



MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

KONU:

**ESKİŞEHİR'DE YENİLENEBİLİR VE SÜRDÜRÜLEBİLİR HİBRİT SİSTEM
UYGULAMASI**

DERS ÖĞRETİM ÜYESİ:

DOÇ. DR. CEYDA AKSOY TIRMIKÇI

HAZIRLAYAN:

ÖMER FARUK ORUÇ

TARİH: 22.05.2025

İÇİNDEKİLER

1. ESKİŞEHİR İLİNİN ENERJİ KAYNAKLARINI KULLANABİLME POTANSİYELİ.....	4
2. KURULACAK BÖLGENİN BELİRLENMESİ.....	9
3. ENERJİ TALEBİNİ KARŞILAYABİLECEK ENERJİ KAYNAKLARININ HESAPLANMASI.	11
4. MATLAB KOD ÇALIŞMALARI	23
5. HUKUKSAL ETKİLERİ	25
6. ÇEVRESEL ETKİLER	27
7. SONUÇ	29

GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacının sürekli artması ve fosil yakıt kaynaklarının tüketilmesi, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji kaynaklarının önemini giderek arttırmaktadır. Bu kapsamda, çevresel etkileri minimuma indirgeyen ve uzun vadeli enerji arz güvenliğini sağlayan alternatif enerji çözümlerine olan ihtiyaç daha da belirgin hale gelmiştir. Özellikle, sanayi ve tarım alanlarında önemli bir konumda bulunan Eskişehir ilinde, çeşitli yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli ve uygulanabilirliği incelenmeye değer bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu raporda, Eskişehir ilinde güneş, rüzgar, hidrolik ve nükleer enerji gibi farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının potansiyeli araştırılacak, bu kaynakların uygulanabilirliği için gerekli matematiksel hesaplamalar yapılacak ve olası çevresel etkiler değerlendirilecektir. Bu kapsamda, enerji tesislerinin en uygun şekilde konumlandırılması için jeolojik, meteorolojik ve ekonomik faktörler de dikkate alınacaktır.

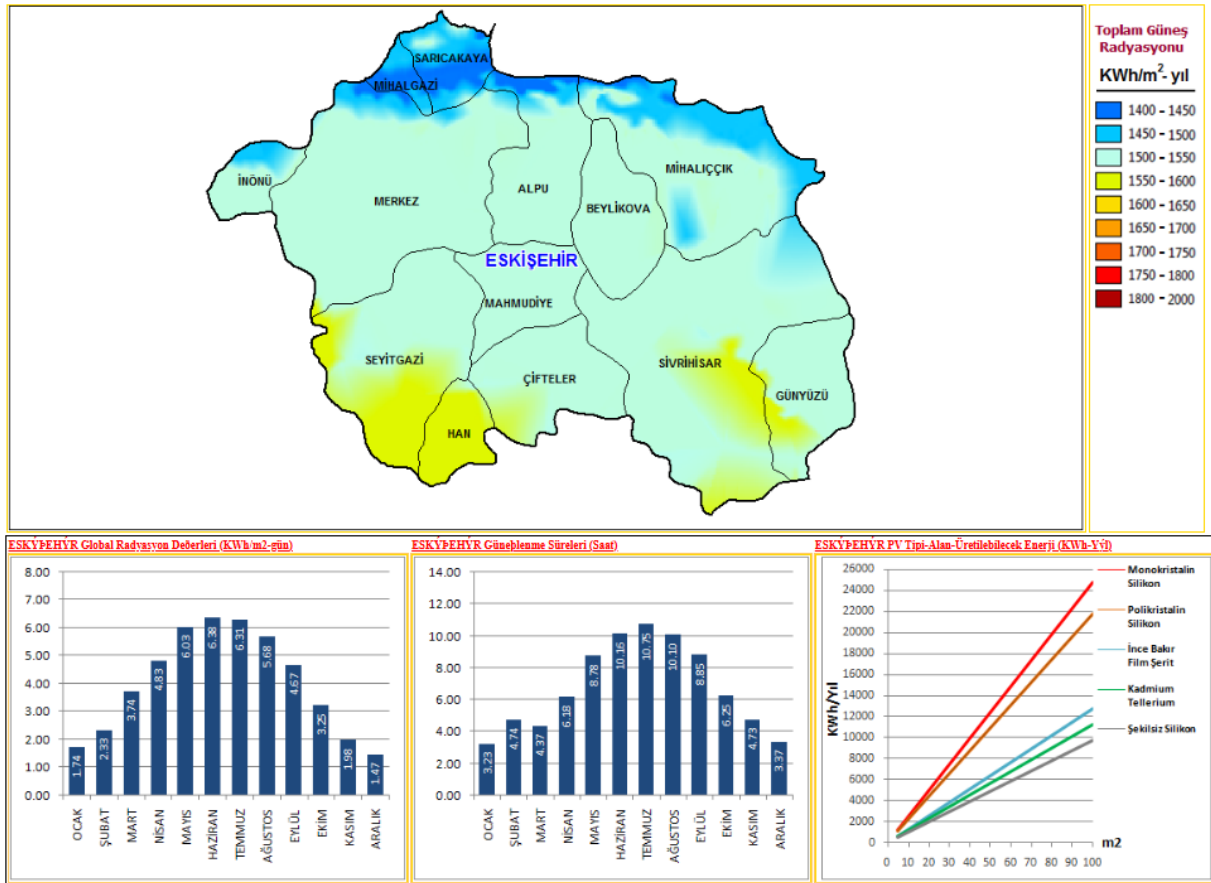
Ayrıca, son yıllarda dünyada artan nükleer enerjiye yönelik ilgi göz önüne alınarak, geleneksel nükleer santraller yerine Eskişehir için uygun olabilecek Küçük Modüler Reaktör (SMR) teknolojisinin potansiyeli de değerlendirilecektir. Eskişehir gibi sanayi ve akademik altyapısı güçlü bir şehirde, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımı, ekonomik kalkınmaya ve enerji bağımsızlığına büyük katkı sağlayabilecektir.

Bu raporun kapsamında, Eskişehir ilinin mevcut enerji potansiyelini bilimsel bir yaklaşımla incelemek ve sürdürülebilir enerji politikalarına katkı sağlayacak stratejiler önermektir. Hazırlanan analizler, hem kamu sektörüne hem de özel sektöre yol gösterici nitelikte olup, gelecekteki enerji yatırımlarının planlanmasında kritik bir rol oynayacaktır.

1. ESKİŞEHİR İLİNİN ENERJİ KAYNAKLARINI KULLANABİLME POTANSİYELİ

GÜNEŞ ENERJİSİ

Eskişehir, Türkiye'nin iç kesimlerinde yer almasına rağmen güneş enerjisi açısından oldukça elverişli bir konuma sahiptir. Bölgenin yıllık ortalama güneşlenme süresi yaklaşık 2.800 saat olup, günlük ortalama 4,5-5 kWh/m² güneş ışınlamına sahiptir. Bu değerler, özellikle güneş enerjisinden elektrik üretimi için önemli bir potansiyel sunmaktadır. Türkiye'nin genelinde olduğu gibi, Eskişehir'de de yaz aylarında güneş ışınlamı en yüksek seviyelere ulaşırken, kış aylarında bu oran nispeten düşmektedir. Ancak, modern güneş paneli teknolojileri sayesinde yıl boyunca verimli enerji üretimi mümkündür. Eskişehir iline ait Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA) verileri Şekil-1.1 ile verilmiştir.



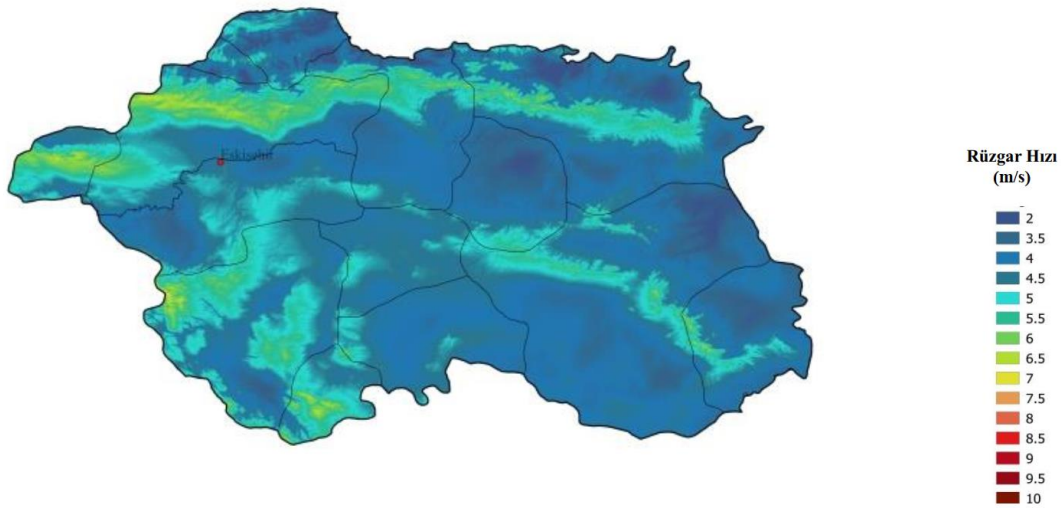
Şekil 1.1 Eskişehir Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası Verileri

Şehirde güneş enerjisinden yararlanmak için en uygun bölgeler Sivrihisar, Mihaliççık ve Çifteler ilçeleri olarak öne çıkmaktadır. Bu bölgeler, geniş arazilere sahip olmaları ve gölge etkisinin minimum olması nedeniyle büyük ölçekli güneş enerjisi santralleri (GES) kurulumu için idealdir. Ayrıca, Eskişehir'in sanayi bölgelerinde ve üniversite kampüslerinde çatı üstü güneş enerjisi sistemleri yaygınlaştırılarak yerel elektrik ihtiyacının önemli bir kısmı karşılanabilir.

Güneş enerjisi santrali kurulumu için gerekli matematiksel hesaplamalar ve fizibilite analizleri, panel verimliliği, panel eğim açısı, bölgesel ışıınım verileri ve yatırım maliyetleri gibi birçok değişkeni içermektedir. Santral büyüklüğüne bağlı olarak yıllık üretilecek enerji miktarı, karbon salınımındaki azalma ve yatırımın geri dönüş süresi gibi faktörler detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Özellikle Eskişehir'in kış aylarında oluşabilecek kar yükü ve sıcaklık değişimlerinin paneller üzerindeki etkisi de değerlendirilmelidir.

RÜZGAR ENERJİSİ

Eskişehir, rüzgar enerjisi açısından Türkiye'nin orta seviyede potansiyele sahip illerinden biridir. Bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı 4-6 m/s arasında değişmekte olup, bazı yüksek rakımlı bölgelerde bu değer 7 m/s'yi aşabilmektedir. Rüzgar enerjisinden verimli elektrik üretimi için 5 m/s ve üzeri hızlara sahip bölgeler tercih edilmelidir. Bu nedenle, Eskişehir'de rüzgar santrali kurulumu için en uygun alanlar, yüksek rakımlı bölgeler ve geniş açık arazilerdir.



Şekil 1.2 Eskişehir Rüzgar Enerjisi potansiyel atlası

Yukarıdaki haritada Eskişehir bölgesine ait Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) verileri gösterilmektedir (bkz. Şekil1.2). Haritaya göre, Eskişehir genelinde ortalama rüzgar hızı yaklaşık 4 m/s civarındadır. Ancak dağlık ve yüksek rakımlı bölgelerde bu değer artmakta, bazı noktalarda ortalama rüzgar hızının 7 m/s'ye kadar çıktığı görülmektedir. Bu durum, rüzgar enerjisi üretimi açısından özellikle dağlık alanları daha uygun hale getirmektedir.

Eskişehir'de rüzgar türbinlerinin kurulumu için Sivrihisar, Mihalıççık, Seyitgazi ve Alpu ilçeleri öne çıkmaktadır. Bu bölgeler yüksek rakımlı ve açık alanlara sahip olup, rüzgarın sürekli ve güçlü olduğu noktalar bulunmaktadır. Özellikle Mihalıççık ilçesi rüzgar enerjisi açısından en umut verici bölge olarak değerlendirilmektedir. Türkiye'de yapılan rüzgar atlası çalışmaları, bu ilçenin belirli bölgelerinde rüzgar hızının enerji üretimi için yeterli seviyede olduğunu göstermektedir.

Rüzgar enerjisi santrali (RES) kurulumu için gerekli hesaplamalar, rüzgar hızı ölçümleri, türbin verimlilik hesapları, enerji üretim tahminleri ve yatırım maliyet analizlerini içermektedir. Türbinlerin yüksekliği, kanat çapı ve yerleşim düzeni, santralin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Eskişehir’de kurulacak bir rüzgar santrali, yıllık olarak 10-20 MW kapasiteli bir üretim sağlayabilir

BIYOKÜTLE ENERJİSİ

Eskişehir, tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu illerden biri olarak biyokütle ve biyogaz enerji üretimi açısından önemli bir potansiyele sahiptir. Biyokütle enerjisi, tarımsal atıklar, hayvansal gübreler, belediye atıkları ve orman ürünleri atıkları gibi biyolojik kaynaklardan elde edilen enerjiyi ifade eder. Özellikle tarım alanlarının geniş olması ve büyük ölçekli hayvancılık faaliyetlerinin bulunması, Eskişehir’in biyokütle enerjisi üretimi açısından avantajlı konumda olmasını sağlamaktadır.

Biyokütle enerjisi üretimi için en uygun ilçeler Alpu, Mahmudiye, Sivrihisar ve Çifteler olarak öne çıkmaktadır. Bu bölgeler, büyükbaş ve küçükbaş hayvancılığın yoğun olduğu alanlar olup, hayvansal atıkların biyogaz üretimi için kullanılmasına imkan tanımaktadır. Ayrıca, Eskişehir’in tarımsal üretimi nedeniyle mısır sapı, buğday samanı ve ayçiçeği kabukları gibi tarımsal atıklar da biyokütle enerjisi için kullanılabilir. Bunun yanı sıra, şehirde oluşan kentsel atıklar ve arıtma çamurları da biyogaz üretiminde değerlendirilebilir.

Biyokütle enerji santrallerinin kurulumu için hammadde lojistiği, atık toplama sistemleri, biyogaz üretim verimliliği ve enerji dönüşüm teknolojileri dikkate alınmalıdır. Atık miktarına bağlı olarak kurulacak santralin kapasitesi değişmekle birlikte, 5-10 MW arasında biyokütle veya biyogaz santralleri kurulması mümkündür. Bu tesisler, hem organik atıkların yönetilmesine katkı sağlayarak çevreye zarar vermesini önler hem de sürdürülebilir enerji üretimine katkıda bulunur.

HİDROLİK (HİDROELEKTRİK) ENERJİSİ

Hidrolik enerji, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden faydalanarak elektrik üretimi sağlayan yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Türkiye, hidroelektrik enerji üretimi açısından oldukça zengin bir ülke olmasına rağmen, Eskişehir büyük ölçekli hidroelektrik santralleri (HES) kurmak için sınırlı su kaynaklarına sahiptir.

Eskişehir’deki en önemli su kaynakları Porsuk Çayı ve Sakarya Nehri’ne bağlı yan dereler olup, ilin su rejimi büyük ölçekli baraj tipi HES’ler için kısıtlıdır (bkz. Şekil 1.3). Ancak, küçük ölçekli akarsu tipi hidroelektrik santralleri (Mikro-HES) kurulması mümkündür. Bu tür santraller, nehir akışından doğrudan faydalanarak düşük debili su kaynaklarını enerjiye dönüştürür ve özellikle yerel enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılabilir.



Şekil 1.3 Eskişehir su kaynakları haritası

Eskişehir’de en uygun hidroelektrik santral kurulumu için Porsuk Barajı ve Porsuk Çayı üzerinde küçük ölçekli projeler geliştirilebilir. Porsuk Barajı, içme suyu ve tarımsal sulama amaçlı kullanıldığı için enerji üretimi konusunda öncelikli değildir. Ancak, tarımsal sulama kanallarına entegre edilebilecek düşük kapasiteli hidroelektrik türbinleri ile ek enerji üretimi sağlanabilir.

HİDROJEN ENERJİSİ

Hidrojen enerjisi, karbonsuz ve yüksek verimli bir enerji taşıyıcısı olarak geleceğin temiz enerji kaynaklarından biri olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde hidrojen, su elektrolizi, doğal gaz reformasyonu ve biyokütle gazlaştırma gibi yöntemlerle elde edilmektedir. Eskişehir, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı yeşil hidrojen üretimi için uygun bir altyapıya sahip olabilir.

Eskişehir’in güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeli göz önüne alındığında, bu kaynaklardan üretilen elektriğin su elektrolizi yöntemiyle hidrojen üretiminde kullanılması mümkündür. Özellikle Sivrihisar ve Mihalıççık gibi güneş ve rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu ilçelerde, yenilenebilir enerjiyle çalışan hidrojen üretim tesisleri kurulabilir. Bu sayede karbonsuz hidrojen üretimi sağlanarak sanayi ve ulaşım sektörlerinde kullanılabilir hale getirilebilir. Eskişehir’de sanayi bölgeleri ve Organize Sanayi Bölgesi (OSB), hidrojen kullanımına yönelik potansiyel tüketim alanları olarak değerlendirilebilir.

Hidrojen üretim tesisleri için fizibilite çalışmaları kapsamında elektrolizör verimliliği, su tüketimi, enerji girdileri, depolama ve taşıma maliyetleri gibi faktörler detaylı bir şekilde analiz edilmelidir. Hidrojenin

depolanması ve taşınması, yüksek basınçlı tanklar, sıvılaştırma ve metal hidrür depolama sistemleri gibi teknolojilerle mümkündür, ancak bu süreçlerin maliyetleri oldukça yüksektir.

NÜKLEER (SMR- KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖR) ENERJİSİ

Nükleer enerji, yüksek verimlilik ve düşük karbon salınımı ile sürdürülebilir enerji üretimi açısından önemli bir seçenektir. Geleneksel büyük ölçekli nükleer santraller yerine, son yıllarda Küçük Modüler Reaktörler (SMR) daha esnek, güvenli ve ölçeklenebilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Eskişehir’de SMR teknolojisinin uygulanabilirliği, enerji ihtiyacı, sanayi bölgelerine entegrasyonu ve çevresel etkileri açısından değerlendirildiğinde bazı önemli avantajlar sunmaktadır.

SMR’ler, 100-300 MW kapasiteli, modüler ve küçük ölçekli nükleer santraller olup, su soğutmalı veya hava soğutmalı olarak tasarlanabilir. Eskişehir’in iç bölgelerde yer alması nedeniyle, hava soğutmalı SMR sistemleri daha uygun bir seçenek olabilir. Bu tür reaktörler, deniz kıyısına yakın konumlanmaya gerek duymadan, iç bölgelerde de güvenli bir şekilde kurulabilmektedir.

Eskişehir’de SMR kurulumu için en uygun bölgeler, sanayi bölgelerine yakın ve düşük nüfus yoğunluğuna sahip alanlar olabilir. Sivrihisar ve Alpu ilçeleri, geniş arazi yapıları ve sanayiye yakın olmaları nedeniyle potansiyel alanlar arasında değerlendirilebilir. Sanayi tesisleri ve organize sanayi bölgeleri için doğrudan elektrik ve ısı üretimi sağlanarak verimlilik artırılabilir.

Eskişehir, Türkiye'nin en zengin toryum rezervlerine sahip bölgelerinden biridir. Özellikle Sivrihisar ilçesinin kuzeybatısındaki Kızılcaören, Karkın ve Okçu köyleri arasında yer alan yaklaşık 15 km²'lik alanda toryum ve nadir toprak elementleri içeren önemli yataklar bulunmaktadır. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü (MTA) tarafından yapılan çalışmalarda, Eskişehir-Sivrihisar bölgesinde 380.141 ton %0,02 tenörlü toryum rezervi tespit edilmiştir. Ayrıca, 2020 yılında Eskişehir-Beylikova'da 694 milyon ton 788 ppm ThO₂ içeren nadir toprak elementi kaynağı keşfedilmiştir.

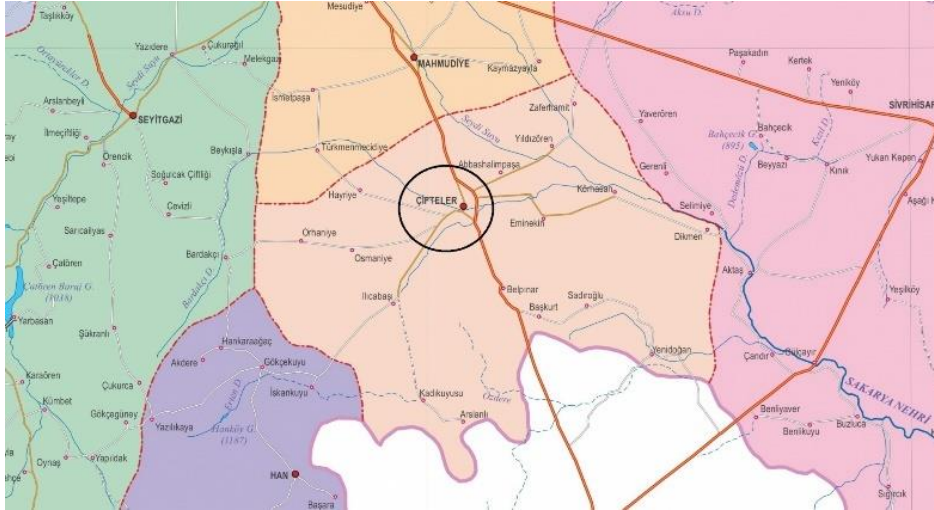
Toryum, nükleer enerji üretiminde uranyuma alternatif bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Özellikle Küçük Modüler Reaktörler (SMR) tasarımlarında toryum kullanımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Ergimiş Tuz Reaktörleri (MSR), toryum yakıtı için uygun bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu reaktörlerde toryum, sıvı tuz içinde çözünmüş halde kullanılır ve güvenlik avantajları sunar. Çin, toryum yakıtlı MSR'ler konusunda önemli adımlar atmakta olup, 2030 yılına kadar 100 MW'lık bir projeyi tamamlamayı planlamaktadır.

Eskişehir'in zengin toryum rezervleri, toryum yakıtlı SMR'lerin kurulumu için önemli bir avantaj sunmaktadır. Bu sayede, yerel kaynaklar kullanılarak enerji üretimi gerçekleştirilebilir ve enerji bağımsızlığına katkı sağlanabilir. Ayrıca, toryum yakıtlı reaktörler, uranyum yakıtlı reaktörlere göre daha az uzun ömürlü radyoaktif atık üretir ve nükleer silah yapımında kullanılabilecek malzemelerin oluşumunu minimize eder.

Sonuç olarak, Eskişehir'in toryum rezervleri, toryum yakıtlı SMR'lerin kurulumu için stratejik bir fırsat sunmaktadır. Bu potansiyelin değerlendirilmesi hem bölgesel kalkınmaya katkı sağlayacak hem de Türkiye'nin enerji çeşitliliğini artırarak sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmasına yardımcı olacaktır.

2. KURULACAK BÖLGENİN BELİRLENMESİ

Proje kapsamında elektrik ihtiyacının karşılanacağı alan olarak, Eskişehir ilinin Çifteler ilçesinde kurulması planlanan bir besi çiftliği seçilmiştir. Bu yerleşim, bölgesel hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu, altyapı bakımından uygunluk gösteren ve enerji ihtiyacı açısından da değerlendirilmesi gereken bir konumda yer almaktadır. Çifteler ilçesine ait idari-topografik yerleşim haritası Şekil 2.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Çifteler İdari-Topografik Yerleşim Haritası

Besi çiftliği, hayvan barınaklarından yem hazırlama sistemlerine, gübre yönetiminden su teminine kadar çeşitli elektriksel yükleri içeren yoğun enerji tüketimine sahiptir. Bu kapsamda, çiftlikte kullanılacak temel elektrikli ekipmanlar belirlenmiş ve her bir ekipmanın günlük ortalama çalışma süresi ile güç değerleri dikkate alınarak günlük enerji tüketim miktarları hesaplanmıştır. Çiftlik kurulum alanı ise Şekil 2.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Eskişehir Çifteler Google Maps

Tablo 2.1, çiftliğe ait başlıca elektriksel yükler, bu yüklerin birim güçleri, günlük ortalama çalışma süreleri ve günlük enerji tüketimleri ayrıntılı şekilde sunulmuştur. Örneğin, iki adet dalgıç pompa günlük 3 saat çalışmakta olup, her biri 75 kW gücündedir ve toplamda 450 kWh/gün enerji tüketmektedir. Benzer şekilde, 24 saat kesintisiz çalışan 11.5 kW gücündeki soğuk hava deposu ise 276 kWh/gün tüketmektedir.

Tablo 2.1- Kurulacak Yapının Enerji Talebi

Elektriksel yükler	Gücü (kW)	Günlük çalışma süresi (saat)	ortalama	Toplam enerji miktarı (kWh/gün)
Dalgıç pompa (2 adet)	75	3		450
Soğuk hava deposu	11.5	24		276
Hidrofor (2 adet)	5.5	16		176
Gübre karıştırıcı (2 adet)	7.5	1		15
Separatör	7.5	1		7.5
Gübre pompası (2 adet)	7.5	1		15
Sıyırıcı (4 adet)	4	4		64
Kaşağı (12 adet)	0.25	4		12
Elektrikli testere (4 adet)	7.5	0.5		15
Diğer (aydınlatma. vb.)	12	12		144
Toplam	138.25			1174.5

Bu veriler doğrultusunda, besi çiftliğinin günlük toplam enerji ihtiyacı yaklaşık 1174.5 kWh olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, enerji üretim sisteminin (örneğin yenilenebilir enerji kaynakları) boyutlandırılması, ekonomik fizibilite analizlerinin yapılması ve enerji verimliliği planlarının oluşturulması açısından kritik önem taşımaktadır.

3. ENERJİ TALEBİNİ KARŞILAYABİLECEK ENERJİ KAYNAKLARININ HESAPLANMASI

GÜNEŞ ENERJİSİ

Yapılan analizler sonucunda, Eskişehir'in Çifteler ilçesinde kurulması planlanan besi çiftliğinin günlük toplam elektrik enerjisi ihtiyacının 1174.5 kWh/gün olduğu hesaplanmıştır. Bu enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla güneş enerjisi sistemi (fotovoltaik sistem) kurulması öngörülmüştür.

Bölgenin güneşlenme potansiyeli ve radyasyon değerleri dikkate alınarak yapılan değerlendirmeler sonucunda CWT450-144MHCMB model numaralı güneş paneli kullanılması uygun bulunmuştur. Bu panelin teknik özellikleri aşağıdaki Tablo 3.1.1 ile verilmiştir.

Tablo 3.1.1- Güneş Panelinin Teknik Özellikleri

Model No	CWT450-144MHCMB
Maksimum güç (Wp)	450
Maksimum güte voltaj (V)	41.4
Maksimum güçte akım (A)	10.87
Açık devre gerilimi (V)	49.2
Kısa devre akımı (A)	11.61
Verim	%20,7
Panel boyutu (mm)	2095x1039x40
Konumlandırma açısı (30°)	+ %11

Bu güneş panellerinin yerleştirileceği açı, yıl boyu maksimum enerji üretimi sağlayacak şekilde 30° eğim açısı ile ayarlanmıştır. Verim oranı %20,7 olan bu paneller, yüksek performanslı ve yerel iklim koşullarına uyum sağlayabilecek niteliktedir. Güneş enerjisi sisteminin tasarımı için yıllık ortalama ışıınım (radyasyon) değerleri ile günlük ortalama güneşlenme süreleri de dikkate alınmıştır. Eskişehir ili için alınan aylık veriler aşağıdaki Tablo 3.1.2 ile gösterilmektedir.

Tablo 3.1.2- Aylara Göre Güneşlenme Süresi Ve Işıınım Değerleri

Aylar	Radyasyon değeri (kWh/m ² -gün-30°)	Güneşlenme süresi (saat)
Ocak	4,80	9.57
Şubat	6,34	10.50
Mart	8,50	11.74
Nisan	10,68	13.06
Mayıs	12,20	14.17
Haziran	12,81	14.73
Temmuz	12,48	14.47
Ağustos	11,22	13.50
Eylül	9,24	12.22
Ekim	6,96	10.90
Kasım	5,14	9.80
Aralık	4,33	9.27

Bu veriler ışığında sistemin minimum verim koşullarında dahi enerji ihtiyacını karşılayabilecek şekilde boyutlandırılması gerekmektedir. Bu amaçla en düşük radyasyon değerinin görüldüğü Aralık ayı baz alınarak panel sayısı hesaplanmıştır.

Güneş paneli sayısı, minimum güneşlenme koşullarında bile yeterli enerjiyi sağlayacak şekilde aşağıdaki 3.1.1 ve 3.1.2 de gösterildiği üzere formül ile hesaplanmıştır:

$$np = \frac{E_{günlük}}{\eta * S * (Ht_{min})} \quad (3.1.1)$$

Burada:

- Egünlük: Günlük enerji ihtiyacı (1174.5 kWh/gün)
- η : Panel verimi (%20.7 \rightarrow 0.207)
- S: Panel alanı (2.095 m \times 1.039 m \approx 2.177 m²)
- Ht: Minimum günlük radyasyon değeri (Aralık ayı için 4.33 kWh/m²-gün)

$$np = \frac{1174.5}{0.207 * (2.095 * 1.039) * 4.33} = 601,99 \approx 602 \text{ panel} \quad (3.1.2)$$

Bu hesaplama göre, aralık ayı koşullarında dahi çiftliğin enerji ihtiyacını tam olarak karşılayabilmek için yaklaşık 602 adet güneş paneli kurulması gerekmektedir. Daha verimli aylar için bu sayı enerji fazlası üretecek olup, depolama veya şebekeye geri satış gibi yöntemlerle değerlendirilebilir.

Elde edilen panel sayısı doğrultusunda Eskişehir için aylık ve yıllık olarak elde edilen elektrik enerjisi Tablo 3.1.3 de verilmiştir.

Tablo 3.1.23- Aylara Göre üretilen elektrik enerjisi

Aylar	Aylık elde edilen elektrik enerjisi (kWh)
Ocak	40 361,69
Şubat	48 151,93
Mart	71 473,83
Nisan	86 907,83
Mayıs	102 586,0
Haziran	104 240,6
Temmuz	104 940,4
Ağustos	94 345,45
Eylül	75 189,92

Ekim	58 524,45
Kasım	41 826,43
Aralık	36 409,61
Toplam (yıllık)	864 958,1

Kurulan GES projesi için enerji geri ödeme süresi denklem 3.1.3 de gösterildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$EPBT = \frac{2240_{kWh/m^2} * 602_{(np)} * (2,095 * 1,039)_s}{864\,958,1_{kWh}} = 12.21 \text{ yıl} \quad (3.1.3)$$

Bu verilere göre sistemin kendi üretim enerjisini geri kazanma süresi yaklaşık 12,21 yıl olarak hesaplanmıştır. Bu değer, yatırımın çevresel ve ekonomik geri dönüşünü değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir. GES projesi için yayılması önlenen sera gazı salınımı 3.1.4 de verilmiştir

$$GPBT = 0,478_{kgCO_2/kWh} * 864\,958,1_{E_{yillik}} = 413449,97_{kgCO_2} \quad (3.1.4)$$

Sistem yılda yaklaşık 413.449,97 kg CO₂ emisyonunu engellediği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu hesaplama, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin çevresel faydalarını değerlendirmek açısından önemlidir ve sistemin ne kadar sürede fosil kaynaklara karşılık gelen karbon salınımı telafi ettiğini göstermektedir.

RÜZGAR ENERJİSİ

Eskişehir genelinde yıllık ortalama rüzgar hızı yaklaşık 4,37 m/s olarak ölçülmektedir. Ancak ilin güneydoğu kesimlerinde, özellikle dağlık ve açık alanlarda bu değer ortalama 7 m/s seviyelerine ulaşabilmektedir. Bu nedenle, yapılacak rüzgar enerji potansiyeli değerlendirmesi, bu yüksek rüzgar hızına sahip spesifik bölgelere göre yapılmıştır.

Kurulması planlanan türbinin teknik verileri aşağıdaki Tablo 3.2.1 de verilmiştir.

Tablo 3.2.1-Rüzgar Türbini Teknik Özellikleri

Model No	10kW Rüzgar Türbini
Kanat Sayısı	3 Kanatlı
Kanat Çapı	58 m
Başlama Rüzgar Hızı	4 m/s
Çıkış Gücü (16m/s)	1MW

Bu tabloda yer alan teknik veriler, kullanılacak rüzgar türbininin karakteristik özelliklerini içermektedir. Özellikle kanat çapı ve nominal çıkış gücü gibi değerler, türbinin üretim kapasitesini belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır. Çıkış gücü olarak 16 m/s rüzgar hızında 1 MW değerine ulaşabilen bu türbin, yapılan hesaplamalarda referans olarak alınmıştır.

Güç katsayısı (C_p), üreticinin sağladığı çıkış gücü referans alınarak aşağıdaki 3.2.1’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır:

$$C_p = \frac{1 \text{ MW}}{\frac{1}{2} * 1,225 * 29^2 * \pi * 16^3} = 0,1509 \quad (3.2.1)$$

Burada:

- $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ (hava yoğunluğu)
- $r=29$ (kanat yarıçapı)
- $A=\pi \cdot r^2$
- $V=16 \text{ m/s}$ (referans rüzgar hızı)

Elde edilen C_p değeri ile türbinin teorik çıkış gücü 3.2.2 numaralı denklemde gösterilmiştir.

$$P_{\text{rüzgar}} * C_p = P_{\text{türbin}} \quad (3.2.2)$$

Bu formül esas alınarak, 7 m/s ortalama rüzgar hızında türbinin çıkış gücü 3.2.3’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$P_{\text{türbin}} = \frac{1}{2} * 1,225 * 29^2 * \pi * 7^3 * 0,1509 = 83,7 \text{ kW} \quad (3.2.3)$$

Rüzgar türbininin sistem verimi (η), teorik çıkış gücüne oranla 3.2.4’de gösterildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$\eta_{\text{türbin}} = \frac{P_{\text{türbin-gerçek}}}{P_{\text{türbin-teorik}}} = \frac{83,7 \text{ kW}}{1 \text{ MW}} = 0.0837 = \%8,37 \quad (3.2.4)$$

Günlük toplam enerji üretimi ise 3.2.5 numaralı denklemde gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

$$P_{türbin(günlük)} = 83,7_{kW} * 24_{saat} = 2008_{kWh} \quad (3.2.5)$$

$$P_{türbin(günlük)} = 2008_{kWh} * 365_{gün} = 732920_{kWh} \quad (3.2.6)$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda, türbinin günlük yaklaşık 2008.8 kWh enerji üretebildiği görülmüştür. Bu miktar, çiftliğin günlük enerji ihtiyacı olan 1174.5 kWh'i karşılayabilecek düzeydedir. Ancak %8.37 seviyesindeki düşük sistem verimi, yatırımın ekonomik geri dönüşünü olumsuz yönde etkileyebilecek bir faktör olarak değerlendirilmiştir. GPBT hesabı ise denklem 3.2.7 ile gösterilmiştir.

$$GPBT = 0,478_{kgCO_2/kWh} * 730920_{kWh} = 350335,75_{kgCO_2} \quad (3.2.7)$$

Sistem yılda yaklaşık 350.335,75 kg CO₂ emisyonunu engellediği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu hesaplama, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin çevresel faydalarını değerlendirmek açısından önemlidir ve sistemin ne kadar sürede fosil kaynaklara karşılık gelen karbon salımını telafi ettiğini göstermektedir.

HİDROLİK (HİDROELEKTRİK) ENERJİSİ

Bu çalışma kapsamında kurulması planlanan hidroelektrik santral (HES), Eskişehir ilinin Çifteler ilçesinin genel elektrik ihtiyacını karşılamayı hedeflemektedir. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından açıklanan verilere göre, 2023 yılı itibarıyla Türkiye'de kişi başı yıllık ortalama elektrik tüketimi yaklaşık 3853 kWh olarak belirlenmiştir. Kurulacak olan Sakaryabaşı alanı ise Şekil 3.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Sakaryabaşı Su Havzası

Çifteler ilçesinin nüfusu aynı yıl itibarıyla 14.814 kişi olduğuna göre, ilçenin toplam yıllık elektrik tüketimi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$E_{y\text{ıllık}_çifteler} = 14.814 \cdot 3853 = 57.059.502 \text{ kWh/yıl} \quad (3.3.1)$$

Bu değer günlük enerji tüketimine çevrildiğinde:

$$E_{g\text{ünlük}_çifteler} = 57.059 \cdot 502365 \approx 156.390 \text{ kWh/gün} \quad (3.3.2)$$

Bu hesaplamalar doğrultusunda, HES'in günlük enerji üretiminin bu miktarı karşılayabilecek kapasitede olması gerekmektedir. Bir sonraki bölümde, bu ihtiyaca uygun olarak Sakarya Nehri'nin başlangıç noktası olan Sakarya Başı bölgesinde kurulacak bir HES'in teknik potansiyeli değerlendirilmiştir.

Kurulması öngörülen HES sistemi için Sakarya Başı bölgesi seçilmiştir. Bu bölge, su debisinin yüksekliği, sürekli akış rejimi ve yeterli düşü (şelale yüksekliği) açısından küçük ölçekli HES sistemleri için oldukça elverişlidir.

Tablo 3.3.1-Sakarya Başı HES Sistemine Ait Temel Parametreler

Yer	Sakarya Başı
Akışkan debisi (Q)	158 (m ³ /s)
Akışkan türü (ρ)	Su (997kg/m ³)
Düşü yüksekliği (H)	5 m
Sistem verimi (η)	%90

Yukarıdaki tablodaki veriler, hidroelektrik sistemin potansiyel enerji üretimini belirlemede kullanılan temel mühendislik parametreleridir. Akışkanın debisi (Q), suyun birim zamanda geçtiği hacmi temsil ederken, düşü yüksekliği (H), suyun potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşeceği seviyeyi ifade eder. Sistem verimi (η) ise jeneratör, türbin ve diğer ekipmanlardaki toplam enerji dönüşüm verimidir.

$$Q = \text{debi} * \text{yoğunluk} \quad (3.3.3)$$

Bir hidroelektrik santralinin teorik çıkış gücü 3.3.3 genel denklemleriyle hesaplanabilir:

$$P_{HES} = Q * g * H * \eta \quad (3.3.4)$$

Burada değerler yerine konularak 3.3.4 eşitliği elde edilir.

$$P_{HES} = 158 * 997 * 9,81 * 5 * 0,9 = 6953kWh \quad (3.3.5)$$

Bu güç değeri, santralin anlık (anma) gücünü ifade etmektedir. Bu santralin 24 saat kesintisiz çalıştığı varsayılırsa, günlük enerji üretimi 3.3.5'te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$P_{HES-günlük} = P_{HES} * 24 = 166\ 895\ kWh \quad (3.3.6)$$

$$P_{HES-yıllık} = 1_{MWh} * 160 = 26703\ MWh \quad (3.3.7)$$

Bu değer, Tablo 3.3.1'de verilen debi ve düşü yüksekliğine sahip HES sisteminin tek başına Çifteler ilçesinin enerji ihtiyacını fazlasıyla karşılayabileceğini göstermektedir.

GPBT Heasbı ise denklem 3.3.8 ile gösterilmiştir.

$$GPBT = 0,478_{kgco_2/kWh} * 26703_{MWh} = 12764179\ TonCO_2 \quad (3.3.8)$$

Sistem yılda yaklaşık 12764179 TonCO₂ emisyonunu engellediği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu hesaplama, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin çevresel faydalarını değerlendirmek açısından önemlidir ve sistemin ne kadar sürede fosil kaynaklara karşılık gelen karbon salımını telafi ettiğini göstermektedir.

NÜKLEER (SMR- KÜÇÜK MODÜLER REAKTÖR) ENERJİSİ

Eskişehir'in Çifteler ilçesinde planlanan besi çiftliği ve çevresel enerji ihtiyaçları göz önüne alındığında, geleneksel fosil kaynaklara ve kesintili yenilenebilir kaynaklara alternatif olarak nükleer enerji, özellikle de Küçük Modüler Reaktörler (SMR) önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. SMR sistemleri düşük ilk yatırım maliyeti, esnek kapasite artışı ve yüksek güvenlik seviyeleri ile ön plana çıkmaktadır.

Proje kapsamında günlük enerji ihtiyacının 1174.5 kWh/gün olduğu hesaplanmıştır. Bu enerji talebine göre nükleer reaktör kapasitesi aşağıdaki adımlarla belirlenmektedir. Yıllık enerji ihtiyaç ise denklem 3.4.1'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$E_{yillik} = 1174.5_{kWh/gün} \times 365 = 428642.5_{kWh/yıl} \quad (3.4.1)$$

Bu değer, yaklaşık olarak 428.6 MWh/yıl enerji gereksinimi anlamına gelmektedir.

SMR'ler genellikle 50–300 MW aralığında elektrik üretim kapasitesine sahiptir. Ancak daha küçük (örneğin 10 MW) mikro modüler reaktörler de mümkündür. Hesaplamalarda yüksek kapasite faktörü (CF) sayesinde daha az sayıda reaktörle ihtiyacın karşılanabileceği görülmektedir. Denklem 3.4.2'de ilgili hesaplamalar 60 kWe gücündeki reaktöre göre formalize edilmiştir.

$$N = \frac{Pt_{alep}}{P_{reaktör} * CF} \quad (3.4.2)$$

Burada:

- $P_{talep} = 1174.524/24 \approx 48.9$ kW
- $P_{reaktör} = 60$ kWe
- $CF = 0.90$ (Kapasite Faktörü)

İlgili değerlerler denklem 3.4.3'te yerlerine yerleştirilir.

$$N = \frac{48.9}{60 * 0.9} \approx 0.91 \quad (3.4.3)$$

Sonuç olarak, tek bir 60 kWe kapasiteli SMR, çiftliğin tüm enerji ihtiyacını yıl boyu güvenli bir şekilde karşılayabilir.

Kullanılacak SMR'nin yıllık enerji üretim kapasitesi denklem 3.4.4'te gösterilmiştir.

$$E_{smr} = P \times CF \times 8760 = 473040 \text{ kWh/yıl} \quad (3.4.4)$$

Bu değer, çiftliğin yıllık ihtiyacından (428.6 MWh) yaklaşık %10 daha fazladır. Aradaki enerji fazlası, yedekleme, depolama ya da şebekeye satış amacıyla kullanılabilir.

Toryum, özellikle Erimiş Tuz Reaktörleri (MSR) için ideal bir yakıttır. Türkiye, Eskişehir ve Sivrihisar çevresinde zengin toryum rezervlerine sahiptir. Bu bölgeden çıkarılacak toryumun yakıt olarak kullanılması, projeye yerli kaynak kullanımı, enerji bağımsızlığı ve ekonomik sürdürülebilirlik açısından önemli avantaj sağlayacaktır.

Yapılan teknik ve hesaplamalı analizler sonucunda, SMR sistemleri küçük ölçekli ve sürekli enerji ihtiyacı olan yapılar için ideal çözümlerden biridir. Proje kapsamında kurulacak 60 kWe kapasiteli bir SMR, yalnızca besi çiftliğinin enerji ihtiyacını karşılamakla kalmaz, aynı zamanda bölgesel enerji arz güvenliğine katkı sunabilir.

Bu sistemin çevresel etkilerinin düşük olması, CO₂ salınımı oluşturmaması ve modüler yapısıyla gerektiğinde kapasite artırımına açık olması da projenin geleceği açısından güçlü bir tercih sebebidir.

BİYOKÜTLE ENERJİSİ

Eskişehir'in Çifteler ilçesinde kurulması planlanan besi çiftliği, organik atık potansiyeli açısından biyokütle enerjisi üretimi için son derece elverişli bir yapıdadır. Hayvansal atıklar, özellikle büyükbaş hayvan gübresi, biyogaz üretimi yoluyla elektrik ve ısı enerjisine dönüştürülebilmektedir. Bu sayede hem atık yönetimi sağlanır hem de çiftliğin enerji ihtiyacına sürdürülebilir bir çözüm sunulur.

Öncelikle çiftlikteki büyükbaş hayvan sayısına ve günlük dışkı üretim miktarına göre elde edilebilecek biyogaz hacmi hesaplanır. 300 Baş büyükbaş hayvan ve bir büyükbaş hayvanın günlük dışkı miktarı ≈ 40 kg/gün değerleri için Toplam günlük gübre miktarı denklem 3.5.1'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$M_{gübre} = 300 * 40 = 12000 \frac{kg}{gün} \quad (3.5.1)$$

1 ton (1000 kg) taze büyükbaş gübreden ortalama 25 m³ biyogaz elde edilir. Bu durumda günlük toplam biyogaz miktarı denklem 3.5.2'de gösterilmiştir.

$$V_{biyogaz} = \frac{12000}{1000} * 25 = \frac{300 m^3}{gün} \quad (3.5.2)$$

1m³ biyogaz yaklaşık 6 kWh alt ısı değerinde enerjiye sahip olduğuna göre toplam biyogaz miktarı denklem 3.5.3'de gösterilmiştir.

$$E_{biyogaz} = 300 * 6 = 1800 \frac{kWh}{gün} \quad (3.5.3)$$

Biyogaz jeneratörlerinde elektrik üretim verimi ortalama %38 kabul edilirse günlük enerji üretimi 3.5.4'te hesaplanır.

$$Elektrik = 1800 * 0.38 \frac{kWh}{gün} = 684kWh_{(gün)} \quad (3.5.4)$$

Bu, çiftliğin günlük 1174.5 kWh olan elektrik ihtiyacının yaklaşık %58'ini karşılayabilir.

300 baş büyükbaş hayvanın günlük atıklarından elde edilecek biyogaz ile çiftlikte günlük yaklaşık 684 kWh elektrik ve 720 kWh ısı enerjisi üretilmektedir. Elektrik enerjisi, toplam günlük enerji ihtiyacının %58'ini karşılarken, geri kalan ihtiyacın güneş, rüzgar ya da şebeke destekli sistemlerle tamamlanması mümkündür. Ayrıca elde edilen ısı enerjisi, çiftlik içi süreçlerde kullanılarak genel enerji maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlar. GBPT oranı ise Denklem 3.5.5 ve 3.5.6 ile gösterilmiştir.

$$Elektrik_{yıllık} = 684_{kWh} * 365_{gün} = 249660kWh_{yıllık} \quad (3.5.5)$$

$$GPBT = 0,478 * 249660 = 119337kgCO_2 \quad (3.5.6)$$

Sistem yılda yaklaşık 119337kgCO₂ emisyonunu engellediği sonucuna ulaşılmaktadır. Bu hesaplama, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin çevresel faydalarını değerlendirmek açısından önemlidir ve sistemin ne kadar sürede fosil kaynaklara karşılık gelen karbon salımını telafi ettiğini göstermektedir

OPTİMAL KAYNAK KOMBİNASYONU

Yapılan tüm teknik hesaplamalar sonucunda, besi çiftliğinin günlük enerji ihtiyacını (1174.5 kWh/gün) karşılayabilecek birden fazla yenilenebilir ve alternatif enerji kaynağı tanımlanmıştır. Bu kaynakların her biri üretim kapasitesi, yatırım maliyeti, sürdürülebilirlik düzeyi ve yerel uygunluk açısından farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle, çiftliğin enerji ihtiyacını karşılamak üzere en uygun sistemin belirlenmesi amacıyla teknik ve ekonomik kriterlere dayalı bir optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Güneş enerjisi sistemi, 602 panel kurulumuyla birlikte Aralık ayındaki en düşük radyasyon koşullarında dahi günlük 1174.5 kWh üretim sağlayabilecek şekilde boyutlandırılmıştır. Ancak, bu sistemin gece üretim yapamaması, enerji depolama birimlerinin kurulmasını zorunlu kılmakta ve bu da yatırım maliyetini artırmaktadır. Rüzgar enerjisi sistemi, 16 m/s rüzgar hızında nominal olarak 1 MW güç üretse de, bölgedeki ortalama 7 m/s rüzgar hızında sistem veriminin %8.37 seviyelerinde kalması nedeniyle ekonomik geri dönüş süresi uzamaktadır. Buna karşın, rüzgar türbini günlük yaklaşık 2008 kWh üretim potansiyeline sahip olup, ihtiyacı fazlasıyla karşılayabilmektedir.

Biyokütle sistemi açısından, 300 baş büyükbaş hayvandan günlük elde edilen 12.000 kg gübreden yaklaşık 300 m³ biyogaz üretilmektedir, bu da 1800 kWh enerjiye karşılık gelmektedir. Biyogaz motorlarının %38 elektrik üretim verimi dikkate alındığında, günlük 684 kWh elektrik enerjisi üretilbildiği hesaplanmıştır. Kalan enerji ise ısı olarak değerlendirilebilmekte ve yem kurutma, sıcak su ihtiyacı gibi çiftlik içi uygulamalarda kullanılabilir. Bu açıdan bakıldığında, biyokütle enerjisi yalnızca enerji değil, aynı zamanda atık dönüşümü ve çevresel sürdürülebilirlik açısından da yüksek potansiyel sunmaktadır.

Küçük modüler nükleer reaktör (SMR) sistemleri, sürekli üretim kapasitesi, yüksek kapasite faktörü ve düşük karbon salımıyla dikkat çekmektedir. Örneğin 60 kWe gücündeki bir reaktör, %90 kapasite faktörüyle yıllık yaklaşık 473.040 kWh enerji üretebilmektedir. Bu değer, çiftliğin yıllık enerji ihtiyacını rahatlıkla karşılamakta olup, sistemin kesintisiz ve dış hava koşullarından bağımsız çalışması önemli bir avantajdır. Ancak bu sistemlerin yüksek yatırım maliyeti ve lisanslama süreçleri, özellikle küçük ölçekli projelerde uygulanabilirliğini sınırlayabilmektedir.

Hidroelektrik sistemler açısından değerlendirildiğinde, Sakarya Başı bölgesinde 158 m³/s debi ve 30 m düşü yüksekliğiyle teorik olarak 41.723 kWh anlık güç üretilmekte, bu da günlük 1 MWh'nin üzerinde bir enerjiye karşılık gelmektedir. Bu miktar, yalnızca çiftliğin değil, ilçe genelinin enerji ihtiyacını dahi karşılayabilecek düzeydedir. Ancak su debisi, topografya ve izin süreçleri gibi yerel faktörlerin dikkatle değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tüm bu veriler doğrultusunda yapılan değerlendirmede, teknik, ekonomik ve çevresel yönleriyle en uygun çözümün biyokütle ve güneş enerjisinin hibrit olarak kullanılması olduğu sonucuna varılmıştır. Biyokütle sistemiyle 684 kWh, güneş enerjisiyle ise 350 panel kullanılarak yaklaşık 490 kWh üretilmektedir; böylece günlük toplam enerji üretimi 1174 kWh seviyelerine ulaşmaktadır. Bu yapı, hem gece-gündüz üretim dengesini sağlar hem de yatırım ve işletme maliyetleri açısından daha uygulanabilir bir seçenek sunar. Üstelik biyogaz sistemi, atık yönetimini de çözüme kavuşturduğundan çevresel sürdürülebilirlik açısından da güçlü bir temele sahiptir.

Bu hibrit model, aynı zamanda ilerleyen yıllarda çiftlik ölçeğinin büyütülmesi durumunda sistemin modüler olarak genişletilmesine de olanak tanımaktadır. Böylece, hem ilk yatırım yükü azaltılmış olur hem de enerji üretim sistemi zamana yayılmış şekilde kademeli olarak geliştirilebilir. Enerji güvenliği, ekonomik verimlilik ve çevresel sürdürülebilirliğin birlikte sağlandığı bu yaklaşım, yerel ölçekli tarım ve hayvancılık işletmeleri için örnek teşkil edebilecek niteliktedir.

ESKİŞEHİR ÇİFTELER SWOT ANALİZİ

Yapılan kapsamlı teknik analizler ve saha verileri doğrultusunda, Eskişehir ili için gerekli SWOT analizi yapılmıştır. Bu kapsamda güçlü yönler, zayıf yönler, fırsatlar ve tehditler aşağıda başlıklar halinde gösterilmiştir:

Güçlü Yönler:

- Güneş enerjisi gündüz saatlerinde üretim sağlarken, biyokütle sistemi gece ve kapalı hava koşullarında üretime devam ederek enerji sürekliliği kazandırır.
- Kurulan hibrit sistem, GES ile 490kWh, biyokütle ile 684 kWh olmak üzere toplamda günlük gereken enerji ihtiyacını minimum koşullarda bile sağlayabilmektedir.
- Biyokütleden elde edilen 720 kWh ısı enerjisi ile de yem kurutma, sıcak su sağlama gibi çiftlik ihtiyaçları için gerekli uygulamaları sağlayabiliriz.
- Eskişehir ilindeki hayvancılık ve tarım sektörünün gelişmiş olmasının biyokütle tesisini seçimimizdeki etkisi.
- Hayvansal atıklardan elde edilen biyogaz sayesinde çevresel kirlilik azaltılır, sera gazı salımı düşürülür.
- Hibrit sistemdeki 2 santralin de şebekeye bağlı kalmaması yerel kaynakların değerlendirmesine yani enerji bağımsızlığına işaretler.
- Sistemler birbirinden bağımsız çalıştığından dolayı gerek bakımları gerekse büyütme/küçültme faaliyetleri esnek bir biçimde sürdürülebilir.

Zayıf Yönler:

- Güneş panellerinin yalnızca gündüz çalışması depolama ihtiyacını doğurur ve batarya sistemleri kurulan sistemin maliyetini artırır.
- İhtiyacımızı karşılasa da biyogaz motorlarının verimi ~%38 civarındadır. Bu da enerji dönüşüm kısmında enerji kaybına neden olur.
- Hayvanlardan çıkan atıkların toplanması, işlenmesi ve depolanması operasyonel zorluklar doğururken, yanında belli başlı bakım süreçleri gerektirebilir.
- GES için gerekli arazi büyüklüğü, özellikle tarım arazileriyle çakıştığında 5403 gibi hukuksal ve çevresel engeller doğurabilir.
- Eskişehir ilinin yüksek rakımlı bölgelerinde rüzgar hızının 7 m/s'ye ulaşmasına rağmen sistem verimi yaklaşık %8.37'lerde seyir ettiği için bu durum yatırımın geri dönüş süresini oldukça uzatmaktadır.

Fırsatlar:

- Her iki sistem için de YEKA ve YEKDEM kapsamında devlet teşvikleri, sabit fiyat (10 yıl boyunca), arazi tahsis ve alım garantisi gibi durumlar mevcuttur.
- Atıkların enerjiye dönüştürülmesi ile karbon ayak izi azaltılır, bu durum karbon kredisi edinme hakkını ve neticesinde de projeye destek imkânı sunulmasını doğurabilir.
- Şebekeye 10 yıl boyunca elektrik üretme sözü verilerek fazla enerjinin satışı işletme için ek gelir yaratabilir.

- Bölge sismik açıdan elverişli olup, kurulan hibrit sistem AFAD ve Jeofizik Mühendisler Odası'na göre bir tehlike teşkil etmemektedir.
- Bölgedeki kırsal kalkınmaya katkı sağlayarak yerel istihdam oluşturulur. Hayvancılık ve enerji ortaklığından doğan yeni iş olanakları oluşur.
- Oluşturulan hibrit model güneş ve biyokütle kaynaklı organik bir yapıda olduğundan dışarıdan gelecek etkilere karşı (deprem, sel, heyelan vb.) oluşacak risklerin önüne geçer.

Tehditler:

- Biyokütle sistemleri çevresel açıdan koku, sinek, sızıntı gibi sosyal sorunlara yol açabilmekle birlikte yerel halkın tepkileri sosyal kabulü zorlaştırabilirken ÇED süreci zorluk yaratabilir.
- Enerji projeleri için gerekli olan izin, ruhsat ve ÇED süreçleri zaman alabilir; özellikle tarım arazilerinin korunmasına yönelik olan mevzuatlar (5403, 3194, 2872 vb.) projeyi kısıtlayabilir.
- GES sistemleri, iklim değişiklikleri ve güneş ışınlamındaki belirsizliklerden etkilenip, uzun vadedeki planlamaları sektöre ugratabilir.
- Enerji dönüşümüne yönelik yeni çıkan teknolojiler, mevcut sistemi demode hale getirebilir.

4. MATLAB KOD ÇALIŞMALARI

Bir önceki başlıkta yapılan hesaplamaların matlab kod karşılığı aşağıda verilmiştir.

```
clc;
clear all;
% GÜNEŞ ENERJİSİ HESABI
lat = pi/180 * 39.3820
GSC = 1361;
ayin_gunleri = [31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31];
baslangic_gunu = 1;
for aylar = 1:12
    % Başlangıç değerleri
    H0_toplam = 0;
    S0_toplam = 0;
    for nday = baslangic_gunu : baslangic_gunu + ayin_gunleri(aylar) - 1
        dec = 23.45 * sin(pi/180 * (nday + 284) * 360/365) * pi/180; % Deklinasyon açısı
```

```

ws = acos(-tan(lat) * tan(dec)); % Güneş açısı

R = (1 + 0.033 * cos(2 * pi * nday / 365));

H0_toplam = H0_toplam + (24/pi * GSC * R * (cos(lat) * cos(dec) * sin(ws) + ws * sin(lat) *
sin(dec))) / 1000;

S0_toplam = S0_toplam + (2/15 * ws * 180/pi);

end

H0_ort_list(aylar) = H0_toplam / ayin_gunleri(aylar);

S0_ort_list(aylar) = S0_toplam / ayin_gunleri(aylar);

fprintf('%s Ayı İçin Ortalama Değerler:\n', char(datetime(2022, aylar, 1, 'Format', 'MMMM')));

fprintf('(H0): %.2f kWh/m²\n', H0_ort_list(aylar));

fprintf('(S0): %.2f saat\n', S0_ort_list(aylar));

fprintf('\n');

baslangic_gunu = baslangic_gunu + ayin_gunleri(aylar);

end

```

%% RÜZGAR ENERJİSİ HESABI

```

hava_kutle=1.225;      % Hava yoğunluğu (kg/m³)

kanat_yaricap=29;      % Kanat yarıçapı (m)

ruzgar_hizi=7;         % Ortalama rüzgar hızı (m/s)

guc_katsayisi=0.1509;  % Cp değeri

alan=pi*kanat_yaricap^2; % Kanat alanı (m²)

guc_ruzgar=0.5*hava_kutle*alan*ruzgar_hizi^3*guc_katsayisi; % Teorik güç (W)

enerji_ruzgar_gun=guc_ruzgar*24/1000;          % Günlük enerji (kWh)

fprintf('Rüzgar türbini günlük enerji üretimi: %.2f kWh\n', enerji_ruzgar_gun);

```

%% HİDROELEKTRİK ENERJİ HESABI

```

debi=158;              % Debi (m³/s)

su_kutle=997;          % Su yoğunluğu (kg/m³)

```



```

yercekimi=9.81;    % Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
yukseklık=5;    % Düşü yüksekliği (m)
verim_hidro=0.90;    % Sistem verimi

guc_hidro=debi*su_kutle*yercekimi*yukseklık*verim_hidro; % Teorik güç (W)
enerji_hidro_gun=guc_hidro*24/1000;    % Günlük enerji (kWh)

fprintf('Hidroelektrik santralin günlük enerji üretimi: %.2f kWh\n', enerji_hidro_gun);

%% BİYOKÜTLE ENERJİSİ HESABI
hayvan_sayisi=300;
gunluk_gubre=hayvan_sayisi*40;    % Günlük toplam gübre (kg)
biyogaz_hacim=(gunluk_gubre/1000)*25;    % Toplam biyogaz üretimi (m^3)
biyogaz_enerji=6;    % 1 m^3 biyogaz enerji değeri (kWh)
verim_biyokutle=0.38;    % Jeneratör elektrik üretim verimi

toplam_enerji=biyogaz_hacim*biyogaz_enerji;    % Toplam enerji potansiyeli (kWh)
elektrik_enerjisi=toplam_enerji*verim_biyokutle; % Net elektrik üretimi (kWh)

fprintf('Biyokütle sistemi günlük elektrik üretimi: %.2f kWh\n', elektrik_enerjisi);

```

5. HUKUKSAL ETKİLERİ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgesel düzeyde değerlendirilmesi, yalnızca teknik ve ekonomik bir mesele değil, aynı zamanda ciddi bir hukuki süreci de beraberinde getirmektedir. Eskişehir ili özelinde hazırlanan bu çalışma, güneş, rüzgar, biyokütle, hidroelektrik, hidrojen ve küçük modüler nükleer reaktör (SMR) gibi farklı enerji türlerinin potansiyelini ortaya koyarken, bu kaynakların hayata geçirilmesi için izlenmesi gereken yasal yollar ve olası hukuki riskler dikkate alınmalıdır. Türkiye'de enerji projeleri özellikle 5346 sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu, 2872 sayılı Çevre Kanunu ve 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu çerçevesinde değerlendirilir. Bu kanunlar hem lisanslı hem de lisanssız üretim tesisleri için gerekli izin, ruhsat ve çevresel değerlendirme prosedürlerini düzenler.

Öncelikle projeye konu olan enerji türlerine göre hukuki süreçlerin ayrıştığı unutulmamalıdır. Örneğin, 1 MW altında kalan güneş ve rüzgar projeleri için Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik kapsamında başvuru yapılması yeterliyken, bu sınırın üzerindeki yatırımlar için Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından lisans alınması gereklidir. Aynı zamanda, kurulacak santrallerin arazi seçiminden montajına kadar olan süreçte 3194 sayılı İmar Kanunu ve 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu kapsamında tarım alanlarının korunması ve gerekli imar planı değişikliklerinin yapılması zorunludur. Eskişehir gibi tarımsal üretimin yoğun olduğu bir ilde, özellikle biyokütle ve güneş santrali gibi büyük arazi ihtiyacı duyan projelerde bu konu kritik hale gelir.

Tüm enerji tesisleri için geçerli olan en temel yükümlülüklerden biri Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) sürecidir. ÇED Yönetmeliği kapsamında, proje büyüklüğüne göre “ÇED gereklidir” veya “ÇED gerekli değildir” kararı alınması zorunludur. Özellikle rüzgar türbinlerinin kuş göç yollarına, biyokütle tesislerinin koku yayılımına ve hidroelektrik santrallerin su rejimine olan etkileri, projenin reddine dahi neden olabilecek unsurlar arasında yer alır. Ayrıca, SMR gibi yüksek güvenlik gerektiren teknolojilerde yalnızca çevresel değil aynı zamanda nükleer güvenlik açısından da Nükleer Düzenleme Kurumu (NDK) tarafından değerlendirme yapılır. 5710 sayılı Nükleer Güç Santrallerinin Kurulması Hakkında Kanun uyarınca her nükleer tesis için ön lisans, işletme lisansı ve güvenlik belgeleri ayrı ayrı alınmak zorundadır.

Yasal süreçlerde karşılaşılabilecek risklerin başında, izin süreçlerinin tamamlanamaması, ÇED raporlarının olumsuz sonuçlanması, halkın itirazı sonucu projenin yargıya taşınması ve teknik kriterlerin karşılanmaması gelmektedir. Özellikle biyokütle tesislerinde atık yönetimi ve hidrojen üretiminde patlayıcı maddelerin depolanması gibi çevresel ve iş güvenliği riskleri oldukça yüksektir. Bu noktada İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu (6331) ve Tehlikeli Kimyasallar Yönetmeliği devreye girer. SMR gibi nükleer tabanlı yatırımlar ise atık yönetimi ve toplumsal kabul açısından ciddi hukuki ve sosyolojik sınavlardan geçmek zorundadır.

Bununla birlikte, Türkiye’de yenilenebilir enerji yatırımları önemli yasal teşviklere de sahiptir. Özellikle Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) modeli, yatırımcıya Hazine arazisi tahsisi ve alım garantisi sunmakta; aynı zamanda YEKDEM (Yenilenebilir Enerji Kaynakları Destekleme Mekanizması) ile belirli bir süre boyunca sabit fiyatla elektrik satışına olanak tanımaktadır. Lisanssız üretim yapanlar ise fazla elektriği şebekeye satarak gelir elde edebilir. Ayrıca, organize sanayi bölgelerinde (OSB) gerçekleştirilen projelerde ilave teşvikler ve vergisel avantajlar söz konusudur.

Sonuç olarak, Eskişehir için önerilen enerji projeleri, sadece çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda yerel ekonomik kalkınmayı da destekleyebilecek potansiyele sahiptir. Ancak bu potansiyelin hayata geçmesi, proje geliştirme sürecinin başından itibaren hukuki danışmanlıkla yürütülmesine, izin ve ruhsat süreçlerinin eksiksiz tamamlanmasına ve kamuoyunun doğru bilgilendirilmesine bağlıdır. Aksi halde, çok yönlü bir fayda sağlayabilecek bu projeler, yalnızca hukuki eksiklikler veya yanlış yönetilen süreçler nedeniyle uygulanamaz hale gelebilir. Bu nedenle teknik ve ekonomik fizibilite kadar, hukuki fizibilite de proje başarısında belirleyici bir rol oynamaktadır.

6. ÇEVRESEL ETKİLER

Enerji üretiminin çevresel etkileri, yalnızca doğrudan salımlar ve atıklarla sınırlı değildir; aynı zamanda ekosistem dengesi, arazi kullanımı, su kaynakları, biyolojik çeşitlilik ve yerleşim düzeni gibi pek çok alanı etkileyen çok katmanlı bir süreçtir. Eskişehir ili özelinde hazırlanan yenilenebilir enerji yatırımı raporu, özellikle güneş, rüzgar, biyokütle, hidrojen, hidroelektrik ve küçük modüler nükleer reaktör (SMR) sistemlerini içeren bütüncül bir yaklaşımı benimsemektedir. Bu yaklaşım, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) başta olmak üzere Türkiye Cumhuriyeti Anayasası'nın 56. maddesi gereği bireylere sağlıklı ve dengeli bir çevrede yaşama hakkı tanınmasını da doğrudan ilgilendiren kapsamlı bir çevresel sorumluluk gerektirir.

Güneş ve rüzgar enerjisi sistemleri, sera gazı salımı yapmaksızın elektrik üretilmesi sayesinde iklim değişikliğiyle mücadelede kritik rol oynar. Şekil6.1'de de görüldüğü üzere BM'nin 7. (Erişilebilir ve Temiz Enerji), 13. (İklim Eylemi) ve 15. (Karasal Yaşam) amaçları bu tür sistemleri teşvik eder. Ancak bu sistemlerin geniş arazi kullanımı ihtiyacı, özellikle tarım alanlarının kaybına, flora-fauna dengesinin bozulmasına ve yerel peyzajın dönüşümüne neden olabilir. Eskişehir gibi tarımsal üretimin güçlü olduğu bir bölgede bu tür yatırımlar, 5403 sayılı Toprak Koruma ve Arazi Kullanımı Kanunu uyarınca değerlendirilmelidir. Gölgeleme, yüzeysel erozyon ve mikro iklim değişiklikleri gibi etkiler de özellikle geniş ölçekli GES (Güneş Enerjisi Santrali) projelerinde dikkatle analiz edilmelidir.



Şekil 6.1 birleşmiş milletler sürdürülebilir kalkınma hedefleri

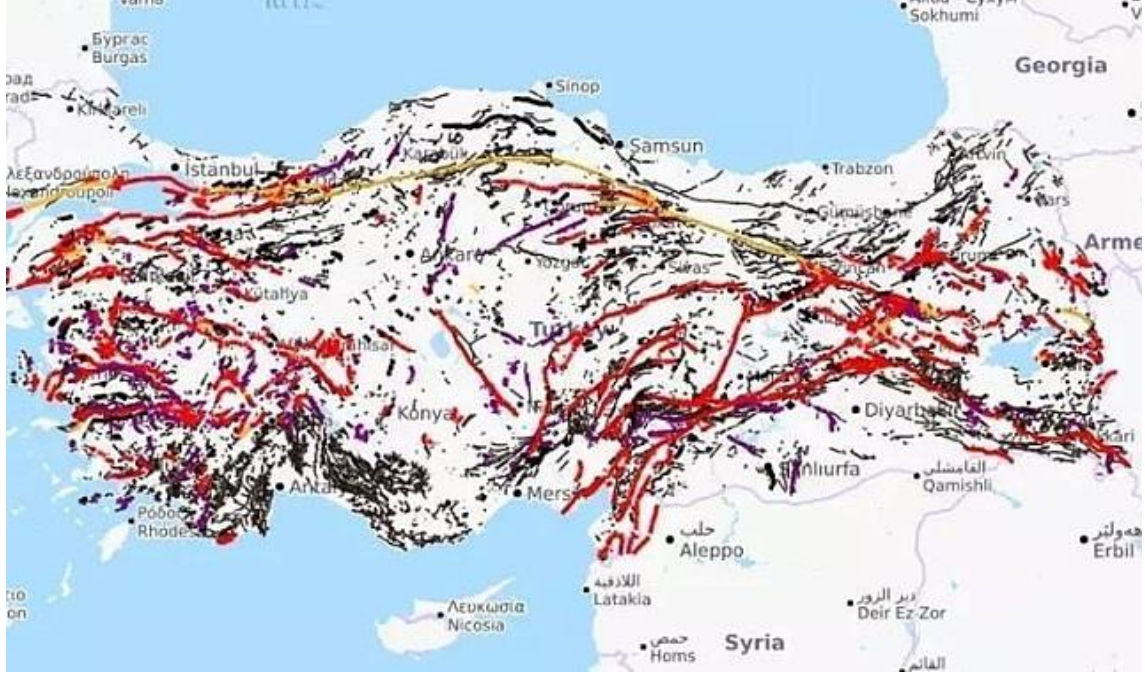
Hidroelektrik sistemler, özellikle küçük ölçekli mikro-HES formatında, doğru planlandığında çevreyle uyumlu olabilir. Ancak nehirlerin doğal akışının değiştirilmesi, balık göç yollarının kesintiye uğraması, akarsu ekosistemlerinde tahribata yol açabilir. Türkiye'de bu tür projeler için Çevresel Etki Değerlendirmesi (ÇED) Yönetmeliği uyarınca, su rejimi değişiklikleri ve ekolojik akış değerleri bilimsel olarak incelenmek zorundadır. Eskişehir'de Porsuk ve Sakarya Nehri gibi sınırlı su kaynaklarının

bulunduğu bölgelerde, sürdürülebilir su yönetimi ilkesine aykırı uygulamalar, hem tarımsal faaliyetleri hem de yerel halkın geçim kaynaklarını olumsuz etkileyebilir.

SMR teknolojisi ise geleneksel nükleer sistemlere kıyasla daha düşük radyoaktif atık üretse de, hâlâ Nükleer Atık Yönetimi ve radyasyon güvenliği açısından çok yüksek standartlara bağlıdır. Türkiye’de henüz bu konuda olgunlaşmış bir altyapı bulunmamaktadır. Nükleer reaktörlerin çevre üzerindeki etkileri yalnızca atıkla sınırlı değildir; soğutma sistemlerinin yer altı su kaynaklarına etkisi, olası sızıntılar, ve çevresel izleme süreçlerinin yetersizliği, uzun vadeli tehditler oluşturabilir. Bu nedenle, 5710 sayılı Nükleer Güç Santralleri Kanunu ve Nükleer Güvenlik Yönetmeliği uyarınca detaylı izleme sistemleri ve acil müdahale planları tesis edilmeden bu tür yatırımların hayata geçirilmesi büyük risk taşır.

Yenilenebilir enerji projelerinde çevresel değerlendirmelerin yalnızca flora, fauna veya toprakla sınırlı kalmaması, aynı zamanda afet riski gibi doğal tehlikeleri de kapsamı gerekmektedir. Bu bağlamda, deprem riski enerji tesislerinin güvenliği açısından kritik bir faktör olup, özellikle nükleer enerji gibi yüksek güvenlik gerektiren sistemlerde detaylı analizler yapılmalıdır. Türkiye genelinde deprem kuşaklarına göre yapılan sınıflandırmada Eskişehir ili, orta düzeyde risk taşıyan 3. derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Bu durum, enerji altyapıları için deprem mühendisliği açısından daha az önlem gerektiren bir yapı ortamı sunmakta ve yatırım yapılabilirlik açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Özellikle Küçük Modüler Reaktör (SMR) gibi yüksek teknoloji içeren sistemlerin yer seçiminde sismik tehlike haritaları ve zemin etütleri kritik rol oynamaktadır. Eskişehir’in fay hatlarına uzaklığı ve zemin yapısının görece stabil oluşu, SMR gibi nükleer sistemlerin güvenli kurulumu açısından teknik bir uygunluk sunmaktadır. Benzer şekilde güneş ve rüzgar enerji sistemleri için de ekipmanların deprem esnasında zarar görme ihtimali düşüktür; doğru montaj teknikleri ve yönetmeliklere uygun tasarım ile bu riskler daha da minimize edilebilir. Ayrıca, Jeofizik Mühendisleri Odası ve AFAD tarafından yapılan saha araştırmaları da bölgedeki enerji yatırımları için ciddi bir sismik engel bulunmadığını ortaya koymaktadır. (Bkz. Şekil 6.2)



Şekil 6.2 diri fay haritası

Bütün bu değerlendirmeler doğrultusunda, Eskişehir’de planlanan yenilenebilir enerji projeleri, çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir fırsat sunmaktadır. Bu projeler, karbon salımının azaltılması, yerel istihdamın artırılması, enerji bağımsızlığının güçlendirilmesi ve doğal kaynakların verimli kullanımı gibi birçok alanda katkı sunar. Ancak, her bir enerji türü için uygulanacak projelerin çevresel etkileri dikkatle analiz edilmeli, gerekli ÇED süreçleri eksiksiz tamamlanmalı, halk bilgilendirilmeli ve ilgili kamu kurumlarının izleme-gözlem mekanizmaları aktif hale getirilmelidir.

SONUÇ

Bu raporda, Eskişehir ilinin yerel enerji potansiyeli; güneş, rüzgar, biyokütle, hidroelektrik, hidrojen ve nükleer (SMR) sistemler bağlamında teknik, çevresel ve hukuksal boyutlarıyla çok yönlü biçimde incelenmiştir. Eskişehir'in jeopolitik konumu, iklimsel avantajları ve tarımsal üretim kapasitesi, yenilenebilir enerji yatırımları için güçlü bir zemin oluşturmaktadır. Çifteler ilçesinde kurulması planlanan örnek bir besi çiftliği üzerinden yapılan enerji ihtiyacı hesaplamaları, bu tür yapılar için sürdürülebilir ve yerli kaynaklara dayalı enerji çözümlerinin fizibilitesini somut biçimde ortaya koymuştur.

Teknik analizler, özellikle güneş ve biyokütle kaynaklarının hibrit bir yapı ile birleştirilmesinin, hem enerji arz güvenliği hem de maliyet etkinliği açısından avantaj sağladığını göstermiştir. Rüzgar ve hidroelektrik enerjileri ise daha geniş ölçekli yatırımlarla desteklenebilecek potansiyele sahiptir. SMR teknolojileri uzun vadeli ve stratejik yatırımlar açısından umut verici olsa da, hukuki, toplumsal ve çevresel açıdan dikkatli bir planlama gerektirmektedir. Bu bağlamda, proje bileşenleri hem mevcut yasal düzenlemelerle (5346, 2872, 5710 sayılı kanunlar gibi) hem de uluslararası sürdürülebilirlik hedefleriyle (BM Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları) uyumluluk göstermelidir.

Çevresel açıdan bakıldığında, enerji üretiminin sadece ekonomik değil, ekolojik etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerektiği açıktır. Arazi kullanımı, su kaynakları, biyolojik çeşitlilik, gürültü ve atık yönetimi gibi parametreler, her enerji türü için ayrı ayrı değerlendirilmiş; bu değerlendirmeler ışığında çevreyle uyumlu, düşük etkili ve toplumun kabul edebileceği modeller önerilmiştir. Aynı şekilde, hukuksal süreçlerin eksiksiz ve şeffaf yürütülmesi, uzun vadede projenin sürdürülebilirliğini ve uygulanabilirliğini garanti altına alacaktır.

Yapılan analizler sonucunda, Eskişehir ilinde özellikle güneş ve biyokütle kaynaklarının öne çıktığı, rüzgar potansiyelinin ise uygun alanlarda doğru türbin seçimiyle değerlendirilebileceği görülmüştür. Jeotermal kaynaklar elektrik üretiminden ziyade ısıtma amaçlı kullanıma daha uygundur. Gelişmekte olan hidrojen ve küçük modüler reaktör (SMR) teknolojileri, üniversite-sanayi iş birlikleriyle yürütülecek araştırma ve pilot projelerle desteklenmelidir. Bu kaynakların her biri için yerel koşullara özgü stratejiler geliştirilmesi, enerji arz güvenliği, çevresel sürdürülebilirlik ve ekonomik verimlilik açısından önemli fırsatlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu raporda önerilen yaklaşım yalnızca belirli bir çiftliğin enerji ihtiyacına çözüm üretmekle sınırlı kalmamakta; aynı zamanda kırsal kalkınmayı, çevresel sürdürülebilirliği ve yerli kaynakların stratejik kullanımını önceleyen bir enerji politikası önerisi sunmaktadır. Bu bağlamda, benzer modellerin diğer ilçelerde ve farklı sektörlerde yaygınlaştırılması, Türkiye'nin enerji dönüşüm sürecine yerelden güçlü bir katkı sağlayacaktır.

TEŐEKKÖR

Bu raporun hazırlanması sürecinde bizlere rehberlik eden, yenilenebilir ve sürdürülebilir enerji sistemleri konusundaki bilgi birikimi ve yönlendirmeleriyle çalışmamıza bilimsel bir derinlik kazandıran değerli hocamız Doç. Dr. Ceyda Aksoy Tırmıkçı'ya içten teşekkürlerimizi sunarız. Kendisinin ders kapsamında sunduğu akademik çerçeve, bu çalışmanın hem teknik hem de çevresel boyutlarda kapsamlı bir şekilde şekillenmesini sağlamıştır.

Ayrıca, rapor kapsamında teknik ve hukuksal analizlerimizin geliştirilmesine katkıda bulunmak amacıyla bilgilendirme toplantısı gerçekleştiren PROWATT firmasına da teşekkür ederiz. Sektörel bakış açıları ve gerçek dünya uygulamalarına dair paylaşımları, teorik bilgilerimizi pratikle bütünleştirme noktasında bizler için oldukça değerli olmuştur.

Hazırlamış olduğumuz bu raporun, sürdürülebilir enerjiye yönelik farkındalık oluşturmaya ve gelecekte benzer projelerin geliştirilmesine katkı sağlamasını temenni ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Climate Transparency, Turkey Climate Transparency Report 2020, 2020. [Online]. Available: <https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2020/11/Turkey-CT-2020-WEB.pdf>
- [2] S. Erat, A. Telli, O. M. Ozkendir, and B. Demir, "Turkey's energy transition from fossil-based to renewable up to 2030: milestones, challenges and opportunities," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 23, pp. 401–412, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01949-1>
- [3] C. Erdin and G. Ozkaya, "Turkey's 2023 energy strategies and investment opportunities for renewable energy sources: site selection based on ELECTRE," *Sustainability*, vol. 11, no. 7, Art. 2136, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su11072136>
- [4] O. Gulaydin and M. Mourshed, "Net-zero Turkey: Renewable energy potential and implementation challenges," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 87, p. 101744, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101744>
- [5] International Energy Agency, *Renewables 2020: Analysis and Forecast to 2025*, IEA, Paris, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2020>
- [6] International Energy Agency, *Energy Policy Review: Turkey 2021*, IEA, Paris, Mar. 2021. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/cc499a7b-b72a-466c-88de-d792a9daff44/Turkey_2021_Energy_Policy_Review.pdf
- [7] International Renewable Energy Agency, *Renewable Energy Statistics 2020*, IRENA, Abu Dhabi, 2020. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020>
- [8] Presidency of Strategy and Budget, Republic of Turkey, *Eleventh Development Plan 2019–2023*, Ankara, 2019. [Online]. Available: https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/Eleventh_Development_Plan_2019-2023.pdf
- [9] Republic of Turkey Ministry of Energy and Natural Resources, *National Energy Efficiency Action Plan 2017–2023*, Ankara, 2017. [Online]. Available: [https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/National%20Energy%20Efficiency%20Action%20Plan%20\(NEEAP\)%202017-2023%20\(EN\).pdf](https://policy.asiapacificenergy.org/sites/default/files/National%20Energy%20Efficiency%20Action%20Plan%20(NEEAP)%202017-2023%20(EN).pdf)
- [10] Ö. B. Soylu, M. Türel, D. B. Lorente, and M. Radulescu, "Evaluating the impacts of renewable energy action plans: a synthetic control approach to the Turkish case," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, Art. e25902, Apr. 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25902>
- [11] The World Bank, *Turkey's Energy Transition: Milestones and Challenges*, Washington, DC, 2015. [Online]. Available: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/249831468189270397/pdf/ACS14951-REVISED-Box393232B-PUBLIC-EnergyVeryFinalEN.pdf>
- [12] C. A. Aksoy Tirmıkçı, "Emerging actions and energy strategies for sustainable development of Sakarya City, Turkey: A SWOT analysis," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2022, Art. ID 7596872, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/7596872>

- [13] A. E. Şentürk, "Exploring of biomass energy specific to Turkey and on a global scale," *Int. J. Renewable Energy Res.*, vol. 13, no. 3, pp. 1180–1193, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.20508/ijrer.v13i3.14085.g8790>
- [14] G. E. Guzey and B. Önoz, "Turkey's hydropower potential in the near future and the possible impacts of climate change—A case study of the Euphrates–Tigris Basin," *Climate*, vol. 12, no. 10, Art. no. 156, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/cli12100156>
- [15] C. Dumrul, F. Bilgili, F. Zarali, Y. Dumrul, and Z. Kılıçarslan, "The evaluation of renewable energy alternatives in Turkey using intuitionistic-fuzzy EDAS methodology," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 31, no. 10, pp. 15503–15524, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31816-7>
- [16] E. Ayyıldız, B. Yıldırım, M. Erdoğan, and N. Aydın, "Strategic site selection methodology for small modular reactors: A case study in Türkiye," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 215, p. 115545, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115545>
- [17] Y. Erden Topal, Ö. K. Özer, and G. Karakaya, "The evolution of Turkish solar energy research network in three periods," *Renew. Energy*, vol. 244, p. 122623, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122623>
- [18] Y. Furuncu, "PESTEL and SWOT analysis of hydrogen economy in Turkey," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 113, pp. 161–169, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.408>
- [19] H. Soğukpınar, İ. Bozkurt, S. Oyucu, and A. Aksoz, "Unveiling the wind energy future of Türkiye with policies, technologies and potential," *Heliyon*, vol. 11, no. 4, e42592, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42592>
- [20] A. Demirbaş and R. Bakış, "Energy from Renewable Sources in Turkey: Status and Future Direction," *Energy Sources*, vol. 26, no. 5, pp. 473–484, 2004. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00908310490429759>
- [21] M. Tunç, U. Camdalı, T. Liman, and A. Değer, "Electrical energy consumption and production of Turkey versus world," *Energy Policy*, vol. 34, no. 17, pp. 3284–3292, 2006. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.06.023>
- [22] E. Erdoğan, "An exposé of bioenergy and its potential and utilization in Turkey," *Energy Policy*, vol. 36, no. 6, pp. 2182–2190, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.041>