştir.

*Karadeniz'den H_2S çıkarılıp bundan hidrojen üretileceği göz önüne alındığında tesisin Karadeniz'in kıyı kesimlerine yakın olması gerektiği düşünülmüştür.

*Tesisin kurulacağı yer belirlenirken yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebilecek enerji potansiyeli göze alınmıştır. Sadece Karadeniz'in kıyılarındaki güneş ve rüzgar enerji potansiyelleri ve yıllık ne kadar enerji sağlayabileceğimiz incelenmiştir.

*Güneş ve rüzgar enerji potansiyelleri belirlenirken T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu GEPA ve REPA atlaslarından yararlanılmıştır. Analizi yapılacak bölgeler bu atlaslardaki en yüksek potansiyele sahip alanlardan seçilmiştir.

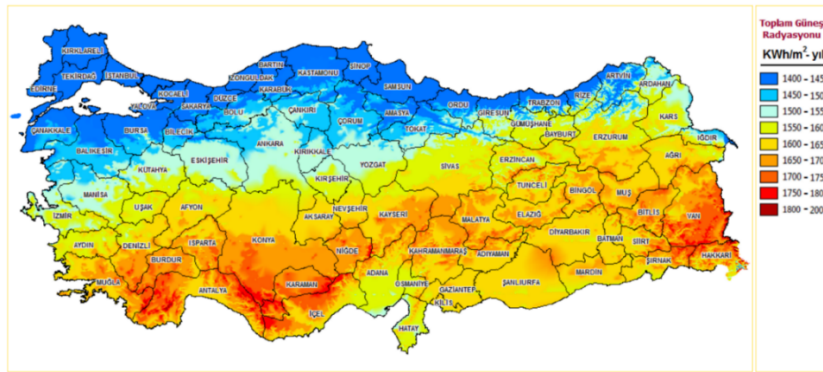
*İlgilenilen bölgenin arazi yapısı ve bitki örtüsü, arazi mülkiyeti, ulaşım imkanları, arazi içerisindeki fay hatları gibi parametreler dikkate alınmıştır.

*Trafo merkezleri ve enerji nakil hatlarına yakınlıkları dikkate alınmıştır.

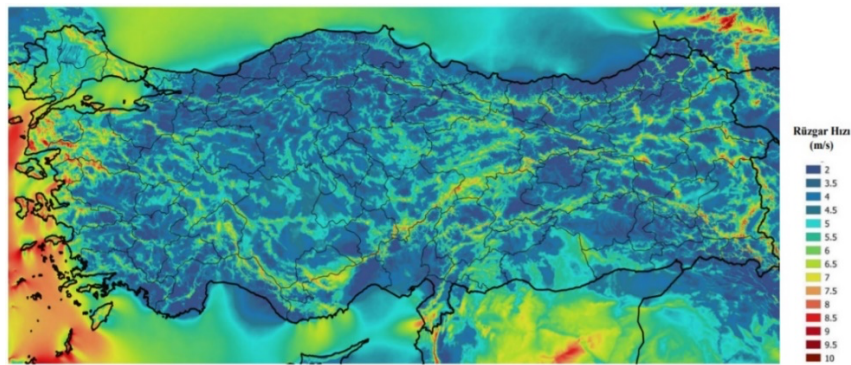
*Arazinin yüksekliği, bakı ve eğimi, sulak alanlar, arazideki orman varlığı gibi durumlar incelenmiştir.

*Arkeolojik ve çevresel kısıtlamaların olduğu alanlar da göz önüne alınmıştır.

Ayrıca yer seçimi yapılırken yatırım ve işletme maliyetleri gibi ekonomik etkenler; depolama, dağıtım ve ulaşım gibi teknik etkenler; insan sağlığı ve çevre bilinci gibi çevresel etkenler ile istihdam ve teşvikler gibi sosyal etkenlerin önemi de göz ardı edilmemiştir.



Harita 1. Türkiye güneş enerjisi potansiyeli atlası (GEPA) (Turkey solar energy map) [21]



Harita 2. Türkiye rüzgâr enerjisi potansiyeli atlası (REPA) (Turkey wind energy map) [22]

Karadeniz kıyılarında güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenirken GEPA (Harita 1) ve REPA (Harita 2) dikkate alınmış ve her ilden bir nokta belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır. Belirlenen kapasite de hidrojen üretimi için gerekli olan 638,85 MWh'lik enerji elde etmek için kapasite faktörleri göz önünde bulundurularak güneş enerjisi kurulu gücü 1 MW, rüzgâr enerjisi kurulu gücü 0,8 MW olan santrallerin kurulması düşünülmüştür.

Dikkate alınan hususlar neticesinde Karadeniz kıyılarındaki güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyelleri

hesaplanmıştır. Doğu Karadeniz bölümünün gerek hem rüzgâr hem de güneş enerji potansiyelinin düşük olması gerek santral kurulamayacak alanların yoğunluğundan dolayı buradaki iller değerlendirilmeye alınmamıştır. Ayrıca Türkiye’de yaşanan son gelişmelerden dolayı Karadeniz’e kıyısı olan Zonguldak Filyos’un da enerji potansiyelinin incelenmesi gereği duyulmuştur. Gerek Karadeniz’de doğalgaz bulunması gerekse Filyos’ta ilk mega endüstri bölgesinin ve Türkiye’de ilk üçe girecek bir limanın varlığı lokasyon olarak buranın da göz önüne alınması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Son zamanlarda yapılan çalışmalarda doğalgazın içerisine hidrojen ilavesi ile doğalgazın yanma verimliliğinin arttığı, CO2 emisyonunun azaldığı gözlemlenmiştir [11]. Bu sebeple ki Karadeniz’den çıkarılan doğalgaz ve Karadeniz’in diplerindeki H₂S’den elde edilen hidrojenin bir tesiste üretilip karıştırılabileceği göz önüne alınmıştır. Bunun için de en uygun yer olarak bir mega endüstri bölgesi olacak olan Filyos düşünülmüştür.

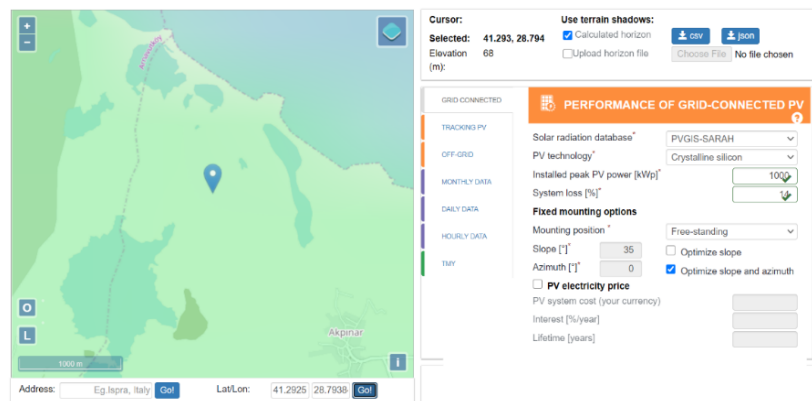
3.1. Karadeniz kıyılarındaki güneş enerjisi potansiyeli (Solar energy potential on the Black Sea coasts)

Karadeniz kıyılarında güneş enerjisi potansiyeli belirlenirken GEPA dikkate alınmış ve her ilden bir nokta belirlenerek hesaplamalar yapılmıştır. Analizini yapılan nokta seçilirken güneş enerjisi potansiyeli yakın olan yerlerde, daha doğru karşılaştırma yapabilmek adına rüzgâr enerji potansiyeli atlasına göre en yüksek rüzgar potansiyeli olan yerlerin seçilmesine dikkat edilmiştir. Aynı zamanda GES ve RES kurulamaz alanlar da göz önünde bulundurulmuştur. GEPA’dan ve PVGIS simülasyon programından her 11 ilin ve Filyos’un en yüksek güneş radyasyon değerleri seçilerek üretilebilecek enerji miktarı bulunmuştur. Yıllık enerji üretimi ile ilgili analiz çalışmaları yapılırken hassasiyetin mümkün olduğunca artırılabilmesi için yıllara göre yatay düzleme gelen toplam güneş radyasyonunun aylık ortalamalarına dayandırılmasıyla hazırlanan ücretsiz PVGIS yazılım programı kullanılmıştır.

PVGIS, güneş radyasyon haritalarına göre PV sistem ve tesislerinin güneş enerjisi üretim değerlerini hesaplayan ücretsiz bir simülasyon yazılım programıdır. Google veri tabanını kullanan PVGIS, kullanıcı tarafından harita üzerinde belirlenen enlem ve boylamlarda, PV modülün çeşidi ve toplam kapasiteleri, sistem performans oranı, modül montaj özellikleri ve açıları, izleme özellikleri gibi parametrelere göre bir PV sisteminin aylık ve yıllık güneş ışınım değerlerini (kWh/m²), potansiyel elektrik üretimini (kWh) hesaplar [23]. PVGIS programında yapılan enerji analizi kapsamında:

- *Güneş radyasyon veri tabanı olarak PVGIS-SARAH veri tabanı kullanılmıştır.
- *Tasarlanacak sistemin kurulu gücü 1000 MW olarak seçilmiştir.
- *GEPA haritalarına göre belirlenen koordinatları program üzerinden seçilmiştir.
- *PV güneş paneli olarak kristal silikon PV modülü seçilmiştir.
- *Sistemin yük kayıpları standard olarak %14 kabul edilmiştir.
- *Panellerinin montaj eğimi 35° ve yatay azimut açısı 0° program tarafından optimum olarak seçilmiştir.

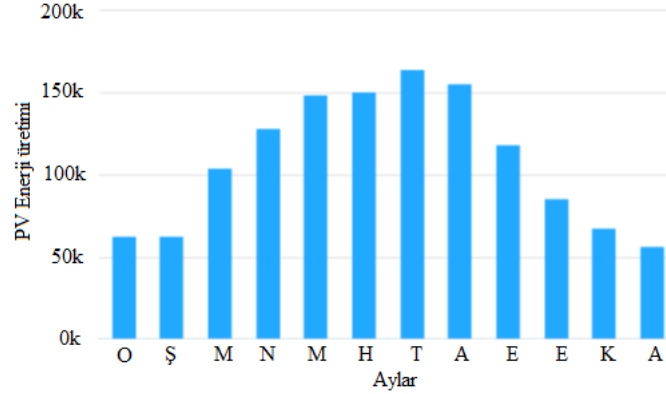
Karadeniz kıyılarında güneş enerjisinden yıllık enerji üretimi birbirine yakın olmakla Samsun, Zonguldak ve İstanbul illeri ile Filyos’un potansiyelin biraz daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 6. İstanbul ilinde seçilen noktanın PVGIS ile analizi (Analysis of the selected point with PVGIS in Istanbul)

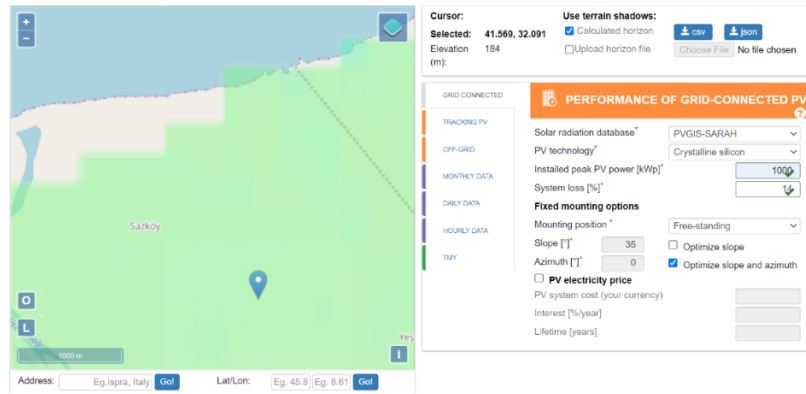
İstanbul Karadeniz’e kıyısı olan en gelişmiş şehirdir. İstanbul’da da kıyı kesimlerdeki güneş radyasyonu birbirine yakın olup seçilen nokta PVGIS programına girilmiş ve belirlediğimiz enerji analizi kapsamına

göre PV tasarımı yapılmıştır (Şekil 6). Tasarlanan sistemin aylık enerji üretim miktarları Şekil 7'de verilmiştir. İstanbul'da PV sisteminin yıllık enerji üretimi 1307,6 MWh olarak hesaplanmıştır.

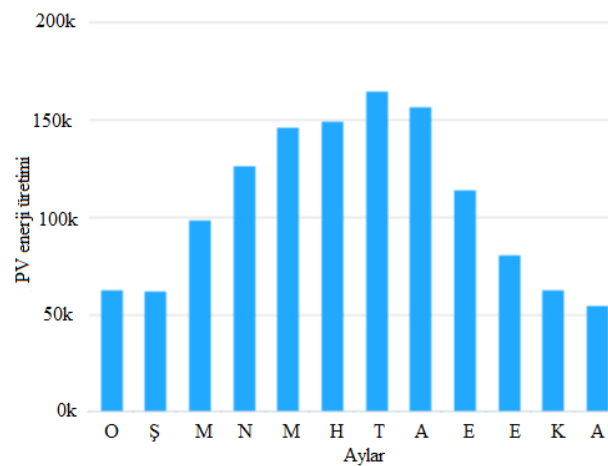


Şekil 7. İstanbul ilinde tasarlanan PV sisteminin aylık enerji üretimi (Monthly energy production of the PV system designed for Istanbul)

Filyos'un güneş radyasyonu hemen hemen her yerde aynı olup seçilen nokta PVGIS programı ile belirlediğimiz enerji analizi kapsamına göre PV tasarımı yapılmıştır (Şekil 8). Tasarlanan sistemin aylık enerji üretim miktarları Şekil 9'da verilmiştir. Filyos'ta tasarlanacak olan PV sisteminin yıllık 1336,7 MWh'lık enerji üretebileceği hesaplanmıştır.



Şekil 8. Filyos'ta seçilen noktanın PVGIS ile analizi (Analysis of the selected point with PVGIS in Filyos)



Şekil 9. Filyos'ta tasarlanan PV sisteminin aylık enerji üretimi (Monthly energy production of the PV system designed for Filyos)

2.2. Karadeniz kıyılarındaki rüzgâr enerjisi potansiyeli (Wind energy potential on the Black Sea coasts)

Karadeniz kıyılarında rüzgâr enerjisi potansiyeli belirlenirken; orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar kaynak bilgilerinin verildiği rüzgar enerji potansiyel atlası dikkate alınmış ve bu haritalara göre belirlenen illerden bir nokta seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Analizini yapılan nokta seçilirken güneş enerjisi potansiyeli, GES ve RES

kurulamaz alanlar da göz önünde bulundurulmuştur. Doğu Karadeniz bölümünün hem rüzgâr hem de güneş enerji potansiyeli düşük olduğu için buradaki iller değerlendirilmeye alınmamıştır.

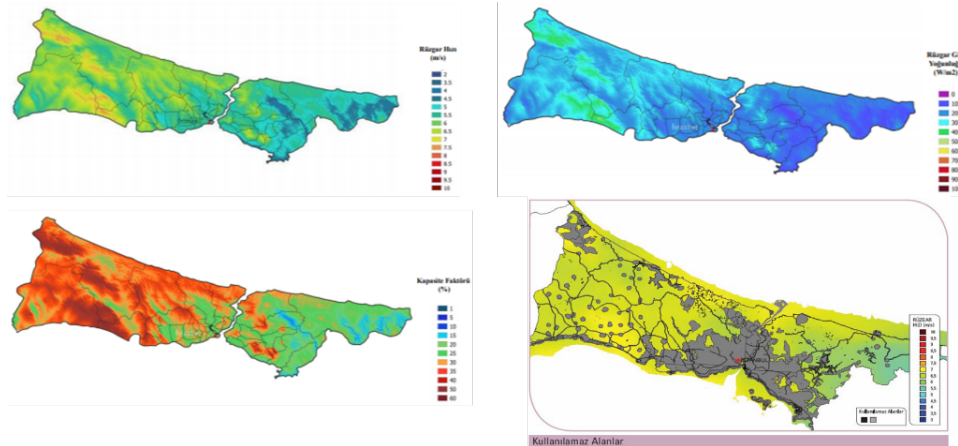
Bir rüzgâr enerjisi santralının yıllık enerji üretiminin ekonomik açıdan değerlendirilmesi çok önemlidir. Ekonomik bir RES yatırımı için, rüzgâr hızı en az 6-7 m/s, güç yoğunluğu en 350-400 W/m², kapasite faktörü ise en az %30-35 olmalıdır [24]. Bu çalışmada, illerin rüzgâr enerji potansiyel atlaslarında yer alan rüzgâr hızı, güç yoğunluğu ve kapasite faktörüne göre alanlar belirlenmiştir. Belirlenen alanların noktasal olarak rüzgâr hızları ve güç yoğunluğu Global Atlas Wind üzerinden belirlenerek uygun bir türbin seçilmiş ve teorik hesaplamalar yapılmıştır.

GAW, yüksek rüzgâr enerji potansiyeline sahip alanları tespit etmek ve ön hesaplamalar yapmak için Danimarka Teknik Üniversitesi ve Dünya Bankası tarafından tasarlanmış web tabanlı, ücretsiz bir yazılımdır. Rüzgâr enerjisi potansiyeli olan bölgeler hakkında bir ön değerlendirme imkânı sunan bu program, büyük/orta ölçekli rüzgâr verilerinin küçük ölçekli verilere indirgeyerek bir modelleme yapmaktadır [25]. Seçilen alanlarda kurulmak üzere, ortalama rüzgâr hızına ve kapasite faktörüne uygun özelliklere sahip ENERCON marka E-48 tipi 3 kanatlı bir türbin seçilmiştir. Türbinin teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [26].

Tablo 1. ENERCON marka E-48 tipi türbinin teknik özellikleri

Güç üretim oranı	800 kW	Kanat Sayısı	3
Kule yüksekliği	76m	Dönme hızı	16-31,5 devir/dakika
Rotor çapı	48m	Dönme Yönü	Saat yönü
Güç faktörü (Cp)	0,48	Süpürme Alanı	1809,6 m ²
IEC 61400-1 türbin sınıfı	Sınıf IIA	Uzaktan kontrol	Enercon Scada
Kanat malzemesi	GRP malzeme (Yıldırıma dayanıklı)	Rotor	Rüzgâra karşı aktif alan kontrolü
Ana Yatak	İkiz konik makaralı rulman	Jeneratör	Enercon direk tahrikli dairesel jeneratör
Türbinin Esneklik Özelliği	Tek bir türbin kanadı rüzgârın hızına göre yönü ve açılı ayarlanabilir.	Türbini durdurma	28-34 m/s (Enercon fırtına kontrol sistemi)
Fren sistemi	3 tane aktif saha kontrol sistemi acil güç desteğiyle birlikte, rotor freni ve rotor kilidiyle birlikte		

Karadeniz ve Marmara bölgelerinin REPA'larındaki rüzgâr hızı güç yoğunluğu ve kapasite faktörüne göre güneş enerjisi potansiyeli için seçilen aynı noktaların rüzgâr potansiyelleri incelenmiştir. Karadeniz kıyılarında belirlenen alanlardaki rüzgâr enerjisinden yıllık enerji üretimine bakıldığında Sinop, Kastamonu ve İstanbul illerinin potansiyellerinin biraz daha fazla olduğu görülmüştür.



Harita 3. İstanbul ilinin rüzgâr enerji potansiyel atlası (Istanbul Wind energy map) [22]

Seçilen koordinatların noktasal olarak rüzgâr hızları Global Atlas Wind üzerinden belirlenmiş ve seçilen türbine göre yıllık enerji üretimi teorik olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr gücünün teorik olarak hesaplanmasında kullanılan eşitlikler aşağıda belirtilmiştir.

$$E_K = \frac{1}{2} mV^2 \quad [E_K: \text{Kinetik Enerji (J)}, m: \text{Kütle (kg)}, V: \text{Rüzgâr Hızı (m/s)}] \quad (3)$$

$$V(h) = \frac{U^*}{K} \ln \frac{h}{z_0} \quad [U^*: \text{Rüzgâr hızı yükseklik faktörü}, K: \text{Von karman sabiti (0,4)}, z_0: \text{Yer yüzeyindeki}]$$

engellerden kaynaklanan pürüzlülük uzunluğu (m), h: Rüzgâr hızının yerden yüksekliği (m)] (4)

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \eta \quad [\rho: \text{Havanın yoğunluğu} (\text{kg/m}^3), A: \text{Kanat süpürme alanı} (\text{m}^2), \eta = \eta_m \eta_g \eta_e] \quad (5)$$

Toplam gücü bulduktan sonra türbinin kapasite faktörünün bulunup buna göre yıllık enerji miktarı bulunmalıdır.

$$KF = \frac{\text{Türbinin üreteceği enerji}}{\text{Türbin anma gücünde üreteceği enerji}} \quad (6)$$

Bakım, arıza gibi durumlar düşünülerekten bir yıl 355 gün (8520 saat) olarak alınmıştır. Kurulacak olan rüzgâr enerji santralinin yıllık üreteceği enerji miktarı:

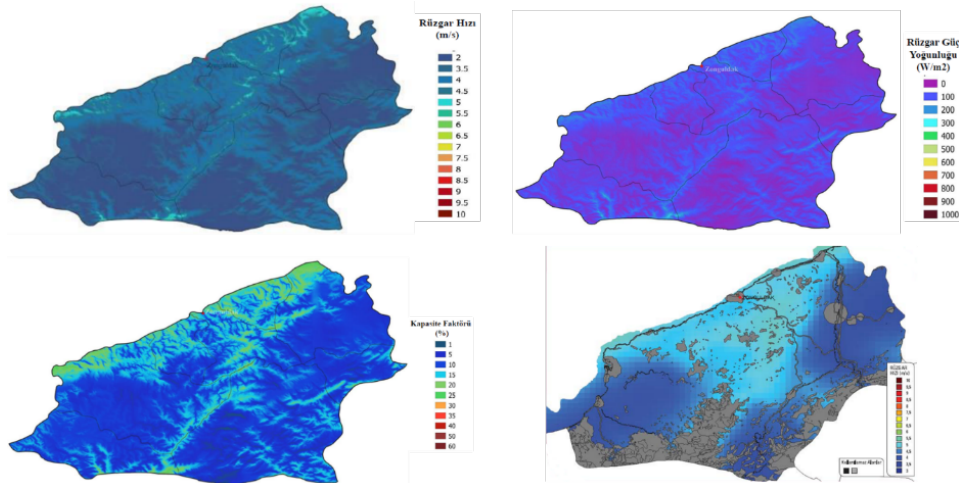
$$P_r (\text{MWh}) = P_r * 8520h * KF \quad (7)$$

Rüzgâr enerjisi potansiyeli hesaplanacak noktanın GAW programı üzerinden REPA haritalarına uygun olması amacıyla 100 m'deki rüzgâr hızına bakılmıştır. Eşitlikler kullanılarak öncelikle 100 m yükseklik için rüzgâr hızı yükseklik faktörü (U^*) hesaplanmıştır. Hesaplanan değere bağlı olarak seçilen türbinin kule yüksekliği (76 m) için hız hesaplanmıştır. Seçilen alanlar, seyrek ağaçların ve yapıların olduğu ova, çayır tipi alanlar olduğu için bu değer yüzey pürüzlülük uzunluğu 0,05 olarak alınmıştır [27].

Tablo 2. İstanbul ve Filyos'ta kurulacak olan RES için teorik hesaplamalar (Theoretical calculations for RES to be established in İstanbul and Filyos)

	İstanbul	Filyos
100 m'deki rüzgâr hızı (V)	7,58 m/s	6,16 m/s
Rüzgâr hızı yükseklik faktörü (U^*)	0,39 m/s	0,32 m/s
76 m'deki rüzgâr hızı (V)	7,30 m/s	5,93 m/s
Toplam güc (P_r)	207,5 kW	111,3 kW
Kapasite faktörü (KF)	%25,9	%14
Santralin yıllık üreteceği enerji	457,8 MWh	134,7 MWh

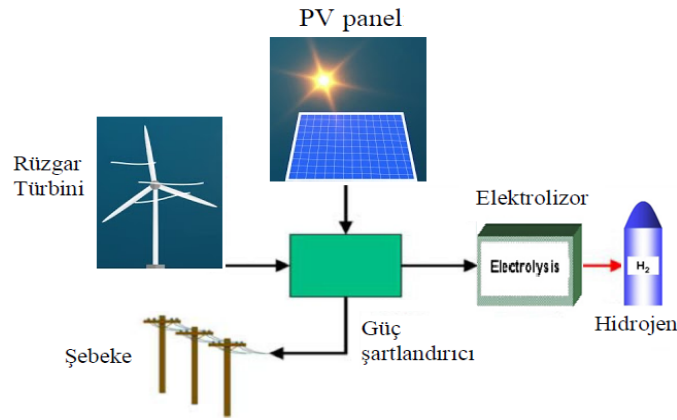
Tasarlanan hidrojen üretimi tesisinde hidrojen sülfürün elektrolizi için gerekli olan enerji miktarı yaklaşık 640 MWh olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr enerjisi için yapılan teorik hesaplamalarda hem İstanbul hem de Filyos için santralin üreteceği yıllık enerji miktarları bu değerden az olduğundan ve en azından kurulacak santralin bu değeri karşılaması gerektiği düşünüldüğünden kurulacak santralin yıllık 640 MWh'den daha fazla enerji üretebilmesi gerektiği öngörülmüştür. Bu sebeple de maliyetler göz önüne alınarak İstanbul için en az 2 adet türbine ($457,8*2=915,6$ MWh) ihtiyaç olacaktır. Filyos'un güneş enerji potansiyeli yönünden ilk sırada yer alması ve jeopolitik önemi düşünülünce rüzgâr enerji potansiyeline de bakılması gerektiği düşünülmüştür. Filyos'da kurulacak bir santralde 640 MWh'lik enerjisi elde edebilmek için ise en az 5 adet türbine ($134,7*5= 673,5$ MWh) ihtiyaç olacaktır.



Harita 4. Filyos'un rüzgâr enerji potansiyel atlası (Filyos wind energy map) [22]

Bu çalışmanın amacı hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması olduğu düşünülürse hem rüzgâr hem de güneş enerjilerinden yararlanılmasının gerektiği düşünülmüştür.

Hem daha fazla yenilebilir enerji kaynağından yararlanmak hem de elektroliz prosesine sürekli enerji verebilmek adına hibrit bir enerji santralini (Şekil 10) kurulmasına karar verilmiştir. Ayrıca kurulacak olan enerji santrallerinden elde edilecek enerji şebekeye de verilebilir.



Şekil 10. Seçilen lokasyonlarda kurulacak olan hibrit enerji santrali (Hybrid power plant to be built in selected locations)

Tesisin kurulacağı alan seçilirken yapılan rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyellerine bakılmıştır. Ayrıca seçilecek alanın jeopolitik önemi; sanayi, ulaşım, istihdam gibi sosyo-ekonomik durumları da ihmal edilmemiştir. Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kombine tesisin kurulacağı alan olarak İstanbul ili ve Zonguldak Filyos seçilmiştir.

4. Kurulacak Olan Enerji Santrallerinin Ekonomik Analizi (Economic Analysis of Power Plants to be Built)

Enerji santrallerinde ekonomik analiz yapılırken; arazi, makine, altyapı vb. gibi ilk yatırım maliyetleri ve çalışan maaşları, destek ekipmanları, bakım giderleri vb. gibi işletme-bakım maliyetleri göz önüne alınır. Ekonomik bir değerlendirme kriteri olan birim enerji üretim maliyeti, kullanım ömrü boyunca santralden birim enerji elde etmek için gerekli olan bütün maliyetlerdir. Bir yatırımcı için diğer bir önemli kriter ise proje finansmanında kullanılan öz sermaye ve kredi borçlanmasından oluşan kaynak maliyetidir [28]. Bu çalışmada, net bugünkü değer yöntemi ile iç karlılık oranı yöntemlerine göre ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Bir yatırımın yıllara göre gelirlerinin bugünkü değerleri toplamı ile yıllara göre giderlerinin bugünkü değerleri toplamı arasındaki fark yatırımın net bugünkü değeridir ve pozitifse yatırım uygundur. Bir yatırımın net bugünkü değerini sıfıra eşitleyen iç karlılık oranı yönteminde iç karlılık oranının sermaye maliyetinden büyük olması gerekmektedir [28].

Ekonomik analizler yapılırken aşağıdaki formüllerden yararlanılmıştır [28]:

$$\text{Geri Ödeme Süresi} = \frac{\text{Yatırım bedeli}}{\text{Yıllık Net Kazanç}} \quad (8)$$

$$\text{Net Bugünkü Değer} = \frac{A}{(1+r)} + \frac{A}{(1+r)^2} + \frac{A}{(1+r)^3} + \dots + \frac{A}{(1+r)^n} - I \quad (9)$$

I: ilk yatırım tutarı, A: yıllık döneme ait nakit akışı, r: getiri oranı

$$\text{Yatırım Harcaması} = \frac{\text{Nakit akışı}}{(1+\text{iç karlılık oranı})} \quad (10)$$

$$0 = CF + \frac{CF}{(1+r)} + \frac{CF}{(1+r)^2} + \frac{CF}{(1+r)^3} + \dots + \frac{ACF}{(1+r)^n} \quad (11)$$

CF: her yıla ait nakit akışı, iç karlılık oranı: r

Yatırımcının %100 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirildiği ya da yatırımcının %25 öz sermaye, %75 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirdiği varsayılmıştır. Her iki senaryo için de kurulum maliyeti, faiz oranları, dağıtım ve sistem kayıpları gibi temel unsurlar sabit tutulmuştur. Bir güneş enerjisi santralini maliyet analizini yapılırken;

*Yer seçimi, saha incelemesi, proje hazırlığı ve yönetimi, mühendislik çalışmaları, danışmanlık hizmetleri vb. gibi fizibilite çalışma maliyetleri

*Güneş panelleri ve ekipman maliyetleri

- *Arazi bedeli ve altyapı, yol vb. inşaat maliyetleri
- *Şalt sahası, kablolama, devreye alma vb. elektrik maliyetleri
- *Arıza bakım, sigorta, yönetim, eğitim vb. gibi operasyonel maliyetler
- *Öngörülemeyen maliyetler dikkate alınmaktadır.

Rüzgâr enerjisi santrallerinde en önemli yatırım maliyetleri ise işletme ve bakım maliyetleridir. Bir rüzgâr enerjisi santralının toplam maliyetinin yaklaşık %76'sı türbin maliyeti, yaklaşık %9'u şebeke bağlantı maliyetleri ve %7'si montaj-kurulum maliyetleri olarak gösterilmektedir [29]. Bir rüzgâr enerjisi santralının maliyet analizini yapılırken;

- *Sahada ölçümlerin yapılması, projelendirme, mühendislik analizleri ve hesaplamaları vb. gibi danışmanlık ve proje maliyetleri
- *Yol, altyapı, temellerin yapılması gibi inşaat maliyetleri
- *Türbin parçalarının üretimi, nakliyesi ve montajı gibi türbin ve montaj maliyetleri
- *Şalt sahası, kablolama, devreye alma ve enerji nakil hatları vb. elektrik maliyetleri
- *Arıza bakım, sigorta, yönetim, eğitim vb. gibi operasyonel maliyetler
- *Kontrol ve izleme sistemleri, uzaktan kontrol gibi diğer maliyetler dikkate alınmaktadır.

Güneş ve rüzgâr enerji santrallerinin ekonomik analizi yapılırken bazı varsayımlarda bulunulmuştur:

- *Elektroliz için gerekli enerjinin tamamı güneş veya rüzgâr enerji santralinden üretilen elektrik enerjisi ile sağlanmakta olup üretilen fazla elektrik enerjisi H₂S kapsamında satılacaktır. Devletin destek alma fiyatı 32,00 TL kuruş/kWh olarak verilmiş olup %60 oranında yerli desteği de aldığı varsayılarak toplamda 36,8 (32+8*0.6) TL kuruş/kWh üzerinden elektrik satışı gerçekleşecektir [30]. Avro üzerinden hesaplanacak olursa 12.01.2022 tarihli T.C. Merkez Bankası'ndan alınan kura (1 €: 15,6 ₺) göre satış fiyatı 2,35 €/kWh olacaktır. Elektrik destek alım fiyatı 10 yıl garanti süresince sabit tutulmuştur. 10 yıl sonrasında, YEKDEM mekanizmasının kaldırılması gözetilerek, elektrik satış fiyatının her yıl %2,35 oran artışla satılacağı varsayılmıştır.
- *Kredi faiz oranı %10, enflasyon oranı %5 olarak alınmıştır.
- *2020 yılı sonrasında zorunlu olan karbon piyasa mekanizması dikkate alınarak karbon fiyat hesaplaması analize dahil edilmiştir. Satılan karbon fiyatı 3 €/ton olarak alınmıştır. 1 kWh elektrik üretimi için yaklaşık 0,65 kg CO₂ azaltımı yapıldığı varsayılmıştır [31].
- *Kurulacak GES için yaklaşık 2 hektarlık (20000 m²) bir alan yeterli olurken, RES için yaklaşık 1 hektarlık (10000 m²) bir alan yeterli olmaktadır.
- *İstanbul için, Kanal İstanbul projesi ile birlikte arazi fiyatlarında büyük bir artış yaşanmıştır. Seçilen alanın satın alınması projenin değeri ile kıyaslandığında oldukça yüksek kalacağından arsa fiyatı olarak seçilen bölgenin bulunduğu belediyeden arsa rayiç bilgileri alınmıştır. Eyüpsultan Belediyesi'nin belirlediği rayiç bedeli m² başına 343,2 TL (yaklaşık 22 €) olup arsa bedeli bu fiyattan belirlenmiştir [32].
- *Filyos için, Filyos Belediyesi ile telefonda görüşülerek rayiç bedelinin m² başına 220 TL (yaklaşık 14 €) olduğu öğrenilmiş ve bu değer kullanılmıştır.
- *Yapılması planlanan GES için yaklaşık 4.000 adet PV paneli ve 40 adet invertör kullanırken, RES için İstanbul'da 2 adet, Filyos'ta 5 adet türbin kullanılacaktır.
- *PV panellerin ve invertörlerin fiyatları satış sitelerinden ve CSUN solar üretici fiyat aralığından alınmıştır. 1640×990×40mm boyutlarında, 19,1kg ağırlığında, 250 Wp gücünde, %15,4 panel verimliliğine sahip CSUN 250-60 PSAR panelinin yaklaşık olarak fiyatı 157 € olarak bulunmuştur. SMA Sunny Tripower 20000TL-30 modülü fiyatı 2645 € olarak alınmıştır [33]. PV panel ve invertör fiyatları, analizde modül fiyatı içerisinde €/kW olarak alınmıştır.
- *Türbin fiyatları satış sitelerinden ve üretici firmadan alınmıştır. Enercon E-48 türbinin yaklaşık fiyatı 300000 €'dur [34]. Analizlerde türbin fiyatı €/kWp olarak kullanılmıştır.
- *İncelenen farklı projelerde bir PEM elektrolizörün maliyeti yaklaşık olarak 60000 € olarak alınmıştır [5]. Yapılan analizlerde, hesaplamaların kolay yapılabilmesi için PEM elektrolizör fiyatı arsa bedelinin içerisinde yer almıştır.
- *Güneş enerji santralleri için, malzeme ve işçilik fiyatları belirlenirken Şanlıurfa Enerji İhtisas Bölgesi için yapılan 1 MW'lık güneş enerjisi santralleri baz alınmıştır. Baz alınan çalışmalarda modül fiyatının yaklaşık yüzde %61 malzeme ve işçilik fiyatları olarak hesaplanmıştır [35]. Rüzgar enerjisi santralleri için, şebeke, yol yapımı ile kurulum ve montaj maliyetleri yaklaşık olarak türbin maliyetinin %18 olarak belirlenmiştir. Arıza bakım maliyetleri yaklaşık olarak %2, sigorta maliyetleri yaklaşık olarak %0,8, yönetim ve danışmanlık maliyetleri yaklaşık olarak %2,4 olarak alınmıştır [29]. Hem GES hem RES için

bu maliyetlerin net şekilde verilmemesinin sebebi proje alanına ve yerine göre maliyetlerin değişebileceğinin ön görülmesidir.

* Yapılan araştırmalarda hidrojenin kg başına fiyatı 3,18-5,75 \$ dolar olarak bulunmuştur [36]. Başka bir çalışmada ise fiyatın 2.16 €/kg olduğu görülmüştür [37]. Ekonomik analiz yapılırken bu değerler ortalaması alınarak kilogram başına hidrojenin fiyatı yaklaşık 2,5 € olarak belirlenmiştir. Yıllık yaklaşık 125000 € değerinde hidrojen, 40000 € değerinde sülfür elde edilecektir [38].

Tablo 3. İstanbul'da kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%25 öz kaynak, %75 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (25% equity, 75% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	Proje Net Bugünkü Değer Oranı	5%
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	27%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	19%
20 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 631324
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	31%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	23%
30 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 1582309
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	31%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	24%
	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 2257067
	Sermaye Geri Ödeme Periyodu	4 Yıl 12 Ay
	Proje Geri Ödeme Periyodu	4 Yıl 12 Ay

Bu veriler ışığında İstanbul'da kurulacak olan güneş enerjisi santralının yıllık enerji üretimi 1307,6 MWh olup bunun 640 MWh'lik kısmı elektroliz prosesinde hidrojen üretimi için kullanılacak olup geri kalan 667 MWh şebekeye verilecektir. Finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 4 yıl 12 ay (Tablo 3) olurken finansmanı %100 kredi ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 5 yıl 9 ay (Tablo 4) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. İstanbul'da kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%100 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (100% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	İç Verimlilik Oranı	19%
	Net Bugünkü Değeri	€ 610048
20 Yıl	İç Verimlilik Oranı	23%
	Net Bugünkü Değeri	€ 1529304
30 Yıl	İç Verimlilik Oranı	23%
	Net Bugünkü Değeri	€ 2184583
	Proje Geri Ödeme Periyodu	5 Yıl 9 Ay

Filyos'ta kurulacak olan güneş enerjisi santralinde üretilecek olan 1336,7 MWh'lik enerjinin 640 MWh'lik kısmı elektrolizde kullanılacak olup geriye kalan 697 MWh şebekeye verilecektir. Finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 3 yıl 11 ay (Tablo 5) olurken finansmanı %100 kredi ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 4 yıl 5 ay (Tablo 6) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Filyos'ta kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%25 öz kaynak, %75 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (25% equity, 75% loan) to be Built in Filyos)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	Proje Net Bugünkü Değer Oranı	5%
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	37%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	26%
20 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 775600
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	40%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	29%
30 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 1743245
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	40%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	29%
	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 2428713
	Sermaye Geri Ödeme Periyodu	3 Yıl 11 Ay
	Proje Geri Ödeme Periyodu	3 Yıl 11 Ay

Tablo 6. Filyos'ta kurulacak olan 1 MW'lık GES'in (%100 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1 MW SPP (100% loan) to be Built in Filyos)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	İç Verimlilik Oranı	26%
	Net Bugünkü Değeri	€ 756044
20 Yıl	İç Verimlilik Oranı	31%
	Net Bugünkü Değeri	€ 1700292
30 Yıl	İç Verimlilik Oranı	29%
	Net Bugünkü Değeri	€ 2371395
Proje Geri Ödeme Periyodu		4 Yıl 5 Ay

İstanbul'da tasarlanacak olan 1,6 MW kurulu güce sahip santralin yıllık enerji üretimi 915,6 MWh olarak hesaplanmıştır. 640 MWh'lık kısmı elektrolizde kullanılacak olup geriye kalan kısım şebekeye verilecektir. Finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak santralin geri dönüş süresi 11 yıl 6 ay (Tablo 7), %100 kredi ile kurulacak olan santralin ise 18 yıl 8 ay (Tablo 8) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 7. İstanbul'da kurulacak olan 1,6 MW'lık RES'in (%25 öz kaynak, %75 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1,6 MW WPP (25% equity, 75% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	Proje Net Bugünkü Değer Oranı	5%
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	-10%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	4%
20 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	-€ 32619
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	11%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	11%
30 Yıl	Proje Net Bugünkü Değeri	€ 622132
	Sermaye-İç Verimlilik Oranı	11%
	Proje-İç Verimlilik Oranı	12%
Proje Net Bugünkü Değeri		€ 1018561
Sermaye Geri Ödeme Periyodu		11 Yıl 6 Ay
Proje Geri Ödeme Periyodu		11 Yıl 6 Ay

Tablo 8. İstanbul'da kurulacak olan 1,6 MW'lık RES'in (%100 kredi) yatırım geri dönüşü (Investment assessment of 1,6 MW WPP (100% loan) to be Built in Istanbul)

Yatırım Geri Dönüşü		
10 Yıl	İç Verimlilik Oranı	4%
	Net Bugünkü Değeri	-€ 32619
20 Yıl	İç Verimlilik Oranı	10%
	Net Bugünkü Değeri	€ 562129
30 Yıl	İç Verimlilik Oranı	11%
	Net Bugünkü Değeri	€ 888443
Proje Geri Ödeme Periyodu		18 Yıl 8 Ay

Filyos'un rüzgâr enerjisi potansiyeli güneş enerjisi potansiyeline göre bir hayli düşük olmakla beraber Filyos'un önemine binaen kurulabilecek olan rüzgâr enerjisi santrallerinin teorik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Elektroliz için gereken enerjiyi rüzgâr enerjisinden elde etmek için en az 5 adet türbin gerekmektedir ki bu ekonomik olarak uygun değildir.

3. Sonuçlar (Conclusions)

Azalan enerji kaynakları ve artan enerji maliyetleri ile beraber çevre bilincinin de etkisiyle birçok ülke yenilenebilir ve sürdürülebilir temiz enerji kaynakları arayışına girmiştir. Bu enerji kaynaklarından da doğada bol miktarda bulunan ve çevre dostu olan hidrojen ön plana çıkmıştır. Hem fosil yakıtlardan hem de yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilen hidrojen Karadeniz'in diplerinde bol miktarda bulunan hidrojen sülfürden de üretilebilmektedir. Karadeniz'in diplerindeki H₂S'den elde edilebilecek hidrojen yaklaşık 270 milyon tondur. Sonuç olarak Karadeniz, büyük bir enerji potansiyeline sahiptir.

Karadeniz kıyılarının güneş ve rüzgâr enerjisi potansiyelleri analiz edilerek güneş enerjisi kurulu gücü 1 MW, rüzgâr enerjisi kurulu gücü 0,8 MW olan santrallerin kurulması düşünülmüş ve bu kurulu güçlere göre yıllık enerji potansiyelleri hesaplanmıştır. Yıllık 50 ton üretebilecek olan tesisin enerji ihtiyacı 638,85 MWh olup bu enerji, Karadeniz'de bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanacaktır.

PVGIS simülasyon programı ile yapılan analizler neticesinde, Karadeniz kıyılarında güneş enerjisinden yıllık enerji üretimi birbirine yakın olmakla Filyos yıllık 1336,7 MWh'lık enerji üretim kapasitesi ile ilk sırada yer almıştır. Sırasıyla Zonguldak 1317,3 MWh, Samsun 1308,1 MWh ve İstanbul 1307,6 MWh enerji üretim kapasitesine sahiptir. Rüzgâr enerjisinden yıllık enerji üretimine bakıldığında Sinop yıllık 658 MWh'lık enerji üretim kapasitesi ile ilk sırada yer alırken, sırasıyla Kastamonu 483,4 MWh, İstanbul 457,8 MWh, Kırklareli 286,6 MWh, Samsun 257 MWh ve Filyos 134,7 MWh enerji üretim kapasitesine sahiptir. Bu çalışmanın amacının hidrojen üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanılması olduğu düşünülürse hem güneş enerjisi hem de rüzgâr enerjisinden yararlanmak için hibrit bir enerji santralının kurulmasına karar verilmiştir. Tasarlanan enerji santrallerinin şebekeye bağlı enerji sistemleri olarak şebekeye elektrik verebilecektir.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda, kombine tesisin kurulacağı alan olarak İstanbul ili ve Zonguldak Filyos seçilmiştir. İstanbul enerji potansiyeli olarak en iyi il çıkmasının yanı sıra analiz yapılan bölgenin, mega bir proje olarak gösterilen Kanal İstanbul projesine yakın olması, İstanbul'un sanayi, ulaşım vb. alanlarda daha çok enerjiye ihtiyacı olması, gerekli altyapının İstanbul'da bulunması gibi sosyal ve ekonomik etkenler de göz önüne alınmıştır. Filyos'un güneş enerjisi potansiyeli, analizi yapılan alanlarda yıllık 1336,7 MWh'lık enerji üretim kapasitesi ile ilk sırada yer almaktadır. Filyos'un en önemli seçilme nedeni ise buraya yapılacak olan mega endüstri bölgesi ve Türkiye'de ilk üçe girecek bir limanın varlığıdır. Ayrıca Karadeniz'de bulunan yaklaşık 540 milyar m³ doğalgaz bu bölgeden dağıtılacak olup buraya birçok sanayi kolu yatırım yapacaktır. Filyos Türkiye'nin kuzey kapısı olup ulaşım ve lojistik anlamda denizyolu, demiryolu, karayolu ve havayolu imkânları mevcuttur.

Seçilen alanların ve yapılacak olan santrallerin karlı ve yatırım yapılabilirliğini görebilmek adına ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir. Net bugünkü değer yöntemi ile iç karlılık oranı yöntemi tercih edilmiş olup yatırımcını %100 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirildiği ya da yatırımcının %25 öz sermaye, %75 kredi çekerek yatırımı gerçekleştirdiği iki farklı senaryo ele alınmıştır. Şebekeye bağlı bir sistem tasarlandığı için devletin vermiş olduğu teşviklerden yararlanılacağı düşünülmüştür. Seçilen iki yer için de hem güneş hem de rüzgâr için iki farklı senaryoda ekonomik analizler gerçekleştirilmiştir.

İstanbul için finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak güneş enerjisi santralının geri dönüş süresi 4 yıl 9 ay olarak hesaplanmıştır. %100 kredi ile kurulacak güneş enerjisi santralının geri dönüş süresi ise 5 yıl 5 ay olarak hesaplanmıştır. Buradan iki senaryonun da uygulanabileceği ve fizibil olduğu sonucu çıkarılmakla beraber öz sermaye oranı ne kadar fazla ise projenin geri dönüş süresi de o kadar kısa olmaktadır. Filyos'da %25 öz sermaye, %75 kredi ile kurulması planlanan güneş enerjisi santralının yatırımın geri dönüş süresi 3 yıl 6 ay olarak hesaplanmıştır. %100 kredi ile kurulacak santralin geri dönüş süresi ise 3 yıl 11 ay olarak hesaplanmıştır.

Gerek Filyos'un güneş enerjisi potansiyelinin yüksek olması gerekse santralin kurulacağı arsa bedelinin daha ucuz olması sebebiyle Filyos için İstanbul'a göre güneş enerjisi yatırımının geri dönüş süresi daha kısadır. Ancak iki proje için de yatırım yapılabilirlik ve karlılık oranları gayet iyi gözükmektedir.

İstanbul için finansmanı %75 kredi ve %25 öz kaynak ile kurulacak rüzgâr enerji santralının geri dönüş süresi 10 yıl 8 ay olarak hesaplanmıştır. Rüzgâr enerji santralleri ilk yatırım maliyetleri yüksek olan enerji santralleri olmakla beraber yatırımın geri ödeme süresi uygun gözükmektedir. %100 kredi ile kurulacak rüzgâr enerji santralının geri dönüş süresi 18 yıl 8 ay olarak hesaplanmıştır.

Filyos'un diğer seçilen bölgelere göre rüzgâr enerji potansiyelinin az olduğu görülmüştür. Ancak yine de bir maliyet analizi yapılarak bir öngörüye sahip olunabileceğine kanaat getirilmiştir. Yapılan analiz, Filyos'taki rüzgâr enerjisi santrali yatırımının net bugünkü değerinin ve iç verimlilik oranının negatif olması yatırımın iyi bir yatırım olmadığını göstermektedir.

Hidrojen temiz, çevre dostu gelecek için önemli bir enerji kaynağıdır. Karadeniz'de de bertaraf edilmesi gereken ve hidrojen üretebileceğimiz bol miktarda hidrojen sülfür mevcuttur. Bu çalışmada hidrojen sülfürden hidrojen üretimi için gerekli enerjinin yenilenebilir enerji kaynaklarından olan güneş ve rüzgârdan elde edilebileceği ekonomik analizlerle gösterilmeye çalışılmıştır. İstanbul'da hem güneş hem rüzgârdan hibrit bir sistemle hidrojen üretimi ekonomik olabilmektedir. Filyos'ta ise sadece güneş ile hidrojen üretimi gerçekleştirilmekte olup Karadeniz'den doğalgaz da çıkarılabileceği varsayılırsa

buraya yatırım yapılması kaçınılmazdır.

Bu çalışmada hidrojen sülfürden hidrojen üretiminin elektroliz prosesi üzerinde daha çok durulmuş ve bu prosesin enerji ihtiyacı karşılanmaya çalışılmıştır. Hidrojen sülfürün denizden çıkarılması ve deniz suyundan ayrıştırılması kısımları da önem arz etmekte ve bu proseslerin de enerji gereksinimleri dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca güneş ve rüzgâr enerjisi santrallerin %100 yerli olarak imal edilmesi durumunda maliyetler daha da azalacak olup karlılık oranları artacaktır. Devlet teşviki ile arsa bedelleri de daha düşük olursa yatırımcılar için daha teşvik edici olabilir.

Simgeler (Symbols)

\$	US Dolar
€	Euro
₺	Türk Lirası
°C	Celcius
AMIS	Abatement of Mercury and Hydrogen Sulfide
CHEMCAD	Chemical Computer Aided Design
CO ₂	Karbondioksit
GAW	Global Atlas Wind
GES	Güneş enerjisi santrali
GEPA	Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GRP	Glass fiber Reinforced Composite
GWh	GigaWattsaat
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su
H ₂ S	HidrojenSülfür
kg	Kilogram
kg/h	Kilogram/saat
kJ	Kilojoule
kPa	Kilopaskal
kWh	KiloWattsaat
L	Litre
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
MPa	MegaPaskal
MW	MegaWatt
MWh	MegaWattsaat
PEM	Polimer Elektrot Membranlı
pH	Power of Hydrogen
PV	PhotoVoltaic
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
REPA	Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası
RES	Rüzgar enerjisi santrali
S	Kükürt
SO ₄ ²⁻	Sülfat
TJ	Terajoule
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
V	Vanadyum
YEKDEM	Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması

Çıkar Çatışması Bildirimi (Conflict Of Interest Statement)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

Kaynaklar (References)

- [1] S. A. Sherif, F. Barbir and T. N. Veziroğlu, "Wind energy and the hydrogen economy review of the technology," *Solar Energy*, vol. 78, no. 5, pp. 647-660, 2005. doi:10.1016/j.solener.2005.01.002
- [2] J. I. Levene, M. K. Mann, R Margolis and A Milbrandt, "An Analysis of Hydrogen Production from Renewable Electricity Sources" *National Renewable Energy Laboratory, NREL/CP-560-37612*, 2005.
- [3] S. Z. Baykara, H. E. Figen, A. Kale and T. N. Veziroğlu, "Hydrogen from hydrogen sulphide in Black Sea," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1246-1250, 2008. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.07.021
- [4] A. Midilli, M. Ay, A. Kale, and T. N. Veziroğlu, "A parametric investigation of hydrogen energy potential based on H₂S in Black Sea deepwaters" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 1, pp. 117-124, 2007. doi:10.1016/j.ijhydene.2006.04.006

- [5] K. Petrov, S. Z. Baykara, D. Ebrasu, M. Gulin, and T. N. Veziroğlu, "An assessment of electrolytic hydrogen production from H₂S in Black Sea waters," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 8936-8942, 2011. doi:10.1016/j.ijhydene.2011.04.022
- [6] A. E. Sanlı and M. D. Mat, "Performance analysis of direct Black Sea hydrogen sulphide (in artificial sea water)/hydrogen peroxide fuel cells" *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 35, pp. 6440-6448, 2015. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.03.042
- [7] M. Türkaslan, "Karadeniz Suyundan Hidrojen Üretimi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2013.
- [8] M. Stavros, "Feasibility study of hydrogen production and power in fuel cell reactors, from the H₂S-rich Black Sea waters," Master of Science (MSc) in Energy Systems, School of Science & Technology, International Hellenic University, Thessaloniki, Greece, 2012.
- [9] A. Karapekmez and İ. Dinçer, "Modelling of hydrogen production from hydrogen sulfide in geothermal power plants," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10569-10579, 2018. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.02.020
- [10] A. Karapekmez and İ. Dinçer, "Development of a multigenerational energy system for clean hydrogen generation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 299, 2021. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126909
- [11] A. Midilli, M. Öztürk and İ. Dinçer, "Effective use of hydrogen sulfide and natural gas resources available in the Black Sea for hydrogen economy," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 10697-10707, 2021. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.12.186
- [12] S. Seker and N. Aydin, "Hydrogen production facility location selection for Black Sea using entropy based TOPSIS under IVPF environment," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 32, pp. 15855-15868, 2019. doi:10.1016/j.ijhydene.2019.12.183
- [13] N.N. Greenwood and A. Earnshaw, *Chemistry of Elements*, Second Edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [14] D. Stirling, *The Sulfur Problem: Cleaning up Industrial Feedstocks*, Cambridge: The Royal Society Of Chemistry, 2000.
- [15] M. Kim, W. Ju, K. Kim and D. Park, "Selective oxidation of hydrogen sulfide to elemental sulfur and ammonium thiosulfate using VO_x/TiO₂ catalysts," *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 159, pp. 225-228, 2006. doi:10.1016/S0167-2991(06)81574-0
- [16] J. Zaman and A. Chakma, "Production of hydrogen and sulfur from hydrogen sulfide," *Fuel Processing Technology*, vol. 41, no. 2, pp. 159-198, 1995.
- [17] O. Yılmaz, "Deniz Suyundaki Hidrojen Sülfürün (H₂S), Farklı Metal Elektrotlar Kullanılarak Elektro-Oksidasyonunun İncelenmesi," Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2012.
- [18] M. Ö. Ültanır, "Hidrojen enerjisi ve Türkiye'de hidrojene geçiş sorunları," in Türkiye 6. Enerji Kongresi Teknik Oturum Tebliği, İzmir, Türkiye, Ekim 17-22, 1994, Ankara: Dünya Enerji Konseyi Türk Millî Komitesi, 1995. pp. 549-563.
- [19] Y. Ustun, "Karadeniz Havzası ve Türk Boğazları Sistemi," dogailebaris.org.tr, March 10, 2006. [Online]. Available: <http://www.dogailebaris.org.tr>. [Accessed: April 21, 2021].
- [20] L.N. Neretin, I.I. Volkov, M.E. Bottcher and V.A. Grinenko, "A sulphur budget for the Black Sea anoxic zone," *Deep-Sea Research Part I*, vol. 48, no. 12, pp. 2569-2593, 2001. doi:10.1016/S0967-0637(01)00030-9
- [21] ETKB, "Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)," enerji.gov.tr, Jan. 01, 2010. [Online]. Available: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx22>. [Accessed: Dec 11, 2021].
- [22] ETKB, "Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA)," enerji.gov.tr, Jan. 01, 2007. [Online]. Available: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/>. [Accessed: Dec 13, 2021].
- [23] Europea Commission, "Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)," ec.europa.eu, March 01, 2020. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/docs/startintg>. [Accessed: Dec 12, 2021].
- [24] M. Çalışkan, "Orta Karadeniz Bölgesi Rüzgar Enerjisi Potansiyeli," emo.org.tr, Sep. 5, 2007. [Online]. Available: https://www.emo.org.tr/ekler/09260384253eef3_ek.pdf. [Accessed: Dec. 15, 2021].
- [25] Danmarks Tekniske Universitet (DTU), "Global Atlas Wind (GWA)," globalwindatlas.info, Oct. 25, 2019. [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/about/introduction>. [Accessed: Dec. 16, 2021].
- [26] The Wind Power, "Manufacturers and turbines, Enercon, E48/800," thewindpower.net, Nov. 07, 2010. [Online]. Available: https://www.thewindpower.net/turbine_en_3_enercon_e48-800.php. [Accessed: Jan. 28, 2022].
- [27] S. Güzel, "Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Hesaplamasında Kullanılan Bilgisayar Programlarının Karşılaştırması," Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2014.
- [28] E. Saray, "Yenilenebilir Enerji Üretim ve Yatırım Maliyetleri Karşılaştırması: Ege Bölgesi Örneği," Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2019.

- [29] Z. T. Altuntaşoğlu, "Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi, Mevcut Durum, Sorunlar," *Mühendis ve Makine Dergisi*, vol. 52, no. 617, pp. 56- 63, 2012.
- [30] EPDK, "Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması-YEKDEM," epdk.gov.tr, Jan. 29,2021. [Online]. Available: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-0-122/yenilenebilir-enerji-kaynaklari-destekleme-mekanizmasi-yekdem>. [Accessed: Jan. 20, 2022].
- [31] European Commision, "Review of the EU ETS market stability reserve final report/2021," op.europa.eu, April 12, 2021. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5fac10fc-353a-11ec-bd8e-01aa75ed71a1>. [Accessed: Jan. 22, 2022].
- [32] Eyüpsultan Belediyesi, "Arsa Rayiç Bilgileri," eyupsultan.bel.tr, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://ebelediye.eyupsultan.bel.tr/web/guest/5>. [Accessed: Jan. 24, 2022].
- [33] Europe-solarstore, "Solar panels and solar inverters," europe-solarstore.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.europe-solarstore.com/>. [Accessed: Jan. 24, 2022].
- [34] Wind-turbine-models, "Enercon E-48," wind-turbine-models.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/marketplace?manufacturer=22>. [Accessed: Jan. 25, 2022].
- [35] E. U. Divitçi, H. Şahin, K. Demirkol, M. Güllüoğlu, N. Güllü, S. Çadırcı ve S. Kağıtçı, "Güneş Enerjisine Dayalı Elektrik Üretim Santrali Yatırımları için Şanlıurfa Enerji İhtisas Endüstri Bölgesi Fizibilitesi ve Etüdü," sutso.org.tr, July 11, 2015. [Online]. Available: <https://www.sutso.org.tr/projeler/11/sanliurfa-ilinde-gunes-enerjisine-dayali-elektrik-uretim-santralleri-icin-enerji-endustri-ihstias-bolgesi-fizibilite-raporu-projesi>. [Accessed: Feb. 01, 2022].
- [36] Statista, "Forecast hydrogen selling price of selected giga-scale projects worldwide by 2021 wind and solar costs," statista.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1260117/projected-selling-prices-of-large-scale-hydrogen-green-projects/>. [Accessed: Jan. 26, 2022].
- [37] Recharge/Global News And Intelligence for the Energy Transition, "Green hydrogen currently cheaper to produce in Europe than grey and blue H2 due to high natural gas and carbon prices," rechargenews.com, Jan. 01, 2022. [Online]. Available: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/green-hydrogen-currently-cheaper-to-produce-in-europe-than-grey-and-blue-h2-due-to-high-natural-gas-and-carbon-prices/2-1-1080887>. [Accessed: Jan. 26, 2022].
- [38] Chemanalyst, "Sulphur Price Trend and Forecast," rechargenews.com, Jan. 01, 2020. [Online]. Available: <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/sulphur-39>. [Accessed: Jan. 26, 2022].

This is an open access article under the CC-BY license

