



Tanrikulu, Y. S. ve Partigöç, N. S. (2024). "Güneş Enerjisi Santrallerinin (GES) Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) Tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Yöntemi İle Yer Seçimi: Denizli İli Örneği", *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, sayı 60, Denizli, ss. 401-418.

GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALLERİNİN (GES) COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLERİ (CBS) TABANLI ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ (AHS) YÖNTEMİ İLE YER SEÇİMİ: DENİZLİ İLİ ÖRNEĞİ

Yusuf Samet TANRIKULU*, Nur Sinem PARTİGÖÇ**

Öz

Günümüzde enerji talebi hızla artarken, enerji üretimi ve tüketimi süreçlerindeki çevresel etkiler ve fosil yakıtların sınırlı kaynaklar olması konuları giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu durum, yenilenebilir enerji ve sürdürülebilirlik kavramlarının önemini vurgulamaktadır. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik, biyokütle ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji talebini karşılamada büyük bir potansiyele sahiptir. Bu kaynakların kullanımı, enerji güvenliğini artırırken aynı zamanda çevresel etkileri azaltma potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talebin artmasıyla birlikte, doğru yer seçimi kararları büyük önem taşımaktadır. Doğru yer seçimi, yenilenebilir enerji projelerinin başarısını etkileyen önemli bir faktördür. Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) bu süreçte yaygın olarak tercih edilen araçtır. Bu çalışmada, güneş enerji santrallerinin (GES) yer seçimi için uygunluk analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve AHS araçları kullanılarak Denizli iline ilişkin mekânsal analizler yapılmıştır. Uzman görüşleri ve ilgili literatür araştırmasından yola çıkılarak, güneş enerji santralleri için uygun yer seçimi kriterleri ortaya konulmuştur. Ayrıca, çalışma alanına ait mekânsal ve mekânsal olmayan veriler CBS ortamına aktararak alana ilişkin analiz çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen bulgular ışığında, Denizli ilinde toplam 44,579 hektar alanın GES kurulumu için çok uygun, toplam 619,595 hektar alanın orta uygun ve toplam 530,922 hektar alanın ise uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir Enerji Kaynakları, Güneş Enerjisi Yatırımları, Sürdürülebilirlik, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS), Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS).

THE SITE SELECTION FOR RENEWABLE ENERGY INVESTMENTS USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS)-BASED ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP) METHOD: A CASE STUDY OF DENİZLİ

Abstract

The environmental impacts of energy production and consumption processes are becoming increasingly important as well as the limited resources of fossil fuels, as the demand for energy rapidly increases today. This situation emphasizes the importance of renewable energy and sustainability issues. Renewable energy sources such as solar, wind, hydroelectric, biomass and geothermal have a significant potential in meeting the energy demand. The utilization of these sources can enhance the energy security while they are reducing environmental impacts. The appropriate site selection decisions become crucial with the increasing demand for renewable energy sources. The Analytic Hierarchy Process (AHP) which is a Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) method is preferred often as the effective tool in this process. The main aim of the study is to make a suitability analysis for the site selection of solar power plants (SPP). In this context, the spatial analyses for Denizli city is made using Geographic Information Systems (GIS) and AHP tools. Based on the expert opinions and related literature research, appropriate site selection criteria for solar power plants are determined. In addition, spatial and non-spatial data belonging to the study area are transferred to the GIS environment and analysis studies related to the study area are carried

*Yüksek Lisans Öğrencisi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şehir ve Bölge Planlama Anabilim Dalı, DENİZLİ.
e-posta: sametanrikulu@gmail.com, (<https://orcid.org/0000-0003-0734-7296>)

**Doç. Dr., Pamukkale Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Şehir ve Bölge Planlama Bölümü, DENİZLİ.
e-posta: npartigoc@pau.edu.tr, (<https://orcid.org/0000-0002-9905-2761>)

out. According to the findings, it is concluded that totally 44.579 hectares of land are highly suitable for SPP installation, totally 619.595 hectares are moderately suitable and totally 530.922 hectares are not suitable in Denizli Province.

Keywords: *Renewable Energy Sources, Solar Energy Investments, Sustainability, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Analytic Hierarchy Process (AHP), Geographic Information System (GIS).*

1. GİRİŞ

İnsanoğlu tarih boyunca enerjiye olan ihtiyacını karşılamak için sürekli çaba sarf etmiştir. Enerji, toplumların gelişmesi, teknolojik ilerlemenin sağlanması, endüstriyel faaliyetlerin gerçekleştirilmesi ve günlük yaşamın sürdürülmesi için vazgeçilmez bir unsurdur. Enerji, hayatı kolaylaştırmak, hareket etmek, ısınmak, aydınlanmak, ulaşım sağlamak ve iletişim kurmak gibi temel ihtiyaçlarını karşılamada çok büyük bir role sahiptir. 19. yüzyılın ikinci yarısına kadar geçen dönemde insanlar enerji ihtiyaçlarını doğal kaynaklardan sağlamaktaydı. Bu ihtiyaçların giderilmesi için odun, kömür ve su gücü başlıca kaynaklar olmuşlardır (Erdoğan 2020:301).

Sanayi Devrimi ile birlikte enerji talebi büyük ölçüde artmış olup; yenilenebilir enerji kaynakları bu talebi karşılamada yetersiz kalmıştır. Bu sebeple, 20. yüzyılın başlangıcından itibaren fosil yakıtların kullanımı enerji sektöründe devrim niteliği taşımaktadır. Petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil yakıtlar, yüksek enerji yoğunluğu ve kolay erişilebilirlikleri nedeniyle büyük talep görmüşlerdir. Fosil yakıtlar sanayileşme sürecini hızlandırmış ve modern toplumların enerji ihtiyaçlarını karşılamada büyük bir rol oynamıştır (Önal, 2020:92). Ancak, fosil yakıtların yoğun biçimde kullanılması önemli çevresel sorunların ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Fosil yakıtların yanması sonucu atmosfere salınan sera gazları, küresel iklim değişikliği gibi ciddi etkilere neden olmaktadır. Ayrıca, fosil yakıtların sınırlı kaynaklar olması ve jeopolitik sorunlara yol açması da enerji arayışında alternatif çözümleri gündeme getirmiştir. Bu noktada, yenilenebilir enerji kaynakları önemli bir çözüm sunmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları doğal süreçlerle sürekli olarak yenilenebilir kaynaklardır. Bu kaynaklar, temiz, sınırsız ve çevre dostu enerji üretme potansiyeline sahiptir. Yenilenebilir enerji teknolojileri gelişimi, maliyet düşüşleri ve verimlilik artışlarıyla birlikte dünya çapında giderek daha da ilgi çekici hale gelmiştir. Bu teknolojiler, enerji sektöründeki dönüşüm için önemli bir potansiyele sahiptir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımlar, enerji güvenliği sağlamada, ekonomik kalkınmada ve çevresel sürdürülebilirlikte önemli bir role sahiptir (Öymen, 2020:1085)

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında yer alan güneş enerjisi, yaygın kullanılan ve genelde yüksek potansiyele sahip yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Ayrıca, bilinmektedir ki, bu enerji türü elektrik ve ısı gibi farklı formlarda kullanılabilir. Güneş enerjisi, çevre dostu, sınırsız ve temiz bir enerji kaynağı olarak büyük önem taşımaktadır. Her gün dünyaya ulaşan güneş ışığı, potansiyel olarak büyük miktarda enerji içermektedir. Güneş enerjisi çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajlardan en önemlisi, güneş enerjisi kaynağının sınırsız olmasıdır. Başka bir deyişle, güneş var olduğu sürece güneş enerjisi kaynağı kullanılmaya devam edebilecektir. Ayrıca, güneş enerjisi temiz bir enerji kaynağıdır. Bu gibi fırsatlar ülkeler için enerji güvenliği sağlamak ve enerji talebinin karşılanmasını sürdürülebilir hale getirmek için büyük bir potansiyeli işaret etmektedir. Güneş panelleri tarafından üretilen elektrik enerjisi, fosil yakıtlardan elde edilen enerjiye göre çok daha az çevresel etkiye sahiptir. Bu da iklim değişikliğiyle mücadele ve çevre sağlığının korunması açısından önemli bir avantajdır (Güney, 2019:389).

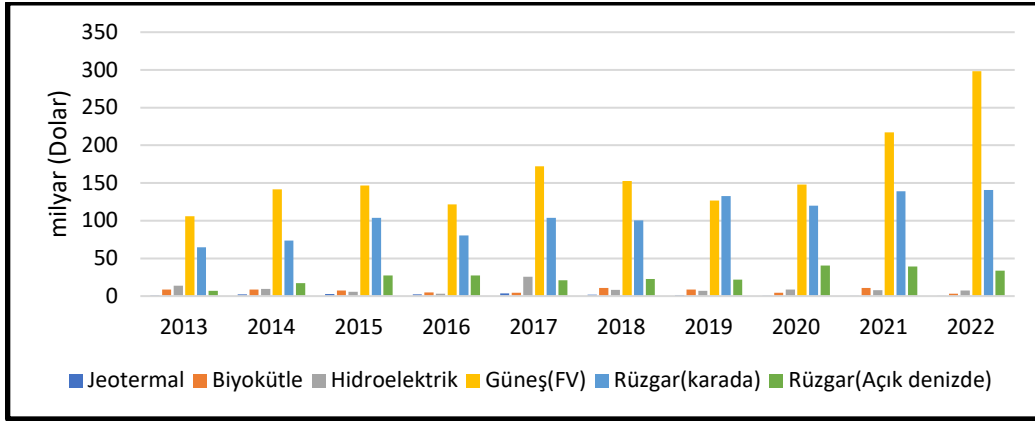
Bu bilgiler ışığında, çalışmanın amacı Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) araçlarını birlikte kullanarak Denizli ilinde güneş enerji santrallerinin (GES) yer seçimi için uygunluk analizinin yapılması olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, Denizli iline ilişkin mekânsal ve mekânsal olmayan veriler CBS ortamına aktararak alana ilişkin analizler yapılmış, uzman görüşleri ve ilgili literatür araştırmasından yola çıkılarak, güneş enerji santralleri için uygun yer seçimi kriterleri ortaya konulmuştur. Mekânsal ve mekânsal olmayan analizler sonucunda yapılan değerlendirmeler, yenilenebilir enerji yatırımları için kentsel nitelik taşıyan alanlarda hangi bölgelerin uygun olduğunu belirlemek adına karar vericiler için önemli bir politika rehberi niteliği taşımaktadır.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Yeryüzünde var olan ve 'yenilenemez kaynak' niteliği taşıyan petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil kaynakların kontrolsüz nüfus artışı ve buna paralel olarak artan kentleşme ve endüstrileşme faaliyetleri nedeniyle hızlı bir şekilde azalması beklenmektedir. Bu öngöründen yola çıkılarak denilebilir ki, yenilenebilir kaynak varlığına sahip ülkelerde önceliklendirilen yenilenebilir enerji yatırımları mevcut nüfusun enerji ihtiyacının karşılanması bakımından büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında uluslararası ve ulusal düzeyde gündem oluşturan yenilenebilir enerji yatırımlarına ilişkin kavramsal çerçeve incelenmiş ve uygulama örnekleri ortaya konulmuştur.

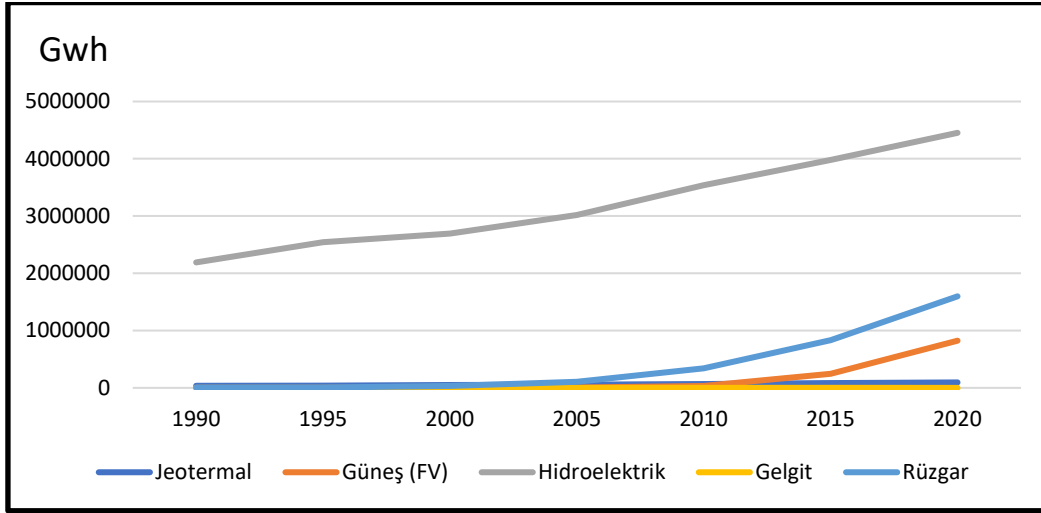
2.1. Dünyada Yenilenebilir Enerji Yatırımları

Dünya çapında enerji sektöründe büyük bir dönüşüm yaşanmaktadır. Fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmaya çalışılması ve sürdürülebilir bir enerji geleceği için artan bir ilgi, yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasına yol açmıştır. 20. yüzyılın ortalarından itibaren, dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve yatırımlar artmıştır. Uluslararası Enerji Ajansının verilerine göre, 2021 – 2023 yılları arasında enerji yatırımlarında yenilenebilir enerji kaynakları %24 oranında, fosil yakıtlar ise %15 oranında bir artış göstermiştir. Tahminlere göre, 2023 yılında enerjiye olan yatırımların 2,8 trilyon Amerikan dolarını bulması beklenmektedir. Bu tutarın 1,7 trilyonu yenilenebilir enerji kaynaklarına, enerji depolama sistemlerine, nükleer enerjiye ve düşük emisyonlu yakıtlara harcanacaktır (World Energy Investments, 2023, <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>). Yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yatırımların artmasının belli başlı sebepleri bulunmaktadır: (a) Fosil yakıtların fiyatlarının farklı sebeplerden dolayı çok değişken durumda olması ve bu kaynakların artık tükeneceğinin bilinmesi (Yıldırım ve Nuri, 2018), (b) ABD, Çin, Avrupa Birliği ve Japonya'nın artan politika destekleri ve girişimcilere sağladığı fırsatlar ve (c) ithalata bağımlı ülkelerin enerji güvenliğini sağlama çabası ve iklim değişikliği hedeflerini yakalama çabası. Güneş ve rüzgâr enerjileri 2013 - 2022 yılları arasında, yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların büyük bir çoğunluğunda pay sahibidir (Şekil 1). Güneş ve rüzgâr enerjisinin diğer yenilenebilir enerji teknolojilerine göre daha cazip olmasının nedenleri arasında verimlilik artışı, teknolojik gelişmeler ve maliyetlerinde sürekli düşüşler sayılabilir. Bunun kısmen nedeni, bu teknolojilere, diğer teknolojilere olduğundan kıyasla daha fazla politika desteği verilmesidir (World Energy Investments, 2023, <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>).



Şekil 1: Yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlar

(Kaynak: IRENA, 2023)



Şekil 2: Kaynaklara göre yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi

(Kaynak: IEA Data Services, 2023)

Dünya genelinde, yenilenebilir enerjiden elde edilen enerjinin en büyük payı hidroelektrik enerjiden gelmektedir. Bunun yanı sıra, rüzgâr enerjisi de önemli bir yenilenebilir enerji kaynağıdır ve küresel enerji üretiminde giderek daha fazla paya sahiptir. Diğer önemli yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, biyokütle enerjisi ve jeotermal enerji yer almaktadır (Şekil 2). Ancak, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım oranları ülkelere ve bölgelere göre farklılık gösterir. Örneğin, bazı ülkeler hidroelektrik enerjiye daha fazla yatırım yaparken, diğerleri rüzgâr enerjisine veya güneş enerjisine odaklanmaktadır. Bu nedenle, dünyadaki yenilenebilir enerji dağılımı bölgesel ve ülkesel faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterebilir (World Energy Investments, 2023, <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>).

Jeotermal enerji, yer altındaki sıcak su ve buharın enerji üretimi için kullanılmasıdır. Jeotermal kaynaklar, volkanik bölgelerde ve tektonik plaka sınırlarında yoğunlaşmıştır. Bu kaynaklar, elektrik enerjisi üretimi, ısıtma ve soğutma sistemleri için kullanılabilir (Barbier, 2002: 55). Dünya çapında bu enerji kaynağına olan ilgi büyüktür ve bu enerji kaynağına olan yatırımlar artmaktadır. Özellikle, bazı ülkeler jeotermal enerjiyi enerji portföylerinin önemli bir parçası haline getirmiştir. Bu ülkeler arasında öncü olanlar ABD, Endonezya, Filipinler, Türkiye ve Yeni Zelanda'dır. Bu ülkelerdeki jeotermal enerji yatırımları, elektrik üretimi ve ısıtma / soğutma sistemlerinde önemli bir paya sahiptir. Biyokütle enerjisi, biyolojik kaynaklardan (bitkiler, tarımsal atıklar, ahşap, organik atıklar vb.) elde edilen enerjidir. Bu enerji kaynağı, biyokütle yakıtlarının yanması veya biyokimyasal süreçlerle elde etmektedir. Biyokütle enerjisi, elektrik üretimi, ısıtma ve soğutma, yakıt ve biyokimyasal üretim gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Koç ve Kaya, 2015:40). Biyokütle enerjisine önemli yatırımlar yapan ülkelere Çin, dünyanın önde gelen sıvı biyoyakıt, katı biyoyakıt ve biyogaz üreticilerinden biridir. Çin'den sonra diğer ülkeler arasında ABD, Brezilya, Almanya ve Birleşik Krallık önde gelmektedir.

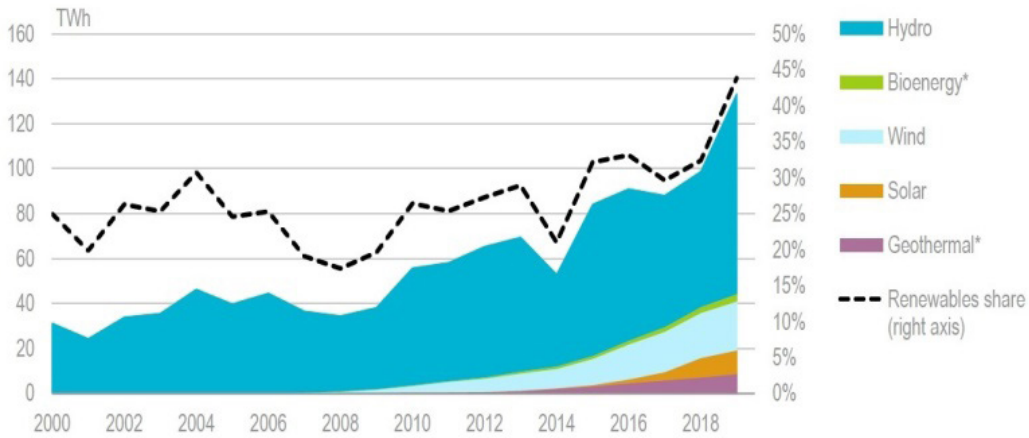
Dünya genelinde en yaygın kullanılan ve en büyük yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi de hidroelektrik enerjidir. Bu enerji kaynağı, suyun potansiyel enerjisini kinetik enerjiye dönüştürür ve elektrik enerjisi üretimi sağlar (Koç ve Kaya, 2015:45). Hidroelektrik ve biyokütle rüzgâr ve güneş enerjisinden sonra en çok payı alan enerji türüdür. Özellikle yoğun nüfus ve ekonomik büyüme bakımından öne çıkan ülkelerin hidroelektrik enerji kullanımına öncelik verdiği görülmektedir. Bu ülkeler arasında Çin, Brezilya, Kanada, ABD ve Rusya sayılabilir. Ayrıca, bu ülkeler, hidroelektrik santralleri aracılığıyla büyük miktarlarda elektrik enerjisi üretmektedirler. Dünya çapında rüzgâr enerjisi yatırımları oldukça artmıştır. Birçok ülke, rüzgâr enerjisine odaklanarak enerji üretimini çeşitlendirmek, fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltmak ve çevreye daha dost bir enerji kaynağı kullanmak için büyük yatırımlar yapmaktadır (Moriarty ve Honnery, 2022:51). 2020 yılında rüzgâr enerjisine yapılan yatırımların toplamı 161 milyar dolar olarak gerçekleşti ve bu, 2019'a göre %4'lük bir artışı temsil etmektedir. Çin, dünyanın en büyük rüzgâr enerjisi üreticisi ve yatırımcısı konumundadır. Çin'deki rüzgâr enerjisi kapasitesi sürekli olarak artmaktadır ve ülke, hedeflerine ulaşmak için büyük bir rüzgâr enerjisi programı yürütmektedir. Ayrıca, ABD,

Almanya, Birleşik Krallık ve Hindistan gibi ülkeler de önemli rüzgâr enerjisi yatırımlarına sahiptir (IRENA, 2023, <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023>). Güneş enerjisi, güneşten elde edilen ışık ve ısı enerjisini kullanarak elektrik ve ısı üretimi sağlayan bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Güneş, sonsuz bir kaynak olduğundan ve temiz bir enerji formu olduğundan, dünya genelinde giderek daha fazla ilgi görmektedir. Birçok ülke, güneş enerjisine yatırım yaparak sürdürülebilir enerji dönüşümüne yönelik adımlar atmaktadır. Güneş enerjisine olan yatırımlar 2019 yılında %11'lik bir artış göstererek 2020 yılında 162 milyar dolarlık bir değere ulaşmıştır. En çok yatırımın yapıldığı güneş enerjisi 2021 yılında 226 milyar dolar ve 2022 yılında 308 milyar dolarlık yatırım olarak 2020 yılından beri liderliğini sürdürmektedir (IRENA, 2023, <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023>). Güneş enerjisinden elektrik üretiminde lider ülkeler Çin, ABD, Japonya, Hindistan ve Almanya'dır.

2.2. Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Yatırımları

Türkiye de yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımlarda önemli bir artış görülmektedir. Enerji politikaları, enerji arzının çeşitlendirilmesi ve sürdürülebilir enerji kullanımının teşvik edilmesi amacıyla yenilenebilir enerjiye yönelik ciddi adımlar atılmaktadır. Bu da enerji üreticileri ve yatırımcılar için cazip bir ortam oluşturmuş ve yenilenebilir enerji sektörüne olan ilgiyi artırmıştır. Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek ve çeşitlilik geniştir. Rüzgâr, güneş, hidroelektrik, jeotermal ve biyokütle enerjisi gibi çeşitli yenilenebilir enerji kaynakları ülkenin enerji ihtiyaçlarını karşılamak için büyük bir potansiyele sahiptir. Bu kaynaklar, temiz ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlarken aynı zamanda çevresel etkileri azaltmaya da yardımcı olmaktadır.

Son on yıllarda Türkiye'de yenilenebilir enerji tüketimi önemli ölçüde artmıştır ve bu artışta özellikle hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjisi kaynakları etkili olmuştur. 2018 yılında, yenilenebilir elektrik toplam nihai enerji tüketiminin % 60'ını oluşturmuştur (IEA Energy policy review, 2021, <https://www.iea.org/events/turkiye-2021-energy-policy-review>). Türkiye'de hidroelektrik enerjisi, yenilenebilir enerjiden elektrik üretiminde önde gelmektedir. Hidroelektrik enerji üretimi, hidrolojik koşullara bağlı olarak yüksek oranda yıllık değişimler gösterebilir. Hali hazırda inşa halinde olan projelere dayanarak, 2023 yılına kadar hidroelektrik kapasitesinin 32.000 MW'ye ulaşması beklenmektedir. Son yıllarda diğer kaynaklar, özellikle rüzgâr ve güneş enerjisi kapasiteleri, hızla artmıştır (Şekil 3). Türkiye de son yıllarda öne çıkan rüzgâr enerjisi santralleri (RES), hidroelektrikten sonra ikinci büyük enerji türüdür. 2009 yılında 1,5 Twh enerji üretimi kapasitesine sahip olan rüzgâr, 2019 yılında bu oranı 21,8 Twh'ye yükseltmiştir. Rüzgâr enerjisi 2019 yılında toplam enerji üretiminin % 7,2'sini oluşturmuştur. Güneş enerjisi 2019 yılında toplam elektrik üretiminin % 3,5'ini, jeotermal enerji % 2,9'unu ve biyoenerji ise toplam üretimin %1.1'ini oluşturmuştur. Biyoenerji ve jeotermal 2016 ve 2019 yılları arasında toplam üretimini yaklaşık 3 katına çıkartmıştır. Güneş enerjisi ise 2017 yılında 3,7 Twh enerji üretirken bu değeri 2018 yılında 10,6 Twh'ye yükseltmiş ve % 182 oranında bir büyüme elde etmiştir.



Şekil 3: Kaynağına göre yenilenebilir enerjiden elektrik üretimi

(Kaynak: IEA Data Services, 2023)

Türkiye'nin yenilenebilir enerji yatırımları ve politikaları, enerji güvenliğini artırma, çevreyi koruma, sürdürülebilir kalkınma hedeflerini destekleme ve ekonomik büyümeyi teşvik etme gibi önemli faydalar sağlamaktadır. Aynı zamanda, yenilenebilir enerji sektörü, yeni iş imkânları yaratmakta, teknolojik gelişmeleri desteklemekte ve yerli enerji kaynaklarının kullanımını artırmaktadır. Gelecekte, Türkiye'nin yenilenebilir enerji yatırımlarının daha da artması ve enerji dönüşümünün hızlanması beklenmektedir. Yatırımların devam etmesiyle birlikte, Türkiye'nin enerji alanında bağımsızlığını sağlayabilmesi, çevresel sürdürülebilirliği sağlayabilmesi ve ekonomik kalkınmayı destekleyecek nitelikte yenilenebilir enerji sektörüne sahip olması öngörülmektedir.

2.3. Denizli İlinde Yenilenebilir Enerji Yatırımları

Denizli ili, Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyeli yüksek illerinden biridir. İlin coğrafi konumu ve iklim özellikleri farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına uygun bir ortam sağlamaktadır. Lisanslı Elektrik Üretim Dağılımı verileri, il genelinde enerji üretimi konusunda farklı kaynakların kullanıldığını ortaya koymaktadır. Mevcut üretim miktarları göz önünde bulundurulduğunda, hidroelektrik santralleri % 11'lik paya sahipken, jeotermal enerji üretim tesisleri % 18'lik paya sahip olduğu görülmektedir. Termik santraller, üretilen enerjinin büyük bir kısmını (% 70 oranında) oluşturmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi üretimi ise oldukça düşük seviyelerdedir, toplam enerji üretim miktarında ise payları çok küçüktür.

Tesis Türü	Tesis Sayısı	İşletmedeki Kapasite (MW)	İnşa Halindeki Kapasite (MW)	Toplam Kurulu Güç (MW)	İşletme Kapasitesinin Toplam içindeki oranı
Biyokütle	1	0,635	0	0,635	%0
Güneş	1	10	0	10	%1
Rüzgâr	1	0	66	66	%0
Jeotermal	8	296,257	5,52	301,777	%18
Termik	10	1.133,244	3,25	1.136,494	%70
Hidroelektrik	15	180,664	7,068	187,732	%11
Toplam	36	1.620,8	81,838	1.702,638	%100

Şekil 4: Denizli ilindeki lisanslı elektrik üretim dağılımı

(Kaynak: Denizli Büyükşehir Belediyesi, 2019)

Denizli ili, Türkiye'de güneş enerjisi potansiyeli yüksek olan illerden biridir. Coğrafi konumu ve iklim şartları, güneş enerjisi projeleri için elverişli bir ortam sunmaktadır. GEPA verilerine göre Denizli ili, ortalama olarak yılda 1.550-1.650 kWh/m² civarında güneş radyasyonu almaktadır. Güneşlenme süresi yaz aylarında yaklaşık olarak 12 saat olurken, kış aylarında 2 saatin üzerindedir. İl, coğrafi koşulları sebebiyle rüzgâr enerjisi potansiyeli bakımından düşük verimliliğe sahiptir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü'nün yapmış olduğu çalışmaya göre, Denizli ili genelinde 50 metrede en fazla rüzgâr hızı 6,5 m/s'yi bulmaktadır. Rüzgâr enerjisi kurulabilecek alanların düşük potansiyelde olması ili farklı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. İlde kurulabilecek rüzgâr enerjisi potansiyeli 238,56 MW olarak tespit edilmiştir. Ancak ilde kurulu herhangi bir rüzgâr enerji santrali yoktur.

Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan biyokütle enerjisi potansiyeli atlasına göre, il bütününde tarımsal atıkların toplam miktarı 2 milyon ton ve hayvansal atıkların toplam miktarı ise 2,9 milyon ton olarak belirlenmiştir. Bu atıkların tamamı enerji veya elektrik üretimi için kullanıldığında, bitkisel atıkların enerjiye dönüştürülebilir potansiyeli 1.12 MW ve hayvansal atıkların enerjiye dönüştürülebilir potansiyeli ise 29 MW olarak hesaplanmaktadır. Mevcut durumda ilde lisanslı olarak faaliyet gösteren bir adet biyogaz elektrik üretim tesisi bulunmaktadır. Bu tesisin kapasitesi 0,65 MW'dir. Jeotermal kaynakları açısından enerji ve elektrik üretimi bakımından oldukça değerli bir bölgede bulunan Denizli ilinde, özellikle Büyük Menderes Grabeni (Aydın-Ortaklar ile Denizli-Sarayköy arasındaki alan), MTA tarafından yüksek jeotermal kaynak potansiyeline sahip olarak belirlenmiştir. Denizli'de bulunan 8 adet jeotermal elektrik santrali, tamamıyla Sarayköy ilçesinde yer almaktadır ve ildeki toplam elektrik üretiminin %18'ini sağlamaktadır.

Çalışma alanı olarak seçilen il, yıl boyunca yoğun güneşlenme süresine sahip bir bölge niteliği taşımaktadır. Bu nedenle, güneş enerjisi potansiyeli oldukça yüksektir. Ortalama olarak, yılda ortalama 1.550-1.650 kWh/m² civarında güneş radyasyonu alır. İlde bulunan güneş enerji santralleri, büyük ölçekli elektrik üretimi için kullanılan tesislerdir. İldeki güneş enerji santralleri toplamda megavat (MW) ölçeğindedir. Bu santraller, yüksek güneşlenme potansiyeli nedeniyle önemli miktarda elektrik üretmektedir. Şekil 5 (a) – 5 (h)'de ilde bulunan bazı güneş enerji santrali örnekleri sunulmuştur.



(a) Çivril İlçesi



(b) Çivril İlçesi



(c) Merkezefendi İlçesi



(d) Merkezefendi İlçesi



(e) Pamukkale İlçesi



(f) Pamukkale İlçesi



(g) Serinhisar İlçesi



(h) Serinhisar İlçesi

Şekil 5: Denizli ilinde yer alan bulunan güneş enerji santrali örnekleri (Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

2.4. Uygulama Örnekleri

Çalışma kapsamında, güneş enerjisi santrallerinin yer seçimine ilişkin ulusal ve uluslararası düzeyde akademik literatüre katkı sağlayan, ağırlıklı olarak Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) araçlarının tercih edildiği, mekânsal ve mekânsal olmayan analiz süreçlerinin yürütüldüğü uygulamalı çalışmalar incelenmiştir. İncelenen çalışmalar, çalışma yılı baz alınarak sıralanmış ve detaylı biçimde aktarılmıştır.

Carrion vd. (2008), çalışmalarında İspanya'nın Granada ilinin Huéscar bölgesinde fotovoltaik güneş enerji santrallerinin yer seçimini yapmak için CBS ve AHS metodu tabanlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada çevre, iklim, orografi ve konum kriterleri dikkate alınmıştır. Güneş enerji tesisinin performansı açısından en önemli kriterin iklim kriteri olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca katmanlandırma yöntemi kullanılarak GES kurulumuna uygun alanlar sonuç haritasında en uygundan, uygun olmayan alana göre sınıflandırılmıştır (Carrion vd., 2008:2370).

Şener vd. (2010), çalışmalarında Konya ve Isparta illerini kapsayan Beyşehir Gölü havzası alanında katı atık bertarafı için depolama sahası seçmeyi amaçlamışlardır. Bu kapsamda tatlı su ve içme suyu olan bu alan korunması hedeflenmiştir. Belirlenecek alan sosyal, çevresel, teknik parametrelere bağlı olduğu için Çok Kriterli Karar Verme metodlarından Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) birleştirilerek uygun alanlar sınıflara ayrılmış ve haritalanmıştır (Şener vd., 2010:2038).

Vandevyvere vd. (2012) çalışmalarında yenilenebilir enerji geleceğinin planlanmasına tasarımcı gözünden bir bakış açısıyla yaklaşmaktadır. Planlama sorunlarının analizi için teknik çevre yönü ve sürdürülebilir kalkınma kavramları araştırılmıştır. Kentsel gelişim sorunlarının üstesinden gelmek için disiplinler arası bir çalışma yapılması gerektiği ayrıca sürdürülebilir planların sosyal, kültürel, ekonomik, hukuki, politik ve etik alanlarda bağlantısının bulunması gerektiğine değinilmiştir (Vandevyvere vd., 2012:1310).

Keirstead vd. (2012) tarafından çalışmalarında aktardıkları üzere, günümüz nüfusunun %50'sinin kentlerde yaşaması ve bu oranın ilerleyen yıllarda giderek artması beklenmektedir. Bu durum enerji tüketiminde de bir artışa sebep olacaktır. Bu makalede kentsel enerji sistemi modeline tanım önerisi yapılmış ve güncel uygulamanın durumu değerlendirilmiştir. Teknolojik tasarım, bina tasarımı, kentsel iklim, sistem tasarımı, politika değerlendirilmesi, arazi kullanımı ve ulaşım modellemesi gibi alanlar bu çalışmada incelenmiştir (Keirstead vd., 2012:3850).

Aydın vd. (2013), çalışmalarında Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metodlarını kullanarak Türkiye'nin güney batısında (Aydın, Denizli, Uşak, Burdur, Muğla illerini kapsayan) hibrit güneş ve rüzgâr enerjilerinin yer seçimini CBS ortamında yapmayı amaçlamıştır. Ekolojik alanlar, Havaalanları, Şehir merkezleri, kuş göç yolları, gürültü, sulak alanlar, kıyı şeritleri, doğal rezervler, tarımsal alanlar gibi kriterler için kısıtlayıcı mesafeler oluşturulmuştur. Yer seçimi için Eğim, iletim hatlarına yakınlık, ana yollara yakınlık, güneş radyasyonu, rüzgâr hızı, şehre mesafe gibi kriterler analizde kullanılmıştır. Çalışma sonunda sonuç haritası oluşturulmuş ve güneş-rüzgâr hibrit santrali için uygun alanlar haritada belirtilmiştir (Aydın vd., 2013:95).

Uyan (2013), Karapınar bölgesindeki (Konya/Türkiye) güneş enerji santralleri için yer seçimi yapmak amacıyla AHS yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmayı ele almıştır. Bölgedeki uygun alanları belirlemek ve potansiyel güneş enerjisi üretimi için en uygun bölgeleri tespit etmek için CBS yöntemlerini kullanmıştır. Çalışmanın sonuçlarına göre, en uygun alanlar, bölgedeki en yüksek güneş ışınımı alan bölgeler ve yerleşim yerlerinden uzak bölgeler olarak belirlenmiştir (Uyan, 2013:15).

Owusu vd. (2016), yenilenebilir enerji kaynaklarının sürdürülebilir olup olmadığını incelemiş ve fosil yakıtlardan yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin iklim değişikliği üzerinde nasıl bir etkisinin olacağını araştırmayı hedeflemişlerdir. Enerjinin sürdürülebilir olması için ve yenilenebilir enerji sektörünün teknolojik açıdan gelişmesi için gerekli politikaların üretilmesi gerektiği ayrıca iklim değişikliğine karşı eğitimsel ve bilinçlendirici yayınların oluşturulması önerileri verilmiştir (Owusu vd., 2016:3).

Uyan (2016), çalışmasında enerjinin sürdürülebilir kalkınma bakımından önemli bir unsur olduğundan, fosil yakıt ve yenilenebilir enerji türlerinden, fosil yakıtların çevreye olan etkilerinden, yenilenebilir enerji kaynaklarının çevreye olan etkilerinden bahsetmektedir. Çalışma amacı Konya İli Çumra İlçesinde güneş enerjisi santrali

kurulabilecek alanların CBS ve AHP yöntemleri kullanılarak belirlenmesidir. Bu çalışmada kullanılan ölçütler; yerleşim alanlarından uzaklık, arazi kullanımı, eğim, trafo merkezine uzaklık, iletim hatlarından uzaklık, yol ve demiryolundan uzaklıktır. Daha sonra bu veriler analiz edilerek Çumra İlçesi uygunluk haritası oluşturulmuştur (Uyan, 2016:15).

Garni ve Awasthi (2017) tarafından Suudi Arabistan'da yapılan bu çalışmanın amacı CBS ve ÇKKV teknikleri kullanarak fotovoltaik güneş panelleri için yer seçimi yapmaktır. Tesis kurulumunda düşük maliyeti yakalamak ve maksimum verimliliğe ulaşmak için yer seçim kriterleri belirlenmiştir. Yer seçim kriterlerinin kendi aralarında karşılaştırılması AHS metodu ile yapılmıştır. Sonuç ürünü 5 adet sınıfa ayrılarak en az uygundan en uyguna doğru sıralanmıştır. Çalışma alanının %16'sının panel kurulumu için uygun olduğu sonucuna varılmıştır (Garni ve Awasthi, 2017:1235).

Sindhu vd. (2017), Hindistan'ın Haryana eyaletine ilişkin yaptıkları çalışmada ÇKKV tekniklerinden AHP ve TOPSIS metotları kullanılarak GES kurulumuna en uygun alanın seçilmesini hedeflemişlerdir. Ayrıca uygun GES alanlarının seçiminde, karar vericilere kolaylık sağlanması amaçlanmıştır. Çalışma sonunda GES kurulumuna en uygun yerin Sonapat şehri olduğu sonucuna varılmıştır (Sindhu vd., 2017:500).

Merrouni vd. (2017), çalışmalarında Doğu Fas'a kurulacak olan büyük ölçekli güneş santralleri için yer seçimi yapmayı amaçlamışlardır. Çalışmada belirlenen önemli hedeflerden biri yenilenebilir enerji kullanımı ile sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlamaktır. CBS ve AHS araçlarından çalışmada yararlanılmıştır. İklim, konum, su kaynağı ve orografi kriterleri çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir. Analiz sonucunda iklim kriterinin diğer seçeneklere göre daha önemli olduğu anlaşılmıştır. Seçilen kriterlere ve kısıtlara göre uygunluk haritası sonuç ürünü olarak sunulmuştur (Merrouni vd., 2017:870).

Gielen vd. (2019), küresel ölçekte sürdürülebilir kalkınmanın sağlanabilmesi amacıyla geçmiş dönemlerden günümüze kadar geçen süreçte tercih edilen enerji türlerine ilişkin kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Bu kapsamda, ülkelerin günümüz tarihinden 2050 yılına kadar olan hedeflerini incelemiş olup, iklim değişikliğinin yarattığı olumsuz etkilerin yenilenebilir enerji ile azaltılabileceği yorumu yapılmıştır. Dünya ülkelerinin politikalarını oluştururken enerji geçişini hızlandırmaya yönelik kararlar alması ve enerji altyapılarını bu geçişe uyumlu hale getirmeleri gerektiğinden söz edilmiştir (Gielen vd., 2019:40).

Güney (2019), çalışmasında yenilenebilir enerji, yenilenemez enerji ve sürdürülebilir kalkınma arasındaki ilişkiyi incelemektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının, yenilenemez enerji kaynaklarına kıyasla daha sürdürülebilir bir enerji üretim sistemi oluşturduğunu vurgulanmıştır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının yoğunluğunun düşük olması, yüksek kapasiteli enerji depolama sistemlerine ihtiyaç duyması, verimliliğinin zaman zaman düşmesi gibi dezavantajlarının bulunduğu söz edilmiştir. Sürdürülebilir kalkınma için yenilenebilir enerji kaynaklarının yanı sıra yenilenemez enerji kaynaklarından da yararlanılması gerektiği sonucuna varılmıştır (Güney, 2019:389).

Colak vd. (2020), Türkiye'nin Malatya ilinde yapılan bu çalışmada güneş enerjisi santrali kurulacak optimum alanın belirlenmesi hedeflenmiştir. Yöntem olarak AHS ve CBS kullanılmıştır. Analiz sonucunda uygun alanları gösteren harita üretilmiş ve uygun yerler mevcutta kurulu olan güneş enerji santralleri ile karşılaştırılmıştır (Colak vd., 2020:565).

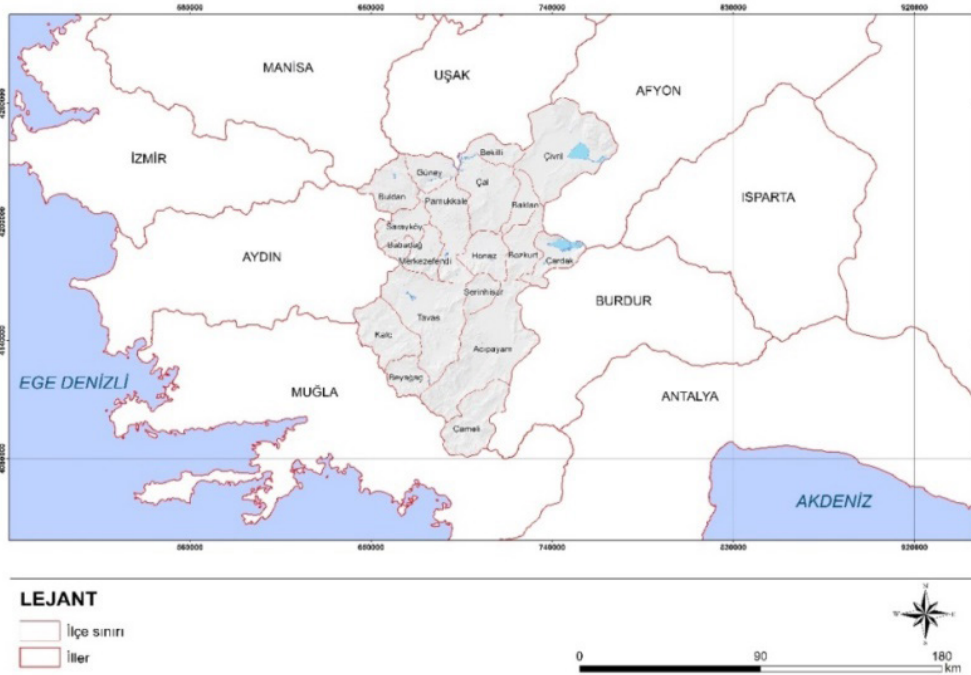
Sarsıcı (2020), bu çalışmanın amacı Karabük iline kurulacak güneş enerji santrallerinin yer tespitini yapmak, GES alanlarının çevresel etkileri ve GES teknolojileri hakkında bilgi vermek, Türkiye'nin sahip olduğu güneş enerji potansiyeli hakkında bilgi vermek ve ülkemizi küresel pazarda iyi bir konuma getirmektir. Güneş enerji santrallerinin kurulabileceği uygun yerleri belirlemek için AHS yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan ölçütler; güneşlenme potansiyeli, bakı, eğim, toprak sınıfları, arazi kullanım durumu, deprem fay hattı, heyelan risk durumu, trafo merkezleri, karayolu ve demiryolu ağı, akarsular, göletler, su kapanları, yerleşim alanlarıdır. Bu veriler CBS ortamında analiz edilerek Karabük İli uygunluk haritası oluşturulmuştur (Sarsıcı, 2020:100).

Wirth (2021), Bu çalışmada fosil kaynaklı enerji üretiminden ayrılacak olan ve sürdürülebilir bir gelecek yoluna giren Almanya'nın güneş enerjisi büyümesinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Fotovoltaik panellerin finansal yönleri, enerji verimliliği, çevresel faydaları, enerji talebine yeterliliği, afet riskleri, politika ve yasaları, kurulum alanları ve ülkenin yenilenebilir enerji kapasitesi hakkında bilgiler verilmiştir (Wirth, 2021:92).

Rahman vd. (2022), çalışmalarında GZFT analizi kullanılarak yenilenebilir enerji kaynaklarının çevreye olan etkisini araştırmak istemişlerdir. Çalışma sonunda yenilenebilir enerji kaynaklarının yer seçiminin son derece önemli olduğuna değinilmiş yanlış yer seçimlerinin iklimsel afetlere, doğal yaşamın zarar görmesine sebep olacağı belirtilmiştir. Ayrıca diğer yenilenebilir enerji kaynağı türlerine göre çevreyi en çok etkileyen enerji türünün hidroelektrik enerji olduğu tespit edilmiştir (Rahman vd., 2022:161).

3. ÇALIŞMA ALANI, VERİ VE YÖNTEM

Çalışmanın yapıldığı Denizli ili $28^{\circ} 30' - 29^{\circ} 30'$ doğu meridyenleri ile $37^{\circ} 12' - 38^{\circ} 12'$ kuzey paralelleri arasında yer alır. Türkiye'nin batısında bulunan Denizli ili, coğrafi olarak, Ege Bölgesi'nin iç kesimlerinde yer almaktadır. Denizli'nin kuzeyinde Uşak ve Afyonkarahisar, doğusunda Burdur, güneyinde Muğla ve batısında Aydın illeri bulunmaktadır. Denizli ilinin yüzölçümü 12,134 kilometrekaredir, Türkiye'nin yaklaşık %1,5'ini ve Ege Bölgesi'nin %18,5'ini oluşturmaktadır ve oldukça dağlık bir yapıya sahiptir. Honaz Dağı, Karacı, Akdağ, Bozdağ, Eşeler, Bulkaz, Elmadağ, Büyük Çökelez ve Beşparmak Dağları ilde bulunan yüksek dağlardandır. İlin en yüksek dağı 2.571 metre yüksekliği ile Honaz Dağı'dır. İlin güneyinde yer alan bölgelerde Akdeniz iklimi hâkimdir. Diğer bölgelerde ise ılıman karasal iklim görülmektedir. Denizli'nin önemli akarsuları arasında Büyük Menderes, Acıpayam Çayı, Çivril Çayı ve Yuvarlak Çay yer almaktadır. İlde bulunan 44,32 km² ile en büyük göl Acıgöl'dür. Beylerli (Çaltı) Gölü, Karagöl, Süleymaniye Gölü, Kartal Gölü ve Işıklı Baraj Gölü ilde bulunan diğer önemli göller arasındadır. Yıllık ortalama yüksek sıcaklık 34°C ve ortalama düşük sıcaklık ise 2°C civarındadır. Ortalama güneşlenme süresi bakımından, Denizli ili (2934 saat/yıl) Türkiye ortalamasının (2640 saat/yıl) üstünde bir değere sahiptir. Ayrıca, il turizm açısından da oldukça önemli avantajlara sahiptir. İlin en ünlü turistik yerleri arasında Pamukkale Travertenleri, Hierapolis ve Laodikya antik kentleri, Denizli Kalesi ve Çamlık Milli Parkı yer almaktadır. Bunların yanı sıra tekstil ve pamuk üretimi açısından da Türkiye ekonomisine katkıda bulunmaktadır (Denizli Valiliği, 2022).



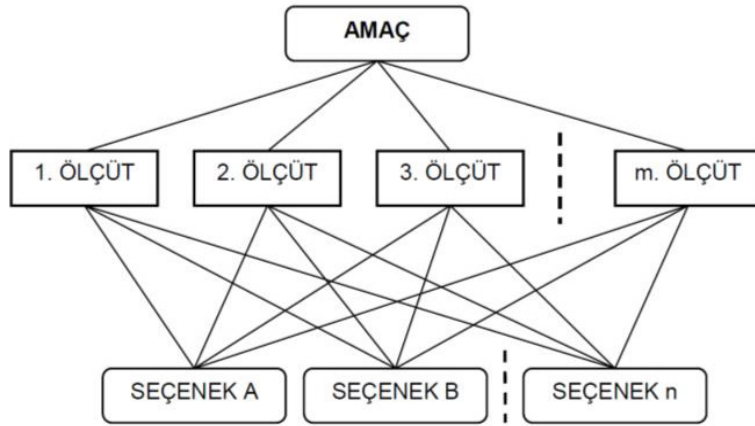
Şekil 6: Denizli ili ve çalışma alanı konumu

(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Çalışmanın yöntemine bakıldığında, Denizli iline kurulacak olan güneş enerji santralleri (GES) alanları için uygun yer seçimini yapmayı hedefleyen bu çalışmada Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) analizi yöntemlerinden biri olan ve karar verme problemlerinde etkin bir araç olarak kullanılan Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)'nden yararlanılmıştır. AHS yöntemi, Saaty tarafından 1980'li yıllarda ortaya konulan, temel olarak birden fazla kriter

sahip karar süreçlerinde kullanıcıya belirlenen kriterlerin önceliklerini belirlemede ve karar alma süreçlerinde yönlendirici bir uygulamadır. Bir başka deyişle, karmaşık boyutlu karar alma süreçlerinde kriterler arasında ikili karşılaştırmalar yaparak, hem öznel yargılara hem de nesnel gerçeklere göre sonuçların incelenmesine olanak tanıyan bir yöntemdir. Yöntemin çok ölçütlü bir sıralamaya dönüştürülebilmesi bakımından son derece esnek ve pek çok disiplinde kolaylıkla uygulanabilir bir model olduğu bilinmektedir (Saaty, 1987: 161).

AHS yöntemi, yapılan araştırmaların konusu gereği belirlenen her bir kriterin önemi hakkında hüküm verilmesini sağlamaktadır. Araştırmayı yürüten karar vericinin / vericilerin uzman görüşüne göre kriterler de karar alternatiflerine göre yapacağı tercihler de farklılık gösterebilir (Dağdeviren ve Eren, 2001:49; Özşahin, 2014:870). Şekil 7’de AHS yöntemine ilişkin şemaya, Tablo 1’de ise ikili karşılaştırmalarda sıklıkla kullanılan önem dereceleri skalasına yer verilmiştir. Buna ek olarak, Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yazılımlarından biri olan ArcGIS programından yararlanarak, GES alanları için uygun yer seçimi kriterlerinin ağırlıklarına göre analiz haritaları oluşturulmuş ve verileri birleştirme işlemleri yapılmıştır. Güneş enerji santrali yer seçiminde kullanılan kriterler literatür taramasına göre incelenmiş, farklı meslek dallarında faaliyet yürüten ve santral kurulumunda görev almış 8 adet uzman ile yüz yüze olacak biçimde sözlü görüşmeler yapılarak 9 adet yer seçimi kriterleri belirlenmiştir. Bu kriterler eğitim, baki, yükselti, sıcaklık, güneş radyasyonu, yerleşim yerlerine olan mesafe, yollara olan mesafe, enerji nakil hatlarına olan mesafe ve arazi kullanımı olarak belirlenmiştir (Bkz. Tablo 2). Kendi aralarında eşit biçimde ağırlıklandırılan yer seçim kriterlerinden yararlanılarak yapılan mekânsal ve mekânsal olmayan analizler sonucunda GES alanları için uygunluk haritası üretilmiştir.



Şekil 7: Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) yöntemi şeması

(Kaynak: Wang vd., 2008:520)

Tablo 1: Önem derecelerine ilişkin skala

Derecelendirme	Açıklamalar
1	I. ve II. kriter eşit derecede önemli
3	I. kriter II. kritere göre fazla önemli
5	I. kriter II. kritere göre daha fazla önemli
7	I. kriter II. kritere göre çok fazla önemli
2, 4, 6, 8	Ara (ortalama) değerler

(Kaynak: Saaty, 1987:170)

Karşılaştırmalı değerlendirmeler yapılması amacıyla faktör matrisinin oluşturulması ve önem derecelerinin belirlenmesinin ardından seçilen faktörlerin tutarlılık oranları hesaplanmıştır. AHP Template programından yararlanılan yöntemde tutarlılık oranı (CR), tutarlılık indeksi (CI) ve rastgele indeks (RI) hesaplanmıştır. Tutarlılık değerinin (CR) hesaplanması için kullanılan formüller şu şekildedir (Wind ve Saaty, 1980:650).

$$\text{Tutarlılık İndeksi (CI)} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0,103 \rightarrow \text{Çalışmada elde edilen CI Değeri} = \mathbf{0,103} \quad (1)$$

$$\text{Rassallık Oranı (RI)} = 1,45 \rightarrow n=4 \text{ için RI Değeri} = \mathbf{1,45} \quad (2)$$

$$\text{Tutarlılık Oranı (CR)} = \frac{\text{Tutarlılık İndeksi (CI)}}{\text{Rassallık Oranı (RI)}} = 0,071 \rightarrow \text{Çalışmada elde edilen CR Değeri} = \mathbf{0,071} \quad (3)$$

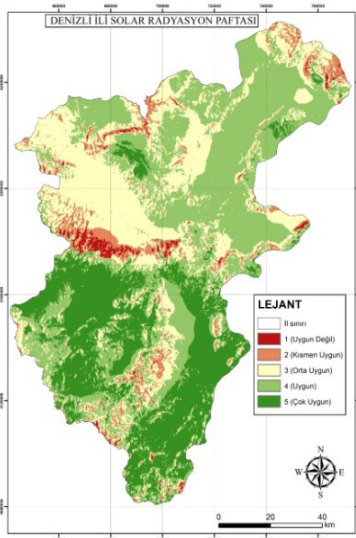
Tutarlılık oranı (CR), değerlendirmelerde tutarlılığın tespiti için belirlenen 0,10 değerine eşit veya daha küçükse ($0 < CR \text{ değeri} < 0,10$) oluşturulan matrisin tutarlı olduğu kabul edilir ve yapılan değerlendirmeleri yeniden gözden geçirmeye gerek yoktur. Elde edilen CR değeri belirlenen 0,10 değerinden büyükse ($CR \text{ değeri} > 0,10$) oluşturulan matrisin tutarlı olmadığı söylenebilir ve yapılan değerlendirmelerin yeniden gözden geçirilmesi gereklidir (Wind ve Saaty, 1987:651). Çalışma kapsamına elde edilen tutarlılık oranı ($CR = 0,071$), değerlendirmelerde tutarlılığın tespiti için belirlenen 0,10 değerinden daha küçük olduğu için karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu söylenebilir.

Tablo 2: Çalışmada kullanılan kriterler, alternatiflerin ağırlık değerleri

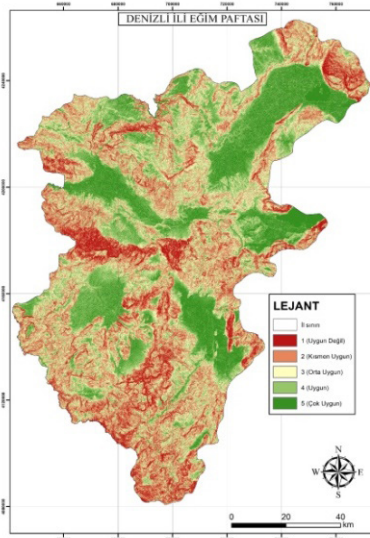
Kriterler	Değerler	Dereceler
Güneş Radyasyonu (k-Wh/m ² -yıl)	900 - 1629	Uygun değil
	1629 - 1778	Kısmen uygun
	1778-1865	Orta uygun
	1865-1937	Uygun
	1937-2130	Çok uygun
Yıllık Ortalama Sıcaklık (°C)	0-12	Uygun değil
	12-19	Orta uygun
	19-25	Çok uygun
İletim Hatlarına Uzaklık (m)	>4000	Uygun değil
	3000-4000	Kısmen uygun
	2000-3000	Orta uygun
	1000-2000	Uygun
	0-1000	Çok uygun
Yerleşim Alanlarına Uzaklık (m)	0-500	Uygun değil
	500-1000	Kısmen uygun
	1000-1500	Orta uygun
	1500-2000	Uygun
	>2000	Çok uygun
Yollara Olan Uzaklık (m)	0-100	Uygun değil
	100-500	Kısmen uygun
	500-1000	Orta uygun
	1000-2500	Uygun
	>2500	Çok uygun
Eğim (%)	>24	Uygun değil
	12-24	Kısmen uygun
	6-12	Orta uygun
	2-6	Uygun
	0-2	Çok uygun

Bakı	Kuzey, kuzeybatı, kuzeydoğu	Uygun değil
	Batı	Kısmen uygun
	Doğu	Uygun
	Güney, güneybatı, güneydoğu, düz alanlar	Çok uygun
Yükselti (m)	126-607	Uygun değil
	608-968	Kısmen uygun
	969-1260	Orta uygun
	1261-1610	Uygun
	1611-2520	Çok uygun
Arazi Kullanımı	Tarımsal alanlar	Uygun değil
	Çorak alanlar	Çok uygun

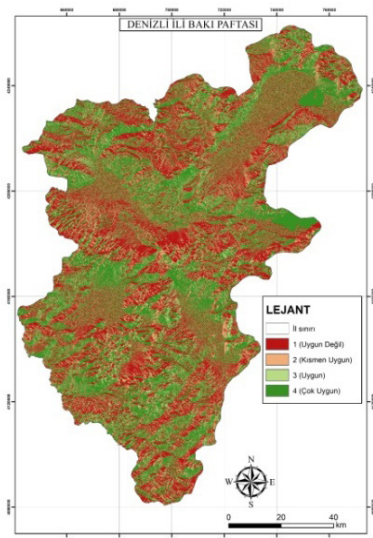
(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)



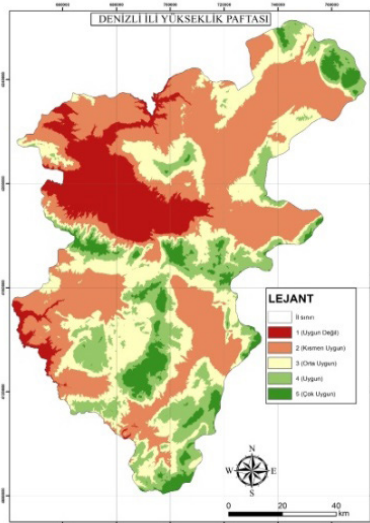
(a) Güneş Radyasyonu



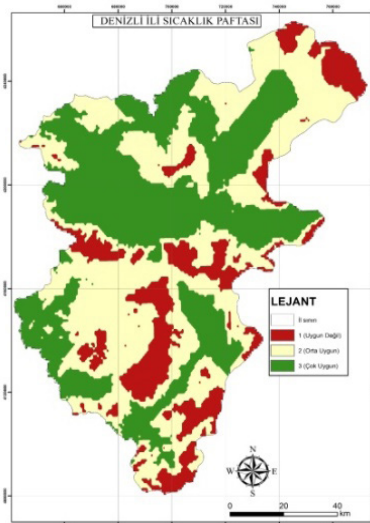
(b) Eğim



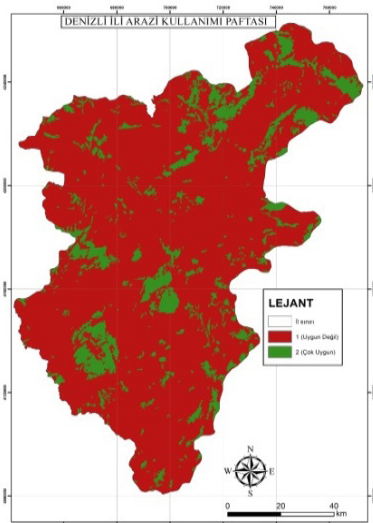
(c) Bakı



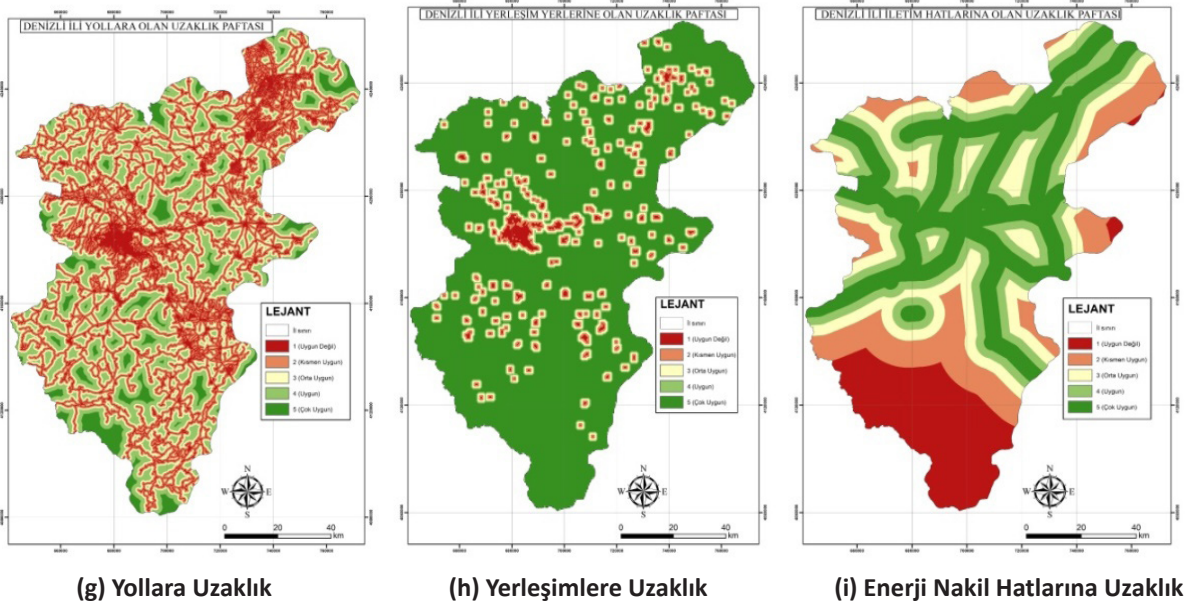
(d) Yükselti



(e) Sıcaklık



(f) Arazi Kullanım



Şekil 8: Çalışma kapsamında belirlenen kriterlere yönelik mekânsal analizler
(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Denizli ilinin güneş radyasyonu haritası incelendiğinde (Bkz. Şekil 8a), ilin güneyinde bulunan ilçelerin (Tavas, Kale, Çameli, Acıpayam, Serinhisar) güneş potansiyeli için çok uygun olduğu görülmektedir. İlin kuzey doğusunun da güneş radyasyonu açısından uygun değerini aldığı görülmektedir. İlin merkez ilçeleri (Pamukkale ve Merkezefendi) analize göre orta uygunlukta yer almaktadır.

Eğim haritası incelendiğinde (Bkz. Şekil 8b), yapılan analizde uygun eğim açısına sahip alanları 5 puan aldığını ve haritada çok uygun olarak gösterildiği görülmektedir. Analizde eğimin yüzdesel olarak arttığı bölgelerin dereceleri de düşmektedir. İlin Tavas, Acıpayam, Merkezefendi, Pamukkale, Çivril ve Baklan ilçelerinin genel olarak çoğu bölgesinin santral kurulumu için uygun aralıkta olduğu görülmektedir.

Arazi bakışı, güneş panellerinin performansı açısından önemli bir faktördür. Arazi bakışı, panellerin ne kadar güneş ışığına doğrudan maruz kalacağını etkiler ve bu da panelin ürettiği elektrik enerjisi miktarını belirlemede etkili olur. Çalışmada bakı 4 sınıfa ayrılmıştır. Haritada 4 değeri çok uygun alanları, 1 değeri ise uygun olmayan alanları ifade etmektedir. Kuzey, kuzeybatı, kuzeydoğu yönleri uygun değil derecesini alırken, düz alanlar, güney, güneybatı ve güneydoğu yönleri ise 4 değerini alıp çok uygun olarak gösterilmiştir (Bkz. Şekil 8c).

Yükselti, güneş panelleri için önemli bir faktördür çünkü santral konumunun yüksekliği, güneşe olan yakınlık ve güneş ışığının panel üzerine düşme açısı üzerinde doğrudan etkilidir. Yükseklik kriteri 5 adet sınıfa ayrılmıştır. 5 değeri çok uygun değerini alırken 1 değeri ise uygun değil değerini almıştır. Denizli ilinin dağlık bir yapıya sahip olmasından dolayı yükselti kriteri bu çalışmada önemli bir yere sahiptir (Bkz. Şekil 8d).

Çok düşük ve çok yüksek sıcaklıklar güneş panellerinin verimliliğini olumsuz yönde etkiler. Sıcaklık kriteri 3 sınıfa ayrılmıştır. 0-12 °C aralığı 1 değerini alıp uygun değil olarak gösterilmiş, 12-19 °C arası 2 değerini alıp orta uygun olarak gösterilmiş ve 19-25 °C aralığı ise 3 değerini alarak çok uygun olarak derecelendirilmiştir. Yüksek rakıma sahip bölgeler analiz haritasında 1 değerini almış, daha düşük rakımlı yerler (genellikle yerleşim bölgeleri) ise orta uygun ve çok uygun olarak gösterilmiştir.

Arazi kullanımı kriteri çalışmadaki en önemli kriterlerden birisidir (Bkz. Şekil 8e). Arazi kullanımı güneş enerji santrali kurulumu ve işletmesi aşamasında bakılması gereken ilk kriterlerdendir. Bu analiz haritasında tarım alanları, orman alanları, milli parklar, yerleşim alanları, maden sahaları gibi alanlar güneş enerji santrali kurulumu için uygun değildir olarak belirlenmiş ve 1 değeri ile ifade edilmiştir. Marjinal tarım arazileri ve mera arazileri ise çok uygun olarak belirlenmiş ve 2 değerini almıştır (Bkz. Şekil 8f).

Güneş enerji santrallerinin kurulumu ve bakımı için erişilebilirlik önemlidir. Yollara olan yakınlık, ekipman, malzeme ve personel taşımacılığını kolaylaştırır. Bu analizde yola yakınlık kriteri 5 sınıfa ayrılmış ve yola çok yakın alanlar uygun değil olarak belirtilirken yollardan biraz uzak mesafeye sahip alanlar çok uygun olarak derecelendirilmiştir (Bkz. Şekil 8g).

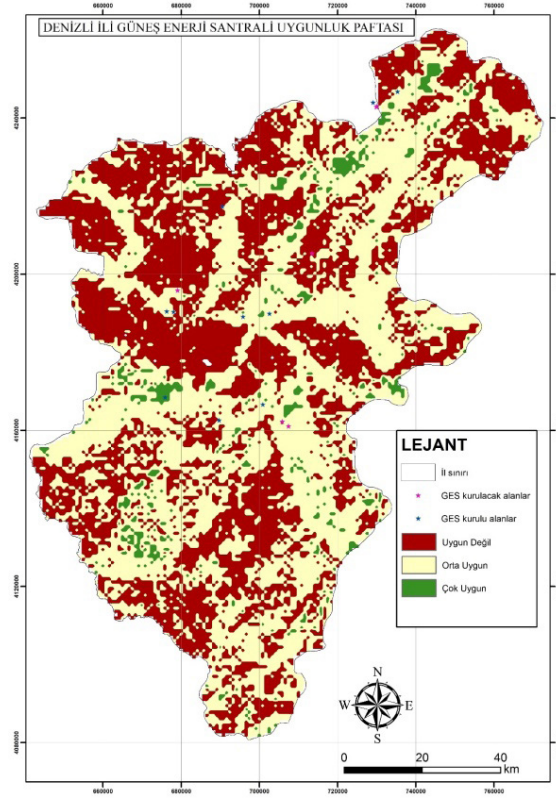
Güneş enerji santralleri genellikle büyük ölçekli yapılar olup, çevredeki manzaranın estetiğini etkileyebilirler. Bu analiz haritasında yerleşim alanlarına uzaklık 5 sınıfa ayrılmıştır. Yerleşim yerlerine çok yakın olan alanlar haritada 1 değerini almış ve uygun değil olarak gösterilmiştir. Yerleşim yerlerinden uzak olan alanlar ise 5 değerini alarak çok uygun olarak belirtilmiştir (Bkz. Şekil 8h).

Güneş enerji santralleri, ürettikleri elektriği enerji nakil hatları üzerinden iletmek için bağlantıya ihtiyaç duyarlar. Enerji nakil hatlarına yakın konumda bulunan santraller, elektrik bağlantısını daha kolay ve ekonomik bir şekilde sağlayabilirler. Analizde iletim hatlarına olan mesafeler 5 sınıfa ayrılmıştır. İletim hatlarına daha yakında bulunan güneş enerji santralleri 5 değerini alarak çok uygun olarak belirtilmiştir. İletim hatlarından daha uzakta bulunan güneş enerji santralleri ise 1 değerini almış ve uygun değildir olarak belirtilmiştir (Bkz. Şekil 8i).

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Güneş enerji santrallerinin uygun yer seçimini yapmak için AHS ve CBS araçları kullanılmış ve Denizli ilinde güneş enerji santrali projeleri için arazi uygunluk haritası oluşturulmuştur (Şekil 9) Çalışma alanına, literatür taramalarına ve Denizli ilinde güneş enerji santrali (GES) projelerinde görev almış uzmanların tecrübelerine göre 9 adet yer seçim kriteri belirlenmiştir (bakı, eğim, yükselti, sıcaklık, güneş radyasyonu, arazi kullanımı, yollara olan uzaklık, yerleşim yerlerine olan uzaklık, iletim hatlarına olan uzaklık). Uzmanlar tarafından ağırlıkları belirlenen kriterler geçmiş çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Kriterler Ağırlıklı Çakıştırma Analizi yöntemi ile kombine edilerek arazi uygunluk haritası, yapılan literatür araştırması sonucunda ağırlık olarak ortaya konulan sınıflama türü baz alınarak, 'uygun değil', 'orta uygun' ve 'çok uygun' olmak üzere üçlü bir sınıflamaya göre hazırlanmıştır. Mevcutta kurulu ve kurulması planlanan güneş enerji santrali projeleri de uygunluk haritasında gösterilmiştir. Mevcutta kurulu 7 adet tesisin orta uygunlukta alanda 2 adet tesisin uygun olmayan alanda ve 1 adet tesisinde çok uygun olan alanda kaldığı görülmektedir. Henüz daha kurulum işlemleri yapılmayan 5 santralden 4'ünün orta uygunluklu bölgede, 1'inin ise uygun olmayan bölgede kaldığı görülmüştür (Şekil 9).

Denizli ilinin solar radyasyon verileri incelendiğinde, güneş enerjisi potansiyeli yüksek bir bölge olduğu görülmektedir. CBS ortamında yapılan analizler de buna benzer sonuçlar vermiştir. Güneş enerji santralleri kurulumu için, kurulum maliyetlerinin düşük tutulması amacıyla, tarımsal üretim yapılmaya uygun olmayan, düz veya düşük eğim yüzdesinde yerler tercih edilmektedir. Çalışmada, Denizli ilinin farklı bölgelerinde uydu görüntüleri kullanılarak arazi eğimi analizi yapılmış ve düşük eğime sahip alanlar uygunluk haritasında sunulmuştur. Ayrıca, arazi kullanımı ve yapısal faktörler göz önünde bulundurularak, santral kurulumuna uygun olmayan alanlar kısıtlanmıştır. Güneş enerjisi santrallerinin elektrik şebekesine erişimi önemlidir. Güneş enerjisi alanında uzman kişiler ve ilgili literatürden elde edilen bilgilere göre Denizli ilindeki elektrik şebekesi hatları analiz edilerek, santrallerin en uygun yerlerde konumlanması için elektrik şebekesine yakın alanların tercih edilmesine önem gösterilmiş ve iletim hatlarına yakınlık haritası oluşturulmuştur. Yapılan analizlerden elde edilen bulgular ışığında, Denizli ilinin Tavas, Bekilli, Çal, Baklan, Çivril, Kale ve Beyağaç ilçelerinde güneş enerji santrali kurulumu için uygun alanların olduğu görülmüştür (Şekil 9). Elde edilen sonuçlara göre, Denizli ilinde 44,579 hektar alanın güneş enerji santrali kurulumu için çok uygun, 619,595 hektar alanın orta uygun ve 530,922 hektar alanın ise uygun olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 9: Denizli İli güneş enerji santrali uygunluk haritası

(Kaynak: Yazarlar tarafından oluşturulmuştur)

Fosil yakıtlar, küresel enerji tüketiminin büyük bir kısmını oluştururken, sınırlı kaynaklara sahip olmaları ve çevresel etkileri nedeniyle artık sürdürülemez bir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir. Dünya genelinde, fosil yakıtların yerini alabilecek ve çevreye daha az zarar veren enerji kaynaklarına bir geçiş zorunludur. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik gibi yenilenebilir enerji kaynakları ise enerji üretimi için sürdürülebilir ve temiz bir seçenek sunmaktadır. Bu kaynaklar, sürekli olarak yenilenebilir olduklarından dolayı sınırsız bir potansiyele sahiptir ve aynı zamanda sera gazı emisyonlarını azaltarak iklim değişikliğiyle mücadelede önemli bir rol oynamaktadır (Yıldırım ve Nuri, 2018:106; Erdoğan, 2022:278).

Güneş enerjisi, gelecekte enerji üretiminde önemli bir rol oynamaya devam edecek temiz ve sürdürülebilir bir kaynaktır. Güneş enerjisi teknolojilerindeki hızlı ilerlemeler, maliyetlerin düşmesi ve çevresel faydalarının daha da anlaşılması sonucunda güneş enerjisi sektörü büyük bir ivme kazanmıştır. Bu ivme, güneş enerjisinin dünya genelinde giderek daha yaygın hale gelmesine yönelik bir işaret olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, enerji güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma gibi konular giderek daha fazla önem kazandıkça, güneş enerjisi daha da cazip bir seçenek haline gelmektedir. Güneş enerjisinin, temiz bir enerji kaynağı olması ve sınırsız bir potansiyele sahip olması nedeniyle enerji dönüşümünde önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Ancak, güneş enerjisinin yaygınlaşmasının önünde bazı engellerde mevcuttur. Örneğin altyapıyı uyumlu hale getirmek, düzenleyici kararlara uyum sağlamak ve finansman sağlamak gibi konularda bazı zorluklar yaşanabilir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, politika yapıcılar, enerji şirketleri ve toplumun diğer paydaşları iş birliği yapmalı ve uygun teşvikler, düzenlemeler ve finansal destek sağlamalıdır.

KAYNAKÇA

- Aydın, N. Y., Kentel, E., Düzgün, H. S. 2013. GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. *Energy conversion and management*, 70, 90-106.
- Barbier, E. 2002. Geothermal energy technology and current status: an overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 6, 3-65.
- Carrión, J. A., Estrella, A. E., Dols, F. A., Toro, M. Z., Rodríguez, M., Ridaio, A. R. 2008. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(9), 2358-2380.
- Colak, H. E., Memisoglu, T., Gercek, Y. 2020. Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. *Renewable energy*, 149, 565-576.
- Dağdeviren, M., Eren, T. 2001. Tedarikçi firma seçiminde Analitik Hiyerarşi Prosesi ve 0-1 hedef programlama yöntemlerinin kullanılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Sayı: 16 (2), s. 41-52.
- Denizli Büyükşehir Belediyesi (DBB), 2019. Denizli İklim Değişikliği Eylem Planı (2016-2030), https://www2.denizli.bel.tr/userfiles/file/iklimdegisikligi/DİDEP%20yönetici%20özet/DENİZLİ_ÖZET_WEB.pdf, Erişim Tarihi: 10.09.2023.
- Denizli Valiliği, 2022. <http://www.denizli.gov.tr/cografi-konum>, Erişim Tarihi: 04.09.2023.
- Erdoğan, S. 2022. Enerji, çevre ve sera gazları. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 10, (1), 277-303.
- Garni, H. Z., Awasthi, A. 2017. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied energy*, 206, 1225-1240.
- GEPA, 2023. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, Erişim Tarihi: 15.09.2023.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., Gorini, R. 2019. The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy strategy reviews*, 24, 38-50.
- Güney, T. 2019. Renewable energy, non-renewable energy and sustainable development. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26, (5), 389-39.
- International Energy Agency (IEA), 2021. Energy Policy Review Turkey, <https://www.iea.org/events/turkiye-2021-energy-policy-review>, Erişim Tarihi: 20.09.2023.
- International Energy Agency (IEA), 2023. Data Services, Erişim Tarihi: 20.09.2023.
- International Energy Agency (IEA), 2023. World Energy Investment, <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>, Erişim Tarihi: 20.09.2023.
- IRENA, 2023. Global Landscape of Renewable Energy Finance, <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-landscape-of-renewable-energy-finance-2023>, Erişim Tarihi: 04.09.2023.
- Keirstead, J., Jennings, M., Sivakumar, A. 2012. A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, (6), 3847-3866.
- Koç, E. ve Kaya, K. 2015. Enerji Kaynakları–Yenilenebilir Enerji Durumu. *Mühendis ve Makina*, 56, (668), 36-47.
- Merrouni, A. A., Elalaoui, F. E., Mezrhab, A., Mezrhab, A., Ghennioui, A. 2017. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. *Renewable energy*, 119, 863-873.
- Moriarty, P., Honnery, D. 2022. The limits of renewable energy, In *Switching Off: Meeting Our Energy Needs in A Constrained Future*, 35-54.
- Owusu, P. A., Asumadu-Sarkodie, S. 2016. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation." *Cogent Engineering*, 3.
- Önal, M. 2020. Sürdürülebilir Kalkınmada Yenilenebilir Enerjinin Önemi: Türkiye Üzerine Bir Değerlendirme. *Turkish Business Journal*, 1, (1), 78-97.
- Öymen, G. 2020. Yenilenebilir enerjinin sürdürülebilirlik üzerindeki rolü. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19, (39), 1069-1087.

- Özşahin, E. 2014. Earthquake damage risk analysis in Tekirdağ province using Geographic Information Systems (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) kullanılarak Tekirdağ ilinde deprem hasar riski analizi, *International Journal of Human Sciences*, 11 (1), 861-879.
- Rahman, A., Farrok, O., Haque, M. M. 2022. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161.
- Saaty, R.W. (1987). The Analytical Hierarchy Process What It Is and How It Is Used, *Mathi Modelling*, Vol.9 (3-5), 161 – 176.
- Sarsıcı, N. 2020. Karabük ilinde Güneş Enerjisi Santrali (GES) Kurulabilecek Alanların Çok Ölçütlü Karar Analizi ile Tespiti, (Yüksek Lisans), Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Sindhu, S., Nehra, V., Luthra, S. 2017. Investigation of feasibility study of solar farms deployment using hybrid AHP-TOPSIS analysis: Case study of India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 496-511.
- Şener, Ş., Şener, E., Nas, B., Karagüzel, R. 2010. Combining AHP with GIS for landfill site selection: a case study in the Lake Beyşehir catchment area (Konya, Turkey). *Waste management*, 30, (11), 2037-2046.
- Uyan M. 2016. Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, (4), 343-351.
- Uyan, M. 2013. GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapınar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11-17.
- Vandevyvere, H., Stremke, S. 2012. Urban planning for a renewable energy future: Methodological challenges and opportunities from a design perspective. *Sustainability*, 4, (6), 1309-1328.
- Varınca, K., B., Gönüllü, M., T. 2006. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, I. Ulusal Güneş ve Hidrojen Enerjisi Kongresi, Eskişehir.
- Wang Y., Liu J., Elhag T. 2008. An Integrated AHP-DEA Methodology For Bridge Risk Assessment, *Computers & Industrial Engineering*, 54(3): 513-525.
- Wind, Y., Saaty, T. L. 1980. Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process, *Management Science*, Volume: 26 (7), 641- 658.
- Wirth, H. 2021. Recent facts about photovoltaics in Germany. *Fraunhofer Ise*, 92.
- Yıldırım, O., Nuri, F. İ. 2018. Yenilenebilir enerji ve sürdürülebilir kalkınma ilişkisi. *Uluslararası Bankacılık Ekonomi ve Yönetim Araştırmaları Dergisi*, 1, (1), 105-143.

Beyan ve Açıklamalar (Disclosure Statements)

1. Bu çalışmanın yazarları, araştırma ve yayın etiği ilkelerine uyduklarını kabul etmektedirler (The authors of this article confirm that their work complies with the principles of research and publication ethics).
2. Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir (No potential conflict of interest was reported by the authors).
3. Bu çalışma, intihal tarama programı kullanılarak intihal taramasından geçirilmiştir (This article was screened for potential plagiarism using a plagiarism screening program).