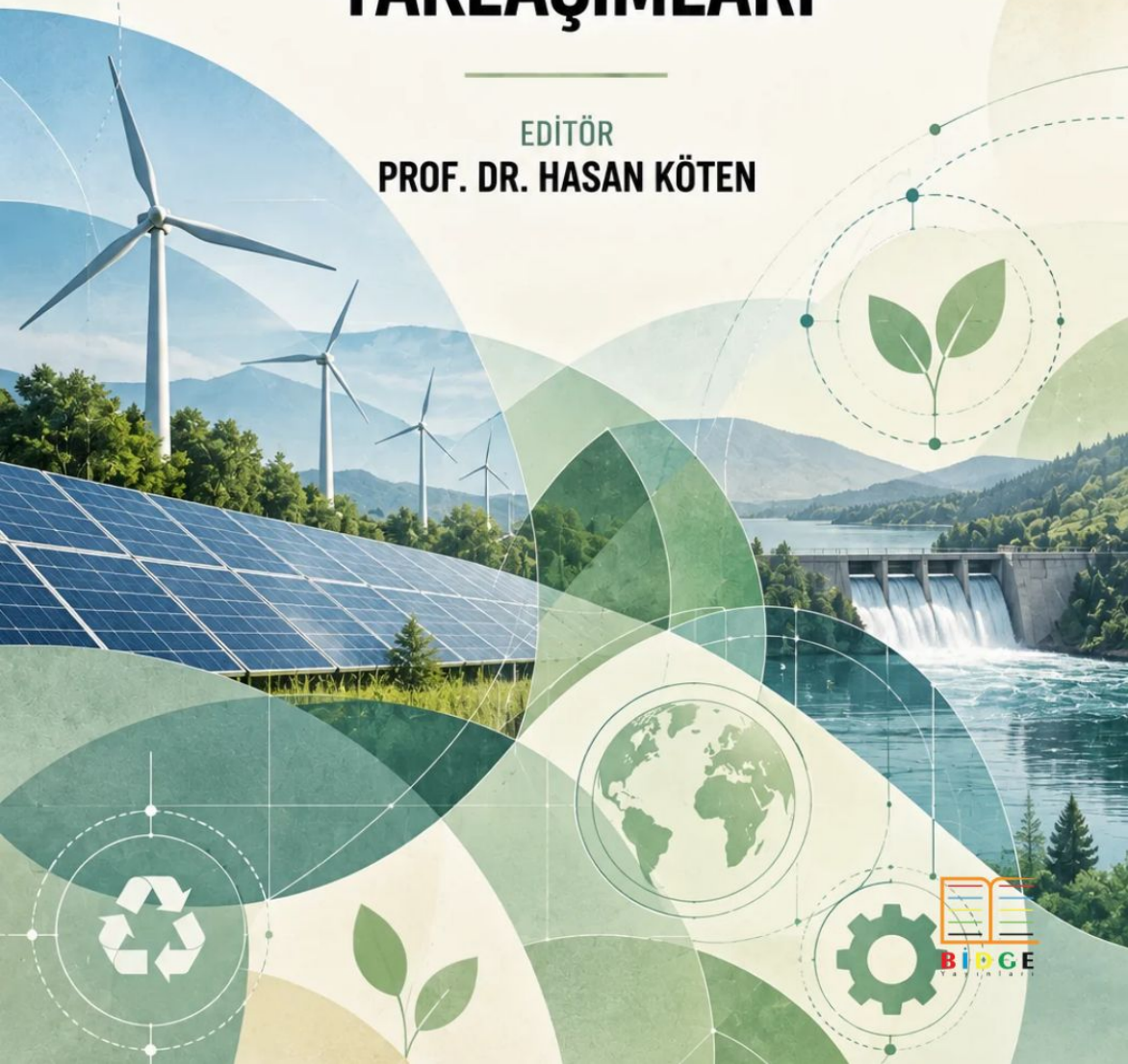
SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ VE KAYNAK YÖNETİMİNDE GÜNCEL MÜHENDİSLİK YAKLAŞIMLARI

EDİTÖR
PROF. DR. HASAN KÖTEN



BİDGE Yayınları

BİDGE Yayınları

Sürdürülebilir Enerji ve Kaynak Yönetiminde Güncel Mühendislik Yaklaşımları

Editör: Prof. Dr. HASAN KÖTEN

ISBN: 978-625-5436-07-8

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

İÇİNDEKİLER

ELAZIĞ İLİNİN BİYOKÜTLE ENERJİ POTANSİYELİNİN ENERJİ ÜRETİMİ VE BÖLGESEL KALKINMA AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ 1

RASİM BEHÇET, FARUK ORAL

GÜNEŞ ENERJİSİ DESTEKLİ HİBRİT KURUTUCUDA KÜLTÜR MANTARLARININ FARKLI SICAKLIKLARDA KURUTULMASI VE ELEKTRİK TÜKETİMİ KAYNAKLI KARBON EMİSYONLARININ BELİRLENMESİ 47

ELİF TURNA, BENGİ ŞANLI

BAHÇE SULAMASINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR YAĞMUR SUYU HASADI 66

CANAN CİMŞİT, ELİF ÖĞÜT

TÜRKİYE'NİN ENERJİ GÜVENLİĞİ ÇERÇEVESİNDE ULUSLARARASI DOĞAL GAZ POLİTİKALARININ VE ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ ODAKLI ULUSAL YASAL DÜZENLEMELERİN ANALİZİ 73

ÖZGE KAPLAN, SELÇUK SARIKOÇ

BÖLÜM 1

ELAZIĞ İLİNİN BİYOKÜTLE ENERJİ POTANSİYELİNİN ENERJİ ÜRETİMİ VE BÖLGESEL KALKINMA AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

RASİM BEHÇET[1]
FARUK ORAL[2]

Giriş

Dünya nüfusundaki artış, kentleşme, sanayileşme ve ekonomik faaliyetlerin genişlemesi, küresel ölçekte enerji talebinin yükselmesine neden olmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) verilerine göre küresel enerji talebi 2023 yılında yaklaşık %2 oranında artmış ve bu artışın önemli bir bölümü gelişmekte olan ve yükselen ekonomilerden kaynaklanmıştır. Aynı dönemde enerji talebindeki artışın yaklaşık üçte ikisinin fosil yakıtlarla karşılanması, enerji kaynaklı karbon dioksit (CO_2) emisyonlarının da yüksek seviyelerde seyretmesine neden olmuştur (International Energy Agency [IEA], 2024). Bu durum, enerji arz güvenliğinin sağlanmasıyla birlikte sera gazı emisyonlarının azaltılması ve

[1]Prof. Dr.,İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000 0002 6897 3066
[2]Doç. Dr., Bitlis Eren Üniversitesi Müh. Mim. Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0002-4114-0785

düşük karbonlu enerji sistemlerine geçişin hızlandırılmasını önemli bir küresel politika konusu hâline getirmiştir (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022). Yenilenebilir enerji yatırımlarındaki hızlı artış da bu dönüşümün temel unsurlarından biri olmuş; yenilenebilir elektrik üretim kapasitesindeki büyüme, enerji sistemlerinin daha düşük karbonlu bir yapıya dönüştürülmesinde önemli bir rol üstlenmiştir (International Renewable Energy Agency [IRENA], 2024).

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde biyokütle, elektrik ve ısı üretiminin yanı sıra biyoyakıt, biyogaz, sentez gazı ve biyokömür gibi farklı enerji ve yan ürünlerin elde edilebilmesi nedeniyle özel bir konuma sahiptir. Biyokütle; tarımsal üretim artıkları, hayvansal atıklar, ormancılık kaynaklı materyaller, gıda sanayisi atıkları ve organik belediye atıkları gibi çok farklı hammaddelerden oluşabilmektedir (IEA Bioenergy, 2023; McKendry, 2002a, 2002b). Bu kaynakların uygun dönüşüm teknolojileriyle değerlendirilmesi, bir taraftan atıkların çevresel etkilerinin azaltılmasına katkı sağlarken diğer taraftan yerli ve yenilenebilir enerji üretimine olanak sağlamaktadır. Özellikle anaerobik çürütme, gazlaştırma, piroliz ve doğrudan yakma gibi teknolojiler, farklı özelliklere sahip biyokütle hammaddelerinin enerjiye dönüştürülmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Basu, 2018; Bridgwater, 2012; Leung et al., 2004; Mohan et al., 2006).

Biyokütlenin önemli özelliklerinden biri, yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda atık yönetimi ve döngüsel ekonomi uygulamalarında da kullanılabilmesidir. Organik atıkların anaerobik çürütülmesi sonucunda biyogazın yanı sıra besin maddelerince zengin digestat elde edilebilmekte; böylece atıkların enerji ve tarımsal girdiye dönüştürülmesi mümkün olmaktadır (Arthurson, 2009; Monnet, 2003). Benzer şekilde, termokimyasal dönüşüm süreçlerinden biri olan piroliz sonucunda biyoyağ, sentez gazı ve biyokömür elde edilebilmektedir (Bridgwater & Peacocke,

2000; Czernik & Bridgwater, 2004; Mohan et al., 2006). Biyokömürün uygun koşullarda toprak uygulamalarında değerlendirilmesi ise karbonun daha uzun süreli olarak tutulmasına ve toprak özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağlayabilmektedir (Lehmann & Joseph, 2015; Woolf et al., 2010). Bu nedenle biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesi, enerji üretiminin ötesinde atık yönetimi, karbon yönetimi ve kaynak verimliliğini birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

Türkiye, tarımsal üretim alanlarının genişliği, hayvancılık faaliyetlerinin yaygınlığı, ormancılık kaynakları ve gelişen gıda sanayisi nedeniyle önemli miktarda biyokütle kaynağına sahiptir. Tarımsal artıklar, hayvansal gübreler, gıda ve tarıma dayalı sanayi atıkları ile belediye kaynaklı organik atıklar, enerji üretiminde değerlendirilebilecek başlıca biyokütle kaynakları arasında yer almaktadır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024a, 2024b; Türkiye İstatistik Kurumu [TÜİK], 2025a, 2025b). Bununla birlikte biyokütle kaynaklarının önemli bir bölümünün dağınık yapıda olması, mevsimsel olarak değişmesi, yüksek nem içerebilmesi ve taşıma maliyetlerinin hammadde özelliklerine bağlı olarak artabilmesi, bu kaynakların ekonomik olarak değerlendirilmesinde dikkate alınması gereken temel unsurlardır. Dolayısıyla biyokütle enerji sistemlerinin planlanmasında yalnızca teorik kaynak miktarının belirlenmesi yeterli olmayıp, kullanılabilir hammadde miktarı, enerji içeriği, lojistik koşullar, dönüşüm teknolojisi ve ekonomik uygulanabilirliğin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir (Demirbaş, 2001; McKendry, 2002a, 2002b).

Biyokütle kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesinde uygun teknolojinin belirlenmesi, hammaddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine doğrudan bağlıdır. Yüksek nem içeriğine ve biyolojik olarak parçalanabilir organik maddeye sahip hayvansal gübreler ile organik atıklar için anaerobik çürütme teknolojisi uygun bir seçenek oluştururken, daha düşük nem içerikli lignoselülozik

tarımsal artıklar doğrudan yakma, gazlaştırma veya piroliz yöntemleriyle değerlendirilebilmektedir (Basu, 2018; Leung et al., 2004; Monnet, 2003). Piroliz proseslerinde biyokömür, biyoyağ ve gaz ürünlerinin elde edilebilmesi, bu yöntemin yalnızca enerji üretimi açısından değil, aynı zamanda katma değerli ürünlerin üretimi bakımından da önemini artırmaktadır (Bridgwater, 2012; Czernik & Bridgwater, 2004). Gazlaştırma yoluyla elde edilen sentez gazı ile anaerobik çürütme sonucunda üretilen biyogazın elektrik ve ısı üretiminde, özellikle kombine ısı ve güç (CHP) sistemlerinde kullanılması ise biyokütlenin toplam enerji kullanım verimliliğinin artırılmasına olanak sağlamaktadır (U.S. Department of Energy [DOE], 2023; IEA Bioenergy, 2023). Bu sistemlerde elektrik ve faydalı ısının eş zamanlı olarak değerlendirilmesi, biyokütle kaynaklarının daha etkin kullanılmasına katkı sağlayabilmektedir.

Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Elazığ ili, tarımsal üretim, hayvancılık ve tarıma dayalı ekonomik faaliyetler açısından biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesi bakımından dikkate değer bir potansiyele sahiptir. İlde gerçekleştirilen bitkisel ve hayvansal üretim faaliyetleri sonucunda tarımsal artıklar ve hayvansal kökenli organik atıklar oluşmaktadır. Bunun yanında gıda işleme faaliyetleri ve belediye kaynaklı organik atıklar da biyokütle enerji sistemlerinde değerlendirilebilecek diğer kaynakları oluşturmaktadır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024a, 2024b; TÜİK, 2025a, 2025b). Özellikle hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu bölgelerde oluşan gübrelerin kontrolsüz biçimde depolanması veya uygun olmayan koşullarda yönetilmesi, metan ve diğer sera gazlarının atmosfere salınmasına neden olabileceğinden, bu kaynakların biyogaz üretiminde değerlendirilmesi hem enerji hem de çevre yönetimi açısından önem taşımaktadır (IEA Bioenergy, 2023; Singh et al., 2013).

Elazığ'da biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesi, yalnızca yenilenebilir enerji üretimi açısından değil, kırsal kalkınma ve bölgesel ekonomik faaliyetlerin çeşitlendirilmesi açısından da önem taşımaktadır. Biyokütle tedarik zincirlerinin oluşturulması; tarımsal artıkların toplanması, taşınması, işlenmesi ve enerji tesislerinde değerlendirilmesi aşamalarında yeni ekonomik faaliyetlerin ortaya çıkmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca biyogaz tesislerinde elde edilen digestatın uygun kalite ve mevzuat koşullarını sağlaması durumunda tarımsal amaçlı kullanılabilmesi, enerji üretimi ile tarımsal üretim arasında döngüsel bir kaynak ilişkisinin kurulmasına olanak sağlayabilir (Arthurson, 2009; IEA Bioenergy, 2023). Bu yaklaşım, biyokütlenin yalnızca bir enerji hammaddesi olarak değil, atıkların yeniden ekonomik değere dönüştürüldüğü bir kaynak yönetimi modeli olarak ele alınmasını mümkün kılmaktadır.

Biyokütle enerji sistemlerinin çevresel performansının değerlendirilmesinde ise yalnızca enerji üretim miktarının dikkate alınması yeterli değildir. Hammadde toplama ve taşıma faaliyetleri, dönüşüm teknolojisinin enerji verimliliği, sera gazı emisyonları, yan ürünlerin değerlendirilmesi ve sistemin yaşam döngüsü boyunca oluşturduğu çevresel etkiler birlikte ele alınmalıdır. Bu nedenle biyokütle projelerinin sürdürülebilirliği; teknik performans, ekonomik uygulanabilirlik, çevresel etkiler ve kaynakların uzun dönemli kullanılabilirliği gibi birbiriyle ilişkili kriterler üzerinden değerlendirilmelidir (IPCC, 2022; IRENA, 2016; European Environment Agency [EEA], 2023). Özellikle biyokütlenin yerel kaynaklardan temin edilmesi, taşıma mesafelerinin azaltılması ve enerji ile yan ürünlerin yerel ölçekte değerlendirilmesi, sistemlerin bölgesel ölçekteki sürdürülebilirliğini destekleyebilecek unsurlar arasında değerlendirilebilir.

Bu çalışmada, Elazığ ilinin biyokütle kaynakları bütüncül bir yaklaşımla değerlendirilerek, tarımsal artıklar, hayvansal atıklar,

organik atıklar ve diğer uygun biyokütle kaynaklarından oluşan bir biyokütle envanterinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda kaynakların miktarları ve enerji içerikleri dikkate alınarak ilin teorik ve değerlendirilebilir biyokütle enerji potansiyelinin belirlenmesi hedeflenmektedir. Ayrıca biyokütle kaynaklarının özelliklerine bağlı olarak anaerobik çürütme, doğrudan yakma, gazlaştırma ve piroliz gibi dönüşüm teknolojilerinin teknik açıdan değerlendirilmesi; elde edilebilecek elektrik, ısı ve diğer enerji ürünlerinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bunun yanında biyokütle kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesinin ekonomik katkıları, istihdam olanakları, atık yönetimine etkileri ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına yönelik potansiyel katkıları da ele alınacaktır. Böylece çalışma sonucunda Elazığ'ın yerel biyokütle kaynaklarının enerji üretiminde değerlendirilmesine yönelik teknik, ekonomik ve çevresel açıdan bütünleşik bir değerlendirme ortaya konulması ve elde edilen sonuçların benzer özelliklere sahip bölgelerdeki biyokütle enerji planlamalarına katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

ELAZIĞ İLİNİN BİYOKÜTLE KAYNAKLARI

Biyokütle, fotosentez yoluyla güneş enerjisinin bitkisel ve organik maddelerde kimyasal enerji olarak depolanması sonucunda oluşan biyolojik kökenli bir enerji kaynağıdır. Tarımsal üretim artıkları, hayvansal atıklar, ormancılık faaliyetlerinden kaynaklanan materyaller, evsel organik atıklar ve organik içerikli sanayi atıkları biyokütlenin başlıca kaynaklarını oluşturmaktadır (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024a, 2024b; McKendry, 2002a, 2002b). Biyokütlenin yenilenebilir olması, uygun yönetim koşullarında karbon döngüsüne katkı sağlaması, atıkların enerjiye dönüştürülmesine olanak vermesi ve yerel enerji arzının çeşitlendirilmesine katkıda bulunması, bu kaynağın sürdürülebilir enerji sistemleri içerisindeki önemini artırmaktadır (IPCC, 2022; IRENA, 2016). Özellikle tarım ve hayvancılık faaliyetlerinin yoğun

olduğu bölgelerde biyokütle kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesi, atık yönetimi ile enerji üretiminin birlikte ele alınmasını sağlayarak çevresel ve ekonomik açıdan önemli fırsatlar oluşturabilmektedir.

Elazığ ili, tarımsal üretim ve hayvancılık faaliyetlerinin yanı sıra gıda ve tarıma dayalı sanayi faaliyetleri nedeniyle farklı türlerde biyokütle kaynaklarının ortaya çıktığı bir bölgedir. İlde oluşan biyokütle kaynakları genel olarak hayvansal atıklar, bitkisel üretim artıkları, evsel organik atıklar ve sanayi kaynaklı organik atıklar olmak üzere dört temel grupta değerlendirilebilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan verilere göre Elazığ ilinde enerji üretiminde değerlendirilebilecek toplam biyokütle miktarı yaklaşık 2.615.939 ton/yıl olarak belirlenmiştir. Bu miktar, ilin biyokütle kaynaklarının yalnızca atık yönetimi açısından değil, aynı zamanda yenilenebilir enerji üretimi ve bölgesel kaynak yönetimi açısından da dikkate değer bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Şekil 1'de Elazığ ilindeki toplam biyokütle envanterinin kaynak türlerine göre dağılımı gösterilmektedir. Toplam 2.615.939 ton/yıl biyokütle içerisinde en büyük payı 2.076.850 ton/yıl ile hayvansal atıklar oluşturmaktadır. Hayvansal atıkların toplam biyokütle içerisindeki payı yaklaşık %79,4'tür. Bu yüksek pay, özellikle büyükbaş ve küçükbaş hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklanan gübrelerin Elazığ'ın biyokütle enerji planlamasında önemli bir hammadde kaynağı olduğunu göstermektedir. Hayvansal atıkların anaerobik çürütme yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda biyogaz elde edilmesi ve biyogazın elektrik ve ısı üretiminde kullanılması mümkündür. Proses sonucunda ortaya çıkan digestatın uygun kalite koşullarını sağlaması durumunda organik gübre olarak değerlendirilmesi de mümkün olmakta ve böylece enerji üretimi ile tarımsal kaynak yönetimi arasında döngüsel bir ilişki kurulabilmektedir (Arthurson, 2009; IEA Bioenergy, 2023; Leung et al., 2004).

Bitkisel üretim artıkları ise 367.900 ton/yıl miktarı ve yaklaşık %14,1'lik payı ile Elazığ'ın ikinci önemli biyokütle kaynağını oluşturmaktadır. Tahıl üretimi, bağcılık, ceviz ve badem üretimi gibi tarımsal faaliyetlerden ortaya çıkan artıklar, sahip oldukları fiziksel ve kimyasal özelliklere bağlı olarak farklı enerji dönüşüm teknolojileriyle değerlendirilebilir. Özellikle düşük nem içerikli ve lignoselülozik yapıya sahip tarımsal artıklar doğrudan yakma, gazlaştırma ve piroliz gibi termokimyasal dönüşüm yöntemleri için uygun hammaddeler oluşturabilmektedir (Basu, 2018; Bridgwater, 2012; McKendry, 2002b). Piroliz işlemi sonucunda biyoyağ, gaz ve biyokömür gibi farklı ürünlerin elde edilebilmesi, bitkisel artıkların yalnızca doğrudan enerji üretiminde değil, katma değerli ürünlerin elde edilmesinde de kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Czernik & Bridgwater, 2004; Mohan et al., 2006).

Elazığ'ın biyokütle envanterinde üçüncü önemli kaynak grubunu evsel organik atıklar oluşturmaktadır. Yıllık yaklaşık 126.189 ton düzeyindeki evsel organik atıklar toplam biyokütle miktarının yaklaşık %4,8'ine karşılık gelmektedir. Organik belediye atıklarının ayrı toplanması ve uygun şekilde işlenmesi durumunda anaerobik çürütme yoluyla biyogaz üretimi gerçekleştirilebilir. Böylece düzenli depolama sahalarına gönderilen organik atık miktarı azaltılırken aynı zamanda enerji üretimi gerçekleştirilebilir. Bu yaklaşım, belediye atık yönetimi ile yenilenebilir enerji üretiminin bütünleştirilmesine ve kaynakların döngüsel ekonomi kapsamında değerlendirilmesine katkı sağlayabilir (European Commission, 2020; United Nations Environment Programme [UNEP], 2024).

Sanayi kaynaklı organik atıklar ise yaklaşık 45.000 ton/yıl miktarı ile toplam biyokütle envanterinin %1,7'sini oluşturmaktadır. Miktar bakımından diğer kaynak gruplarına göre daha düşük olmasına rağmen, bu tür atıkların belirli üretim

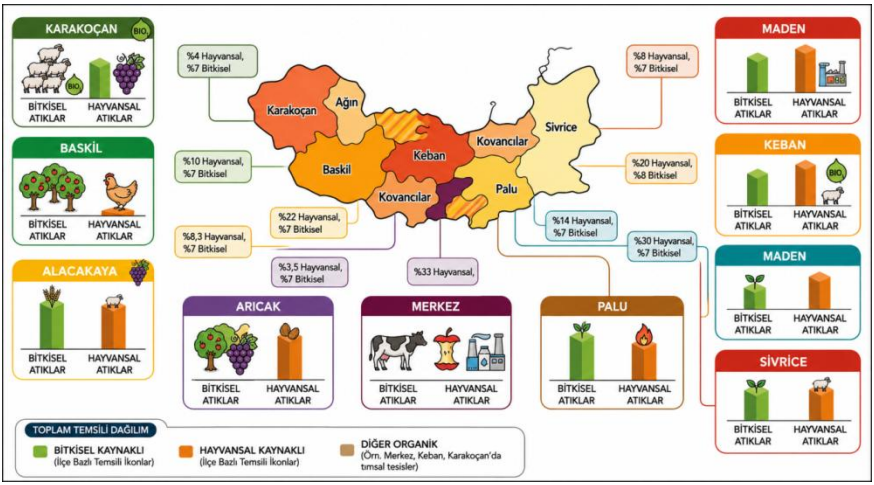
tesislerinde yoğun ve düzenli olarak ortaya çıkması, enerji dönüşüm tesisleri açısından önemli bir avantaj sağlayabilir. Özellikle gıda ve tarıma dayalı sanayi işletmelerinde oluşan organik atıkların özelliklerine bağlı olarak anaerobik çürütme, yakma veya diğer uygun dönüşüm teknolojileri kullanılabilir. Bu tür uygulamalar, işletmelerin atık bertaraf maliyetlerinin azaltılmasına ve atıkların enerji girdisine dönüştürülmesine katkı sağlayabilir (IEA Bioenergy, 2023; European Commission, 2018). Şekil 1'de verilen dağılım genel olarak değerlendirildiğinde, Elazığ'ın biyokütle envanterinin ağırlıklı olarak hayvansal ve bitkisel kaynaklardan oluştuğu görülmektedir. Bu durum, ilin biyokütle enerji planlamasında tarım ve hayvancılık sektörlerinin belirleyici konumda olduğunu ortaya koymaktadır. Bununla birlikte kaynakların toplam miktarının yüksek olması tek başına enerji tesislerinin ekonomik olarak uygulanabilir olduğu anlamına gelmemektedir. Biyokütlenin toplanması, taşınması, depolanması ve ön işleme tabi tutulması sırasında ortaya çıkan maliyetler ile hammaddenin mevsimsel ve mekânsal dağılımı da tesis planlamasında dikkate alınmalıdır (Demirbaş, 2001; McKendry, 2002a). Bu nedenle biyokütle kaynaklarının miktarının yanı sıra kaynakların mekânsal dağılımının belirlenmesi de önem taşımaktadır.

Şekil 1. Elazığ ilinin biyokütle kaynaklarının kaynak türlerine göre dağılımı



Şekil 2'de Elazığ ilindeki biyokütle kaynaklarının ilçelere göre dağılımı gösterilmektedir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) analizleri sonucunda elde edilen dağılım, biyokütle kaynaklarının il genelinde homojen bir şekilde bulunmadığını ve ilçeler arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir. Hayvansal kaynaklı biyokütlelerin özellikle Merkez, Kovancılar, Karakoçan ve Palu ilçelerinde yoğunlaştığı; bitkisel kaynaklı biyokütlelerin ise Baskil, Keban ve Ağın çevresinde daha yüksek miktarlarda bulunduğu görülmektedir. Bu mekânsal farklılıklar, biyokütle enerji tesislerinin yer seçiminde hammadde kaynaklarına olan mesafenin ve tedarik sürekliliğinin dikkate alınmasını gerekli kılmaktadır. Özellikle biyokütle gibi düşük enerji yoğunluğuna sahip hammaddelerde taşıma mesafesinin artması, toplam lojistik maliyetlerin yükselmesine ve tesisin ekonomik performansının olumsuz etkilenmesine neden olabilmektedir (Demirbaş, 2001; IRENA, 2016).

Şekil 2. Elazığ ilinde biyokütle kaynaklarının ilçelere göre dağılımı



Elazığ ilinin toplam teorik biyokütle enerji potansiyeli 951,7 GWh/yıl olarak hesaplanmıştır. Bu potansiyelin 460,0 GWh/yıl'lık bölümü (%48,3) bitkisel atıklardan, 373,8 GWh/yıl'lık bölümü (%39,3) hayvansal atıklardan, 90,9 GWh/yıl'lık bölümü (%9,6) evsel organik atıklardan ve 27,0 GWh/yıl'lık bölümü (%2,8) sanayi kaynaklı organik atıklardan elde edilmektedir. Bu sonuçlar, toplam biyokütle miktarı bakımından hayvansal atıklar önemli bir kaynak oluşturmasına rağmen, enerji potansiyeli açısından bitkisel atıkların daha yüksek paya sahip olduğunu göstermektedir. Bu farklılıkta biyokütle türlerinin alt ısıl değerleri, nem içerikleri ve kullanılan enerji dönüşüm teknolojileri belirleyici olmaktadır. Bitkisel atıkların toplam enerji potansiyelinin yaklaşık yarısını oluşturması, bu kaynak grubunun Elazığ'ın yenilenebilir enerji planlamasında önemli bir yere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Hayvansal atıkların 373,8 GWh/yıl düzeyindeki enerji potansiyeli ise özellikle biyogaz üretimi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Evsel ve sanayi kaynaklı organik atıkların toplam potansiyel içerisindeki payları daha düşük olmakla birlikte, bu kaynakların yerleşim alanlarında ve belirli sanayi tesislerinde yoğunlaşması, yerel ölçekte enerji üretim tesislerinin kurulmasını

kolaylaştırabilir. Bu nedenle biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesinde yalnızca toplam atık miktarının değil, enerji yoğunluğunun, kaynak sürekliliğinin, mekânsal dağılımın ve uygun enerji dönüşüm teknolojilerinin de birlikte dikkate alınması gerekmektedir.

Tablo 1. Elazığ ilinin biyokütle kaynaklarına göre yıllık enerji potansiyeli

Biyokütle Kaynak Türü	Yıllık Miktar (ton/yıl)	Ortalama Kalori Değeri (MJ/kg)	Yıllık Enerji Potansiyeli (TJ/yıl)	Elektrik Üretim Potansiyeli (GWh/yıl)
Bitkisel Atıklar	1.000.000	15,00	54,00	31,00
Ormansal Atıklar	1.000.000	26,00	55,00	32,20
Hayvansal Atıklar	5000.000	23,00	34,00	27,50
Kentsel Atıklar	1.200.000	23,00	25,00	11,30
Endüstriyel Biyo-atıklar	100.000	23,00	23,00	7,50
Arıtma Çamurları	70.000	10,00	8,00	
TOPLAM	350.000		11.256,00	



Elazığ ilinin biyokütle kaynaklarına göre yıllık enerji potansiyeli değerlendirildiğinde, bitkisel, hayvansal, evsel ve sanayi kaynaklı organik atıkların yenilenebilir enerji üretimi açısından önemli fırsatlar sunduğu görülmektedir (Tablo 1). Bu potansiyelin değerlendirilmesi, enerji üretiminin yanı sıra atık yönetiminin iyileştirilmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılması, döngüsel ekonominin desteklenmesi ve kırsal kalkınmanın geliştirilmesi açısından da önem taşımaktadır. Özellikle hayvansal atıkların biyogaz üretiminde, bitkisel artıkların ise piroliz, gazlaştırma ve yakma gibi termokimyasal dönüşüm teknolojilerinde değerlendirilmesi, Elazığ'ın farklı biyokütle kaynaklarına uygun teknoloji seçeneklerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, biyokütle kaynaklarının fiziksel ve kimyasal özellikleri birbirinden farklı olduğundan, tüm kaynaklar için tek bir enerji dönüşüm teknolojisinin uygulanması uygun

değildir. Bu nedenle kaynak miktarı, nem içeriği, organik madde yapısı, enerji içeriği, tedarik sürekliliği, taşıma mesafesi ve ekonomik koşullar birlikte değerlendirilerek her kaynak grubu için en uygun dönüşüm teknolojisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda çalışmanın sonraki bölümlerinde Elazığ ilindeki hayvansal, bitkisel, evsel ve sanayi kaynaklı biyokütle potansiyelleri ayrı ayrı ele alınacak; söz konusu kaynakların enerjiye dönüştürülmesinde kullanılabilecek teknolojiler teknik özellikleri, enerji üretim potansiyelleri, ekonomik uygulanabilirlikleri ve çevresel etkileri bakımından incelenecektir.

BİYOKÜTLE ENERJİSİNİN DÖNÜŞÜM TEKNOLOJİLERİ

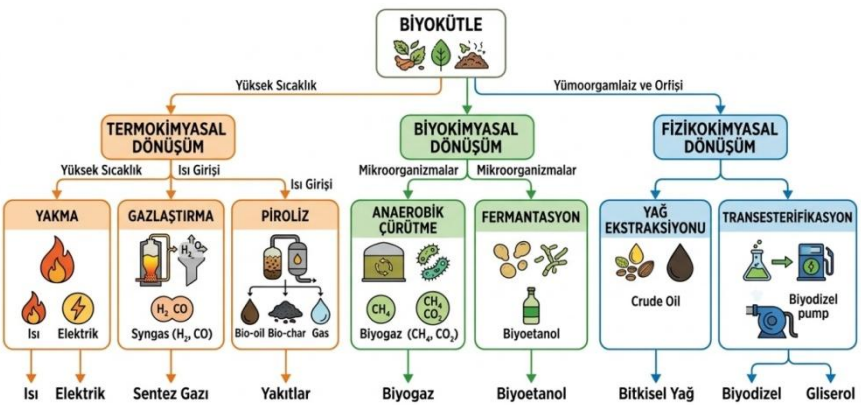
Biyokütle kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesinde kullanılacak teknolojinin belirlenmesi; hammaddenin fiziksel ve kimyasal özellikleri, nem içeriği, enerji yoğunluğu, biyolojik olarak parçalanabilirliği, dönüşüm ürünleri, yatırım ve işletme maliyetleri ile tesisin kapasitesine bağlıdır (Basu, 2018; Çengel & Boles, 2019; McKendry, 2002a, 2002b). Biyokütle kaynaklarının özelliklerinin birbirinden farklı olması nedeniyle tüm hammaddeler için tek bir enerji dönüşüm teknolojisinin kullanılması uygun değildir. Özellikle yüksek nem içeriğine sahip hayvansal ve organik atıklar biyolojik dönüşüm yöntemleri için daha uygunken, düşük nem içerikli ve lignoselülozik yapıya sahip bitkisel artıklar termokimyasal dönüşüm teknolojileri açısından daha elverişlidir (Basu, 2018; Leung et al., 2004).

Biyokütlenin enerjiye dönüştürülmesinde başlıca yöntemler anaerobik çürütme, doğrudan yakma, gazlaştırma ve pirolizdir. Bunlara ek olarak biyogaz veya sentez gazının yakıt olarak kullanıldığı kombine ısı ve güç (CHP) sistemleri, biyokütleden elde edilen enerjinin daha etkin değerlendirilmesini sağlayan önemli bir enerji kullanım teknolojisidir. Anaerobik çürütme sonucunda ağırlıklı olarak biyogaz ve digestat elde edilirken, doğrudan yakma

yöntemiyle temel olarak ısı ve elektrik üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Gazlaştırmada yanıcı özellik taşıyan sentez gazı, pirolizde ise biyoyağ, biyokömür ve gaz ürünleri elde edilmektedir (Bridgwater & Peacocke, 2000; Czernik & Bridgwater, 2004; Mohan et al., 2006).

Bu çalışmada ele alınan biyokütle dönüşüm teknolojilerinin genel sınıflandırması ve her bir teknoloji sonucunda elde edilen temel ürünler Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3'te biyokütle kaynaklarının biyolojik ve termokimyasal dönüşüm süreçleri aracılığıyla farklı enerji ve katma değerli ürünlere dönüştürülebildiği görülmektedir. Bu kapsamda anaerobik çürütme biyogaz ve digestat üretimine, doğrudan yakma ısı ve elektrik üretimine, gazlaştırma sentez gazı üretimine, piroliz ise biyoyağ, gaz ve biyokömür üretimine olanak sağlamaktadır.

Şekil 3. Biyokütle enerji dönüşüm teknolojilerinin genel sınıflandırılması



Biyokütle dönüşüm teknolojilerinin temel özellikleri, kullanım alanları ve elde edilen ürünler Tablo 2'de karşılaştırılmıştır. Tablo 2'de görüldüğü üzere anaerobik çürütme özellikle yüksek nem içeriğine sahip organik hammaddeler için uygunken, doğrudan yakma, gazlaştırma ve piroliz daha düşük nem

içerikli lignoselülozik biyokütlelerin değerlendirilmesinde öne çıkmaktadır. Bu nedenle Elazığ'ın biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesinde kaynak türüne göre farklı dönüşüm teknolojilerinin uygulanması daha uygun bir yaklaşım oluşturmaktadır.

Tablo 2. Biyokütle enerji dönüşüm teknolojilerinin karşılaştırılması



Elazığ ilinin biyokütle yapısı dikkate alındığında, hayvansal atıklar ve yüksek oranda organik madde içeren evsel atıkların öncelikle anaerobik çürütme sistemlerinde değerlendirilmesi; düşük nem içerikli tarımsal artıkların ise doğrudan yakma, gazlaştırma veya piroliz teknolojilerine yönlendirilmesi teknik açıdan uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Elde edilen biyogaz veya sentez gazının CHP sistemlerinde kullanılmasıyla elektrik ve ısı enerjisinin birlikte üretilmesi, biyokütle kaynaklarının enerji kullanım etkinliğini artırabilir (U.S. Department of Energy [DOE], 2023; IEA Bioenergy, 2023). Böyle bir yaklaşımda biyokütle kaynaklarının özellikleri, tesis kapasitesi, hammadde tedarik sürekliliği ve lojistik koşullar birlikte değerlendirilmelidir.

Bu çerçevede aşağıdaki alt bölümlerde anaerobik çürütme, doğrudan yakma, gazlaştırma, piroliz ve kombine ısı ve güç sistemleri ayrı ayrı ele alınmış; çalışma prensipleri, temel ürünleri,

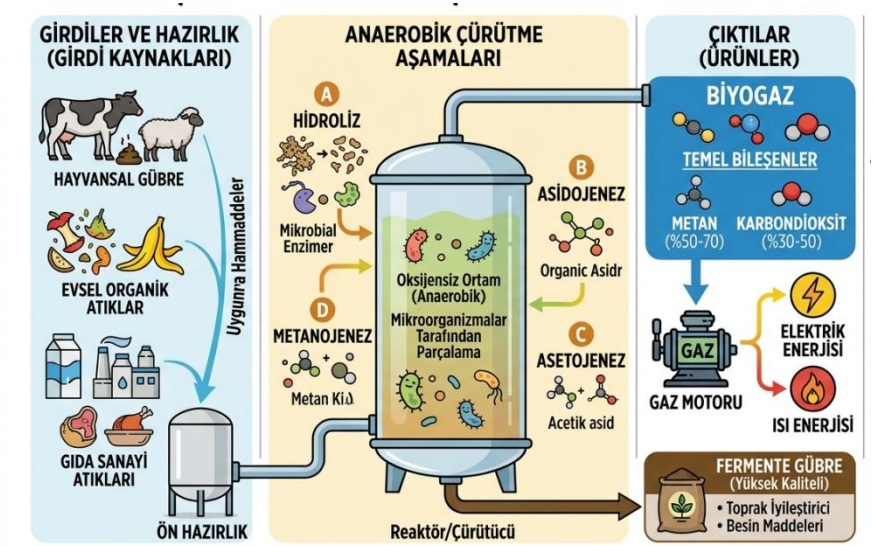
avantajları, sınırlılıkları ve Elazığ ili açısından uygulanabilirlikleri değerlendirilmiştir.

Anaerobik Çürütme (Biyogaz) Teknolojisi

Anaerobik çürütme, organik maddelerin oksijen bulunmayan bir ortamda mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucunda biyogaz ve besin maddeleri içeren digestatın elde edildiği biyolojik bir dönüşüm yöntemidir. Özellikle hayvansal gübreler, gıda atıkları, belediye kaynaklı organik atıklar ve diğer kolay parçalanabilir organik hammaddelerin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Leung et al., 2004; Monnet, 2003). Süreç genel olarak hidroliz, asidojenez, asetojenez ve metanojenez olmak üzere birbirini izleyen dört temel mikrobiyolojik aşamadan oluşmaktadır.

Anaerobik çürütme sürecinin genel çalışma prensibi Şekil 4'te gösterilmektedir. Organik hammadde ön işlemden geçirildikten sonra anaerobik reaktöre beslenmekte ve oksijensiz ortamda gerçekleşen mikrobiyolojik faaliyetler sonucunda biyogaz ve digestat elde edilmektedir. Biyogazın temel bileşenleri metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) olup, bunun yanında düşük oranlarda hidrojen sülfür (H_2S), azot, su buharı ve diğer gazlar bulunabilmektedir (World Biogas Association [WBA], 2019).

Şekil 4. Anaerobik çürütme süreci ve biyogaz üretimi



Biyogazın metan içeriği, hammaddenin özelliklerine ve işletme koşullarına bağlı olarak değişmektedir. Metan içeriğinin yüksek olması nedeniyle biyogaz; doğrudan yakıt olarak kullanılabilmekte, gaz motorlarında elektrik üretilebilmekte veya CHP sistemlerinde eş zamanlı olarak elektrik ve ısı üretiminde değerlendirilebilmektedir. Uygun arıtma işlemlerinden geçirilmesi durumunda biyogazın metan içeriği yükseltilerek biyometan elde edilmesi de mümkündür. Biyometan, uygun kalite standartlarını sağlaması koşuluyla doğal gaz altyapısında veya alternatif yakıt olarak kullanılabilir (IEA Bioenergy, 2023; WBA, 2019).

Anaerobik çürütme teknolojisinin önemli avantajlarından biri, enerji üretiminin yanında organik gübre niteliğinde değerlendirilebilecek digestatın elde edilmesidir. Digestatın bileşimi kullanılan hammaddenin özelliklerine ve proses koşullarına bağlı olmakla birlikte, azot, fosfor ve potasyum gibi bitki besin elementlerini içerebilmektedir. Uygun arıtma ve kalite kontrol koşullarının sağlanması durumunda digestatın tarımsal

alanlarda değerlendirilmesi, organik kaynakların yeniden kullanılması ve besin maddelerinin döngüye kazandırılması açısından katkı sağlayabilir (Arthurson, 2009; IEA Bioenergy, 2023).

Bunun yanında hayvansal gübre ve diğer organik atıkların kontrollü anaerobik çürütme tesislerinde işlenmesi, açıkta depolama veya kontrolsüz bozunmadan kaynaklanabilecek çevresel etkilerin azaltılmasına katkı sağlayabilir. Özellikle organik atıkların düzenli bir sistem içerisinde toplanması ve işlenmesi, kötü koku oluşumunun ve kontrolsüz metan salımlarının azaltılması bakımından önem taşımaktadır (UNEP, 2024; WBA, 2019).

Elazığ ili açısından değerlendirildiğinde, toplam biyokütle envanterinde hayvansal atıkların önemli bir paya sahip olması, anaerobik çürütme teknolojisinin il için dikkate alınması gereken başlıca dönüşüm seçeneklerinden biri olduğunu göstermektedir. Hayvansal atıkların yoğun olarak ortaya çıktığı Merkez, Kovancılar, Karakoçan, Palu ve diğer hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu ilçelerde, hammadde kaynaklarına yakın konumlandırılmış biyogaz tesisleri değerlendirilebilir. Böylece taşıma mesafelerinin azaltılması, hammadde tedarik sürekliliğinin artırılması ve tesislerin işletme maliyetlerinin kontrol altında tutulması mümkün olabilir.

Ayrıca evsel organik atıklar, gıda sanayisi atıkları ve uygun özelliklere sahip diğer organik materyallerin hayvansal atıklarla birlikte değerlendirilmesi, ortak çürütme (ko-çürütme) uygulamaları açısından önemli bir seçenek oluşturmaktadır. Farklı organik hammaddelerin birlikte işlenmesi, hammadde bileşiminin dengelenmesine ve biyogaz üretiminin artırılmasına katkı sağlayabilmektedir (Leung et al., 2004; Monnet, 2003).

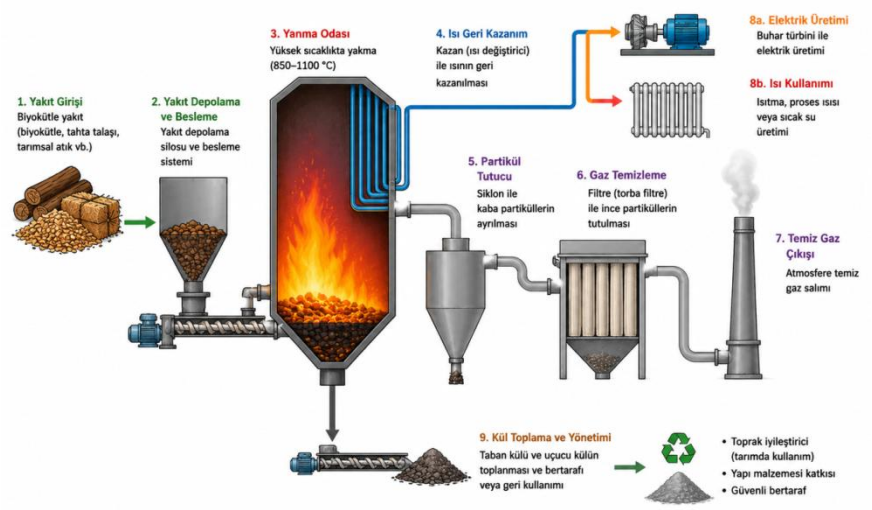
Sonuç olarak anaerobik çürütme; biyogaz ve digestat üretimi, organik atıkların kontrollü yönetimi ve yenilenebilir enerji

üretiminin birlikte gerçekleştirilmesine olanak sağlaması nedeniyle Elazığ'ın özellikle hayvansal ve organik atıklarının değerlendirilmesinde önemli bir teknoloji olarak değerlendirilebilir.

Doğrudan Yakma Teknolojisi

Doğrudan yakma, biyokütlenin yeterli miktarda oksijen bulunan kontrollü bir ortamda yakılması ve kimyasal enerjisinin öncelikle ısı enerjisine dönüştürülmesi esasına dayanan termokimyasal bir dönüşüm yöntemidir. Elde edilen ısı, doğrudan proses ısısı veya ısıtma amacıyla kullanılabileceği gibi, buhar kazanlarında yüksek basınçlı buhar üretmek için de değerlendirilebilir. Üretilen buharın türbin-jeneratör sisteminden geçirilmesiyle elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilebilmektedir (McKendry, 2002b; Basu, 2018).

Şekil 5. Doğrudan yakma teknolojisinin çalışma prensibi



Doğrudan yakma teknolojisinin çalışma prensibi Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere biyokütle yakıtı yanma ünitesine beslenmekte, yanma sonucunda ortaya çıkan ısı kazan içerisindeki suyun buhara dönüştürülmesinde kullanılmakta ve elde

edilen buhar türbin-jeneratör sistemi aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

Doğrudan yakma teknolojisinin başlıca avantajları arasında teknolojinin uzun süredir ticari ölçekte kullanılması, farklı kapasitelere uyarlanabilmesi ve büyük miktarlardaki biyokütlenin sürekli olarak enerjiye dönüştürülebilmesi bulunmaktadır. Özellikle düzenli olarak temin edilebilen tarımsal ve odunsu biyokütle kaynakları için doğrudan yakma sistemleri teknik açıdan uygulanabilir bir seçenek oluşturmaktadır (McKendry, 2002b).

Bununla birlikte biyokütlenin nem içeriği doğrudan yakma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Nem oranının yüksek olması, yakıtın net enerji değerini düşürmekte ve yanma sırasında açığa çıkan enerjinin bir bölümünün suyun buharlaştırılmasında kullanılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yüksek nem içeren biyokütlelerde ön kurutma gerekebilmektedir. Ayrıca kül oluşumu, partikül emisyonları ve azot oksitler gibi kirleticilerin kontrol edilmesi için uygun yanma ve emisyon kontrol sistemlerinin kullanılması gerekmektedir (Basu, 2018; McKendry, 2002b).

Elazığ açısından değerlendirildiğinde, düşük nem içerikli tahıl sapları, bağ budama artıkları ve sert kabuklu tarımsal artıklar doğrudan yakma teknolojisinde değerlendirilebilecek potansiyel hammaddeler arasında bulunmaktadır. Ancak bu kaynakların gerçekten ekonomik olarak kullanılabilmesi için nem içeriği, alt ısıl değer, kül içeriği, mevsimsel bulunabilirlik ve toplama-taşıma maliyetlerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi gerekmektedir.

Tarımsal artıkların kontrollü enerji üretim tesislerinde değerlendirilmesi, açık alanda yakma uygulamalarının azaltılmasına da katkı sağlayabilir. Bununla birlikte biyokütlenin enerji amacıyla toplanmasının toprak organik maddesi ve besin döngüsü üzerindeki olası etkileri de dikkate alınmalıdır. Bu nedenle

tarımsal artıkların tamamının enerji amacıyla uzaklaştırılması yerine, sürdürülebilir toprak yönetimi açısından gerekli miktarın tarlada bırakılması veya alternatif biçimde değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

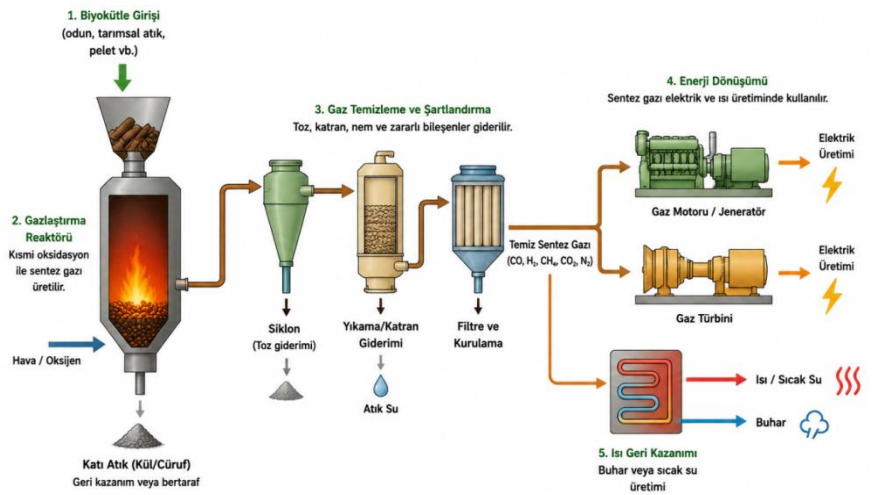
Sonuç olarak doğrudan yakma teknolojisi, Elazığ'daki uygun özelliklere sahip düşük nemli tarımsal artıkların enerjiye dönüştürülmesinde uygulanabilir seçeneklerden biridir. Ancak teknolojinin ekonomik ve çevresel performansı, hammadde tedarik zinciri ve emisyon kontrol sistemleriyle birlikte değerlendirilmelidir.

Gazlaştırma Teknolojisi

Gazlaştırma, biyokütlenin sınırlı miktarda oksijen, hava, su buharı veya bunların kombinasyonunun bulunduğu ortamda yüksek sıcaklıklarda termokimyasal olarak dönüştürülmesi ve yanıcı özellikte bir gaz karışımının elde edilmesi esasına dayanan bir teknolojidir. Doğrudan yakmadan farklı olarak gazlaştırma sırasında biyokütlenin tamamen oksitlenmesi amaçlanmamakta; karbon içeren hammaddenin bir bölümü karbon monoksit (CO), hidrojen (H_2), metan (CH_4) ve diğer gaz bileşenlerinden oluşan sentez gazına dönüştürülmektedir (Basu, 2018; IEA Bioenergy, 2023).

Gazlaştırma prosesinin temel çalışma prensibi Şekil 6'da gösterilmektedir. Biyokütle öncelikle uygun boyut ve nem seviyesine getirildikten sonra gazlaştırıcıya beslenmekte, yüksek sıcaklık ve sınırlı oksitleyici koşullar altında sentez gazı elde edilmektedir. Üretilen gazın bileşimi; hammadde özelliklerine, gazlaştırıcı tipine, sıcaklığa ve kullanılan gazlaştırma ortamına bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 6. Gazlaştırma teknolojisinin çalışma prensibi



Gazlaştırmanın önemli avantajlarından biri, biyokütlenin doğrudan yakılmasına kıyasla farklı enerji ve kimyasal ürünlerin elde edilmesine olanak sağlamasıdır. Sentez gazı, uygun gaz temizleme ve şartlandırma işlemlerinden sonra gaz motorlarında veya türbinlerde elektrik ve ısı üretimi amacıyla kullanılabilir. Daha ileri proseslerde ise hidrojen, metanol veya sentetik yakıt üretiminde hammadde olarak değerlendirilebilir (Basu, 2018; IEA Bioenergy, 2023).

Gazlaştırma teknolojisinin uygulanmasında biyokütlenin nem içeriği önemli bir parametredir. Yüksek nem içeriği gazlaştırma prosesinin enerji performansını olumsuz etkileyebildiğinden, özellikle tarımsal artıkların gazlaştırma öncesinde uygun bir nem seviyesine getirilmesi gerekebilir. Ayrıca kül, katran ve partikül oluşumu gibi proses kaynaklı bileşenlerin kontrol edilmesi, sentez gazının motor veya türbin gibi enerji dönüşüm ekipmanlarında güvenilir şekilde kullanılabilmesi açısından önemlidir (Basu, 2018).

Elazığ ili açısından değerlendirildiğinde, tahıl sapları, bağ budama artıkları, ceviz ve badem kabukları gibi uygun fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip lignoselülozik biyokütleler gazlaştırma teknolojisi açısından potansiyel hammadde kaynakları oluşturmaktadır. Özellikle bitkisel biyokütlenin yoğun olduğu Baskil, Keban ve Ağın gibi ilçelerde, hammadde tedarik mesafeleri ve miktarları dikkate alınarak küçük veya orta ölçekli gazlaştırma sistemlerinin uygulanabilirliği araştırılabilir.

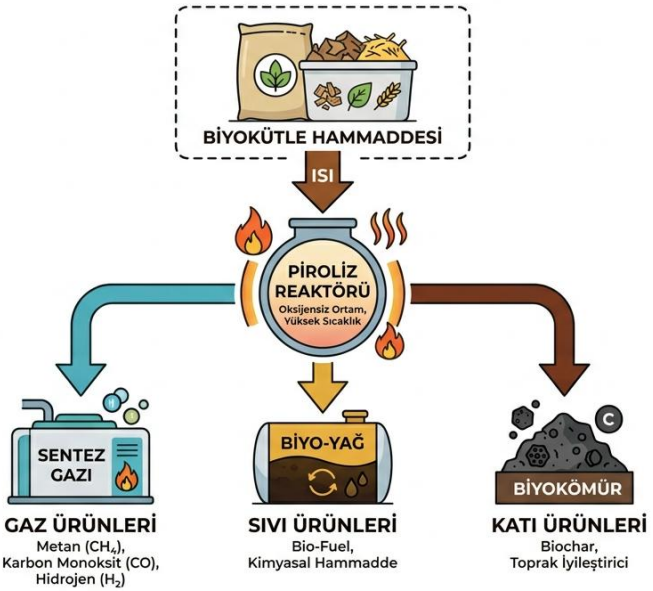
Bu kapsamda gazlaştırma teknolojisinin Elazığ için uygunluğu yalnızca enerji üretim kapasitesi üzerinden değil, sentez gazının kullanım alanı, hammadde sürekliliği, gaz temizleme ihtiyacı ve yatırım maliyetleri dikkate alınarak değerlendirilmelidir. Bu koşullar sağlandığında gazlaştırma, ilin düşük nemli lignoselülozik biyokütlelerinin değerlendirilmesinde alternatif bir termokimyasal dönüşüm teknolojisi oluşturabilir.

Piroliz Teknolojisi

Piroliz, biyokütlenin oksijensiz veya oksijenin çok sınırlı olduğu ortamda ısıtılarak termokimyasal olarak ayrıştırılması esasına dayanan bir dönüşüm teknolojisidir. İşletme koşullarına bağlı olarak yaklaşık 300–900 °C aralığında gerçekleştirilebilen piroliz prosesinde biyokütlenin yapısı parçalanmakta ve temel olarak biyoyağ, gaz ve biyokömür olmak üzere üç ana ürün oluşmaktadır (Bridgwater & Peacocke, 2000; Mohan et al., 2006).

Piroliz teknolojisinin temel çalışma prensibi ve başlıca ürünleri Şekil 7'de gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere biyokütle ön işlemden geçirildikten sonra piroliz reaktörüne beslenmekte ve oksijensiz ortamda ısıtılması sonucunda katı, sıvı ve gaz ürünlere ayrılmaktadır. Ürün dağılımı; sıcaklık, ısıtma hızı, bekleme süresi, partikül boyutu ve kullanılan biyokütlenin özellikleri gibi proses parametrelerine bağlı olarak değişmektedir (Bridgwater & Peacocke, 2000; Mohan et al., 2006).

Şekil 7. Piroliz teknolojisinin çalışma prensibi ve temel ürünleri



Piroliz sonucunda elde edilen biyoyağ, uygun iyileştirme işlemlerinden sonra yakıt veya kimyasal hammadde olarak değerlendirilebilmektedir. Gaz ürünleri proses içerisinde ısı üretimi amacıyla kullanılabileceği gibi elektrik üretim sistemlerinde de değerlendirilebilir. Biyokömür ise piroliz prosesinin önemli katı ürünlerinden biridir. Biyokömürün özellikleri kullanılan hammadde ve proses koşullarına bağlı olarak değişmekte olup, uygun özelliklere sahip ürünlerin toprak uygulamalarında değerlendirilmesi mümkündür (Lehmann & Joseph, 2015).

Biyokömürün tarımsal alanlarda kullanımı, toprak özellikleri ve karbon tutma potansiyeli açısından araştırılan uygulamalardan biridir. Biyokömürün belirli koşullarda toprakta uzun süreli karbon depolanmasına katkı sağlayabileceği ve bazı toprak özelliklerini iyileştirebileceği bildirilmiştir (Woolf et al., 2010). Bununla birlikte her biyokömürün tarımsal uygulamaya uygun olmadığı ve uygulama öncesinde ürünün fiziksel ve

kimyasal özelliklerinin değerlendirilmesi gerektiği dikkate alınmalıdır (International Biochar Initiative [IBI], 2015; Lehmann & Joseph, 2015).

Elazığ ili açısından değerlendirildiğinde, bağ budama artıkları, ceviz ve badem kabukları gibi uygun nem ve lignoselülozik özelliklere sahip tarımsal artıklar piroliz teknolojisi açısından potansiyel hammaddeler arasında değerlendirilebilir. Bu kaynakların piroliz yoluyla işlenmesi, yalnızca enerji üretimine değil, aynı zamanda biyokömür gibi katma değerli bir ürünün elde edilmesine de olanak sağlayabilir. Özellikle biyokömürün uygun özelliklere sahip olması durumunda tarımsal alanlarda değerlendirilmesi, biyokütle kaynaklarının enerji ve tarım sektörleri arasında yeniden dolaşıma sokulmasına katkı sağlayabilir.

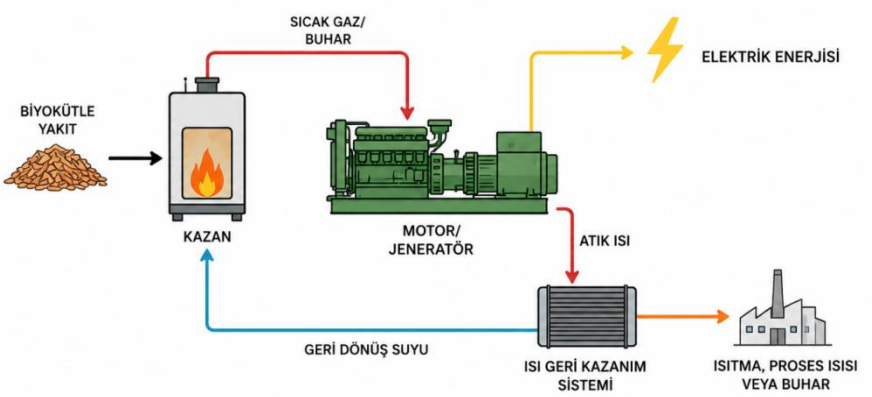
Bu nedenle piroliz teknolojisi, Elazığ'ın düşük nemli lignoselülozik biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesinde enerji üretimi ile katma değerli ürün üretimini bir araya getiren alternatif bir teknoloji olarak değerlendirilebilir. Bununla birlikte tesis yatırım maliyeti, hammadde tedarik sürekliliği, ürünlerin pazarlanabilirliği ve prosesin teknik karmaşıklığı ekonomik uygulanabilirlik açısından ayrıca incelenmelidir.

Kombine Isı ve Güç (CHP) Sistemleri

Kombine Isı ve Güç (Combined Heat and Power, CHP) sistemleri, aynı yakıt girdisinden eş zamanlı olarak elektrik ve kullanılabilir ısı enerjisi elde edilmesini sağlayan enerji dönüşüm sistemleridir. Geleneksel elektrik üretim sistemlerinde çevreye atılan ısının bir bölümünün geri kazanılarak kullanılabilir hâle getirilmesi, CHP sistemlerinin toplam enerji kullanım verimliliğini artırabilmektedir (DOE, 2023). CHP sistemlerinin gerçek toplam verimi; kullanılan motor veya türbin teknolojisi, elektrik üretim kapasitesi, ısı talebi ve işletme koşullarına bağlı olarak değişmektedir.

CHP sisteminin biyokütle uygulamalarındaki genel çalışma prensibi Şekil 8'de gösterilmektedir. Biyogaz veya uygun özelliklere sahip sentez gazı gaz motoru ya da benzeri bir güç üretim ünitesinde yakılmakta, elde edilen mekanik enerji jeneratör aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan egzoz ve soğutma sistemi ısısı ise sıcak su, buhar, proses ısısı veya alan ısıtması gibi farklı amaçlarla kullanılabilmektedir.

Şekil 8. Kombine Isı ve Güç (CHP) sisteminin çalışma prensibi



Biyokütle kaynaklarının CHP sistemlerinde değerlendirilmesinin temel avantajı, yakıtın enerji içeriğinin yalnızca elektrik üretimi amacıyla değil, aynı zamanda faydalı ısı üretimi için de kullanılabilmesidir. Böylece özellikle sürekli ısı talebinin bulunduğu tesislerde yakıt kullanım etkinliği artırılabilmektedir. Biyogaz tesislerinde üretilen gazın CHP ünitesinde kullanılması, anaerobik çürütme prosesinin enerji çıktısını artırırken aynı zamanda tesisin kendi ısı ihtiyacının karşılanmasına da olanak sağlayabilir (IEA Bioenergy, 2023; DOE, 2023).

CHP sistemlerinin ekonomik performansı açısından elektrik üretiminin yanı sıra ortaya çıkan ısının sürekli ve ekonomik olarak kullanılabilmesi önemlidir. Isı talebinin bulunmadığı veya düşük

olduğu durumlarda toplam sistem verimi beklenen düzeye ulaşamayabilir. Bu nedenle CHP tesislerinin planlanmasında yalnızca elektrik talebinin değil, sıcak su, buhar veya proses ısısı gibi sürekli ısı ihtiyaçlarının da belirlenmesi gerekmektedir.

Elazığ ili açısından değerlendirildiğinde, biyogaz tesislerinde üretilen biyogazın CHP ünitelerinde kullanılması önemli bir uygulama alanı oluşturabilir. Özellikle büyük ölçekli hayvancılık işletmeleri, organik atık işleme tesisleri, gıda sanayisi işletmeleri ve sürekli ısı ihtiyacı bulunan sanayi tesislerinde CHP sistemlerinin uygulanabilirliği araştırılabilir. Bunun yanında gazlaştırma sistemlerinden elde edilen sentez gazının uygun gaz temizleme ve şartlandırma işlemlerinden sonra CHP ünitelerinde kullanılması da değerlendirilebilir.

Elazığ'da CHP uygulamalarının ekonomik açıdan başarılı olabilmesi için biyokütle kaynağının sürekliliği, tesis kapasitesi, elektrik ve ısı talebi, şebeke bağlantı koşulları, yatırım ve işletme maliyetleri ile yan ürünlerin değerlendirilme olanaklarının birlikte ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle CHP sistemleri tek başına bir biyokütle dönüşüm teknolojisi olarak değil, anaerobik çürütme veya gazlaştırma gibi birincil dönüşüm proseslerinden elde edilen gazların enerjiye dönüştürülmesini sağlayan tamamlayıcı bir teknoloji olarak değerlendirilmelidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, Elazığ'ın farklı nitelikteki biyokütle kaynakları için tek bir dönüşüm teknolojisine dayalı bir sistem yerine, kaynak özelliklerine göre farklı teknolojilerin birlikte değerlendirildiği entegre bir biyokütle enerji yaklaşımı daha kapsamlı bir seçenek sunmaktadır. Hayvansal ve yüksek nemli organik atıkların anaerobik çürütme ile biyogaza dönüştürülmesi, düşük nemli tarımsal artıkların doğrudan yakma, gazlaştırma veya piroliz yöntemleriyle değerlendirilmesi ve elde edilen gazların CHP sistemlerinde elektrik ve ısı üretiminde kullanılması, böyle bir entegre yaklaşımın temel bileşenlerini

oluşturabilir. Ancak bu sistemlerin uygulanabilirliği; hammadde miktarı ve sürekliliği, lojistik koşullar, yatırım maliyetleri, enerji talebi, çevresel etkiler ve ürünlerin ekonomik değeri birlikte değerlendirilerek belirlenmelidir.

BİYOKÜTLE ENERJİSİNİN EKONOMİK, ÇEVRESEL VE SOSYAL ETKİLERİ

Biyokütle enerjisi, yenilenebilir enerji üretiminin yanı sıra atıkların ekonomik değere dönüştürülmesi, kırsal ekonomik faaliyetlerin desteklenmesi, istihdam olanaklarının geliştirilmesi ve çevresel etkilerin azaltılması bakımından çok boyutlu katkılar sağlayabilmektedir. Bununla birlikte, biyokütle yatırımlarının ekonomik ve çevresel performansı; hammadde türü, kaynakların sürekliliği, taşıma mesafesi, dönüşüm teknolojisi, tesis ölçeği ve üretilen enerjinin kullanım alanı gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir (EEA, 2023; IRENA, 2016; OECD, 2012). Bu nedenle Elazığ ili açısından biyokütlenin değerlendirilmesinde yalnızca enerji üretim miktarının değil, ekonomik, çevresel ve sosyal etkilerin birlikte ele alınması gerekmektedir.

Ekonomik Etkiler

Biyokütle enerjisi yatırımları, yenilenebilir enerji üretiminin yanında yerel ekonomik faaliyetlerin çeşitlendirilmesi, kırsal kalkınmanın desteklenmesi ve atıkların ekonomik değere dönüştürülmesi açısından önemli fırsatlar sunmaktadır. Tarımsal, hayvansal ve diğer organik atıkların enerji üretiminde değerlendirilmesi, atıkların bertaraf edilmesi için yapılabilecek harcamaların azaltılmasına ve üreticiler açısından ilave gelir olanaklarının ortaya çıkmasına katkı sağlayabilmektedir (EEA, 2023; IRENA, 2016).

Bu çalışma kapsamında yapılan hesaplamalara göre Elazığ ilinde yıllık yaklaşık 2.615.939 ton biyolojik kökenli atık ve artık kaynağının enerji üretiminde değerlendirilmesiyle yaklaşık 951,7

GWh/yıl enerji potansiyeline ulaşılabileceği belirlenmiştir. Bu enerji potansiyelinin 2026 yılı için kabul edilen elektrik birim fiyatı üzerinden değerlendirilmesi durumunda yaklaşık 2,38 milyar TL/yıl düzeyinde teorik bir ekonomik karşılığa ulaşılabileceği öngörülmektedir. Burada hesaplanan ekonomik değer, doğrudan tesis gelirini ifade etmemekte; enerji potansiyelinin belirli bir elektrik birim fiyatı ile çarpılmasıyla elde edilen teorik brüt ekonomik karşılığı göstermektedir. Gerçek ekonomik getirinin belirlenmesinde yatırım maliyetleri, işletme ve bakım giderleri, hammadde toplama ve taşıma maliyetleri, kapasite kullanım oranı ve enerji satış koşulları gibi değişkenlerin ayrıca dikkate alınması gerekmektedir (Murphy & McKeogh, 2004).

Biyokütle yatırımlarının ekonomik etkisi yalnızca elektrik veya ısı satışından elde edilecek gelirlerle sınırlı değildir. Hammadde toplama, sınıflandırma, taşıma, depolama, tesis işletmeciliği, bakım-onarım ve mühendislik hizmetleri gibi faaliyetler de ekonomik hareketlilik oluşturabilmektedir. Ayrıca biyogaz tesislerinde enerji üretiminin yanında elde edilen digestatın uygun koşullarda tarımsal amaçlarla değerlendirilmesi ve piroliz proseslerinde elde edilen biyokömür gibi yan ürünlerin ekonomik değere dönüştürülmesi, biyokütle sistemlerinin toplam ekonomik performansını artırabilecek unsurlar arasında yer almaktadır (Arthurson, 2009; IEA Bioenergy, 2023a).

Elazığ açısından değerlendirildiğinde, özellikle hayvansal ve bitkisel biyokütlenin kaynağa yakın tesislerde değerlendirilmesi taşıma maliyetlerinin azaltılmasına ve yerel kaynakların ekonomik değere dönüştürülmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, ekonomik uygulanabilirliğin kesin olarak ortaya konulabilmesi için ilçe bazında hammadde miktarı, toplama yarıçapı, taşıma mesafesi, tesis kapasitesi, yatırım ve işletme giderleri ile enerji satış fiyatlarının birlikte değerlendirildiği ayrıntılı fizibilite çalışmalarına ihtiyaç bulunmaktadır.

İstihdam ve Bölgesel Kalkınma

Biyokütle enerji sistemleri; hammadde temini, toplama, taşıma, depolama, tesis işletmeciliği, bakım-onarım ve yan ürünlerin değerlendirilmesi gibi çok sayıda faaliyet içermesi nedeniyle kırsal bölgelerde doğrudan ve dolaylı istihdam oluşturma potansiyeline sahiptir (OECD, 2012; IRENA, 2016). Özellikle tarımsal ve hayvansal üretimin yoğun olduğu bölgelerde biyokütlenin yerinde değerlendirilmesi, enerji üretiminin yanı sıra yerel ekonomik faaliyetlerin çeşitlendirilmesine katkı sağlayabilmektedir.

Elazığ için yapılan değerlendirmelerde biyogaz ve biyokütle enerji tesislerinin doğrudan ve dolaylı etkileriyle yaklaşık 3.000 kişilik istihdam potansiyeli oluşturabileceği öngörülmektedir. Ancak bu değer, tesislerin sayısı, kurulu gücü, işletme modeli ve hammadde tedarik zincirinin yapısına bağlı olarak değişebilecek bir tahmini potansiyeli ifade etmektedir. Dolayısıyla istihdam miktarının kesin olarak belirlenebilmesi için proje bazında ayrıntılı işgücü ve ekonomik etki analizlerinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Oluşabilecek istihdamın; biyokütle toplama ve taşıma, tesis işletmeciliği, bakım-onarım, organik gübre ve diğer yan ürünlerin işlenmesi, laboratuvar ve kalite kontrol hizmetleri ile mühendislik ve teknik destek faaliyetlerinde yoğunlaşması beklenebilir. Bu durum özellikle kırsal yerleşimlerde tarımsal faaliyetlere ek gelir ve istihdam olanaklarının oluşmasına katkı sağlayabilir.

Elazığ'ın Merkez, Kovancılar, Karakoçan, Palu ve Baskil gibi biyokütle potansiyelinin belirli kaynaklarda yoğunlaştığı ilçelerinde tesislerin kurulması durumunda, hammadde tedarik zincirinin yerel ölçekte oluşturulması mümkün olabilir. Böyle bir yapı, üreticilerin atık ve artıklarını ekonomik değere dönüştürmesine, lojistik faaliyetlerin gelişmesine ve yerel hizmet

sektörünün canlanmasına katkı sağlayabilir. Ayrıca makine imalatı, bakım-onarım, lojistik ve mühendislik hizmetleri gibi sektörlerde ortaya çıkabilecek talep, biyokütle yatırımlarının bölgesel ekonomik etkisini genişletebilir (OECD, 2012; IRENA, 2016).

Bu çerçevede biyokütle enerjisi, yalnızca enerji üretim kapasitesinin artırılmasına yönelik bir faaliyet olarak değil, aynı zamanda kırsal ekonominin çeşitlendirilmesi ve yerel kaynakların ekonomik değere dönüştürülmesi açısından da değerlendirilebilir. Bununla birlikte, biyokütle yatırımlarının kırsaldan kente göç üzerindeki etkisinin doğrudan ve kesin olduğu kabul edilmemeli; bu etkinin istihdamın sürekliliği, gelir düzeyi ve yerel ekonomik koşullar gibi faktörlere bağlı olarak ortaya çıkabileceği dikkate alınmalıdır.

Çevresel Kazanımlar

Biyokütle enerjisinin önemli çevresel katkılarından biri, organik atıkların kontrollü biçimde yönetilmesine ve enerji üretiminde değerlendirilmesine olanak sağlamasıdır. Özellikle hayvansal ve diğer kolay parçalanabilir organik atıkların anaerobik çürütme yoluyla değerlendirilmesi, kontrolsüz depolama veya uygun olmayan yönetim koşullarından kaynaklanabilecek metan emisyonlarının azaltılmasına katkı sağlayabilir (Leung et al., 2004; Singh et al., 2013). Bununla birlikte, biyokütlenin çevresel performansı yalnızca doğrudan enerji üretiminden değil, hammadde toplama, taşıma, işleme ve yan ürünlerin yönetimi gibi yaşam döngüsünün diğer aşamalarından da etkilenmektedir (Murphy & McKeogh, 2004).

Elazığ ili için yapılan hesaplamalara göre yıllık yaklaşık 2.615.939 ton biyolojik kökenli atık ve artık kaynağının enerji üretiminde değerlendirilmesiyle yaklaşık 951,7 GWh/yıl düzeyinde enerji potansiyeline ulaşılabileceği belirlenmiştir. Bu potansiyelin değerlendirilmesi, organik atıkların düzenli depolama veya

kontrolsüz birikim gibi yöntemlerle yönetilmesi yerine enerji ve yan ürün üretiminde kullanılmasına olanak sağlayabilir.

Çalışmada yapılan kabuller doğrultusunda hesaplanan yaklaşık 399.714 ton CO_2/yıl değerindeki emisyon azaltım potansiyeli, biyokütle kaynaklarının fosil enerji kaynaklarının yerine kullanılması ve ilgili emisyon faktörlerinin uygulanması sonucunda elde edilen teorik bir değerdir. Bu nedenle söz konusu değer doğrudan ölçülmüş bir emisyon azaltım miktarı olarak değil, belirli kabullere dayalı potansiyel çevresel kazanım olarak değerlendirilmelidir.

Özellikle tarımsal artıkların açık alanda yakılmasının azaltılması, partikül madde ve diğer hava kirleticilerinin oluşumunun önlenmesine katkı sağlayabilir. Benzer şekilde hayvansal atıkların uygun koşullarda anaerobik çürütme tesislerinde değerlendirilmesi; koku, yüzey ve yeraltı sularının kirlenmesi gibi çevresel risklerin kontrol edilmesine yardımcı olabilir. Ancak bu kazanımların elde edilebilmesi için biyokütle tesislerinin uygun çevresel standartlara göre tasarlanması, emisyonların kontrol edilmesi ve digestat ile diğer yan ürünlerin mevzuata uygun şekilde yönetilmesi gerekmektedir (European Commission, 2018; UNEP, 2024b).

Fermente Gübrenin Tarımsal Katkıları

Anaerobik çürütme süreci sonucunda elde edilen digestat, biyogaz üretiminin önemli yan ürünlerinden biridir. Digestat; organik madde ile birlikte azot, fosfor ve potasyum gibi bitki besin elementlerini içerebildiğinden, uygun kalite ve güvenlik koşullarının sağlanması durumunda tarımsal amaçlarla değerlendirilebilir (Arthurson, 2009; IEA Bioenergy, 2023b).

Digestatın tarımsal kullanımının temel avantajlarından biri, anaerobik çürütme sürecinde biyokütlede bulunan bazı besin elementlerinin sistem içerisinde tutulmasına ve yeniden tarımsal

üretime kazandırılmasına olanak sağlamasıdır. Bu durum, biyogaz tesislerinin yalnızca enerji üretim tesisi olarak değil, aynı zamanda organik madde ve besin maddelerinin geri kazanıldığı döngüsel sistemler olarak değerlendirilmesine imkân vermektedir (Arthurson, 2009).

Elazığ'da hayvancılık ve tarımsal faaliyetlerden kaynaklanan biyokütle miktarının yüksek olması, biyogaz üretimi ile tarımsal üretimin birbirini desteklediği entegre bir sistemin oluşturulması açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Hayvansal gübrelerin biyogaz tesislerinde işlenmesinden sonra elde edilen digestatın uygun analiz ve arıtma süreçlerinden geçirilerek tarım alanlarında kullanılması, besin maddelerinin yerel döngü içerisinde tutulmasına katkı sağlayabilir.

Bununla birlikte digestatın doğrudan ve koşulsuz olarak gübre kabul edilmesi doğru değildir. Ürünün fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerinin belirlenmesi, patojen ve istenmeyen bileşenler açısından kontrol edilmesi ve ilgili mevzuata uygunluğunun değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Elazığ'da biyogaz tesisleri planlanırken digestat yönetimi, tesis tasarımının ve işletme modelinin ayrılmaz bir parçası olarak ele alınmalıdır (IEA Bioenergy, 2023b).

Bu yaklaşım sayesinde biyokütle enerji sistemleri yalnızca enerji üretimi sağlayan tesisler olmaktan çıkarak enerji üretimi, organik atık yönetimi ve tarımsal besin maddesi geri kazanımını birlikte gerçekleştiren döngüsel sistemlere dönüştürülebilir.

Sosyal Etkiler

Biyokütle enerjisi yatırımları; ekonomik ve çevresel katkıların yanı sıra kırsal kalkınma, yerel istihdam, gelir çeşitliliği ve bölgesel kapasitenin geliştirilmesi açısından da sosyal etkiler oluşturabilir (IRENA, 2016; OECD, 2012). Tarımsal ve hayvansal atıkların ekonomik değere dönüştürülmesi, üreticilerin mevcut

faaliyetlerinden ilave ekonomik değer elde etmelerine ve yerel enerji sistemlerinin çeşitlendirilmesine katkı sağlayabilir.

Elazığ'da biyokütle yatırımlarının yaygınlaşması durumunda özellikle biyokütle kaynaklarının yoğunlaştığı Merkez, Kovancılar, Karakoçan, Palu ve Baskil gibi ilçelerde yeni iş ve hizmet alanlarının oluşması mümkün olabilir. Bununla birlikte bu tür yatırımların genç nüfusun istihdamı veya kırsaldan kentlere göç üzerindeki etkisi doğrudan ve kesin olarak ifade edilmemeli; söz konusu etkilerin tesislerin ölçeği, istihdam sürekliliği, gelir düzeyi ve bölgesel ekonomik koşullara bağlı olarak değişebileceği dikkate alınmalıdır.

Biyokütle projeleri aynı zamanda yerel yönetimler, üniversiteler, araştırma kuruluşları, tarımsal işletmeler ve özel sektör arasında yeni iş birliği olanaklarının oluşmasına katkı sağlayabilir. Özellikle biyokütle kaynaklarının karakterizasyonu, enerji dönüşüm teknolojileri, yan ürünlerin değerlendirilmesi ve çevresel performansın izlenmesi konularındaki araştırmalar, bölgesel teknik ve akademik kapasitenin geliştirilmesini destekleyebilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde biyokütle enerjisi, Elazığ açısından yalnızca alternatif bir enerji kaynağı olarak değil; yerel kaynakların değerlendirilmesi, atık yönetiminin iyileştirilmesi, ekonomik faaliyetlerin çeşitlendirilmesi ve kırsal kalkınmanın desteklenmesi bakımından çok boyutlu bir enerji ve kaynak yönetimi yaklaşımı olarak ele alınabilir. Ancak bu katkıların gerçekleşebilmesi için yatırımların teknik, ekonomik, çevresel ve sosyal boyutları birlikte değerlendirilmelidir.

ELAZIĞ İLİ İÇİN ÖNERİLEBİLECEK ENTEGRE BİYOKÜTLE ENERJİ SENARYOSU

Elazığ ili; tarımsal üretim, hayvancılık faaliyetleri ve organik atık miktarı bakımından Doğu Anadolu Bölgesi'nin önemli

biyokütle potansiyeline sahip illerinden biridir. Bununla birlikte, biyokütle kaynaklarının il genelinde homojen dağılmaması ve farklı biyokütle türlerinin farklı dönüşüm teknolojilerini gerektirmesi nedeniyle, tek bir teknolojiye dayalı enerji üretim modeli yerine entegre biyokütle enerji sistemlerinin uygulanması daha uygun bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (United Nations, 2015; UNDP, 2024). Bu yaklaşımda biyokütle kaynakları fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre sınıflandırılmakta ve her bir kaynak, enerji verimliliği, ekonomik fayda ve çevresel etkiler açısından uygun dönüşüm teknolojisiyle değerlendirilmektedir.

Hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu Merkez, Kovancılar, Karakoçan ve Palu ilçelerinde merkezi biyogaz tesislerinin kurulması önerilmektedir. Büyükbaş ve küçükbaş hayvan gübrelerinin yanı sıra mezbaha, gıda sanayi ve evsel organik atıkların birlikte işlenmesiyle biyogaz üretimi gerçekleştirilebilecektir. Elde edilen biyogaz, uygun kojenerasyon sistemlerinde elektrik ve ısı üretiminde kullanılabilir. Anaerobik çürütme sonucunda elde edilen fermente ürünün tarımsal alanlarda organik gübre olarak değerlendirilmesi ise besin maddelerinin yeniden kullanımına olanak sağlayarak kimyasal gübre ihtiyacının azaltılmasına katkıda bulunabilir. Bu tür entegre uygulamalar, organik atıkların yalnızca bertaraf edilmesi yerine enerji ve tarımsal girdiye dönüştürülmesini sağlayarak döngüsel ekonomi yaklaşımını desteklemektedir (Arthurson, 2009; European Commission, 2020).

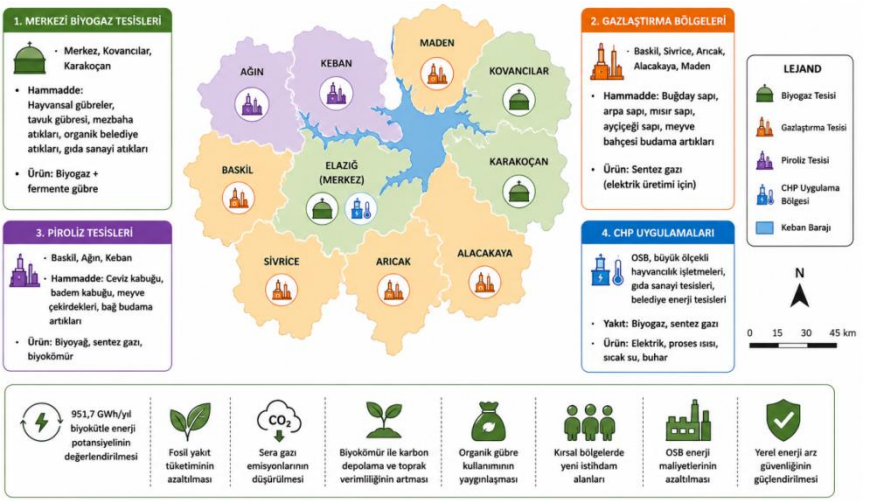
Bitkisel atıkların yoğun olarak oluştuğu Baskil, Keban, Ağın ve Sivrice çevresinde ise gazlaştırma ve piroliz teknolojilerinin uygulanması önerilmektedir. Tahıl sapları, bağ budama artıkları ile ceviz ve badem kabukları gibi lignoselülozik biyokütleler, gazlaştırma tesislerinde sentez gazına; piroliz tesislerinde ise biyoyağ, biyokömür ve gaz ürünlerine dönüştürülebilir. Özellikle biyokömürün tarım alanlarında kullanılması, organik karbonun toprakta tutulmasını destekleyerek

toprak özelliklerinin iyileştirilmesine ve karbon depolama kapasitesinin artırılmasına katkı sağlayabilir. Biyokömürün uygun hammadde ve proses koşullarında üretilmesi ve tarımsal uygulamalarda kullanılması, biyokütlenin yalnızca enerji üretiminde değil, aynı zamanda çevresel fayda sağlayan katma değerli bir ürüne dönüştürülmesine olanak vermektedir (Lehmann & Joseph, 2015; Woolf et al., 2010).

Enerji verimliliğinin artırılması amacıyla Elazığ Organize Sanayi Bölgesi ile büyük ölçekli hayvancılık ve gıda sanayi işletmelerinde birleşik ısı ve güç (combined heat and power, CHP) sistemlerinin kurulması önerilmektedir. Biyogaz ve sentez gazının CHP ünitelerinde değerlendirilmesiyle aynı sistem içerisinde elektrik ve proses ısısı üretilebilecek ve böylece biyokütlenin toplam enerji kullanım verimi artırılabilecektir. Özellikle sürekli veya yüksek miktarda proses ısısına ihtiyaç duyan sanayi işletmelerinde CHP uygulamaları, atık veya yenilenebilir yakıtların daha etkin kullanılmasına olanak sağlayabilir. Bu uygulamalar aynı zamanda işletmelerin dışarıdan enerji satın alma gereksinimini azaltabilecek ve fosil yakıt kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilecektir (U.S. Department of Energy, 2023).

Elazığ için önerilen entegre sistemin genel yapısı ve biyokütle kaynaklarının uygun dönüşüm teknolojileriyle eşleştirilmesi Şekil 9'de gösterilmektedir.

Şekil 9. Elazığ ili için önerilen biyokütle enerji teknolojileri yerleşim şeması



Şekil 9, Elazığ ilindeki biyokütle kaynaklarının türü ve bölgesel yoğunluğu dikkate alınarak önerilen biyogaz, gazlaştırma, piroliz ve CHP uygulamalarının şematik dağılımını göstermektedir. Şekil 8 incelendiğinde, biyogaz tesislerinin hayvancılık faaliyetlerinin yoğun olduğu ilçelerde; gazlaştırma ve piroliz tesislerinin ise bitkisel ve lignoselülozik atık potansiyelinin yüksek olduğu bölgelerde konumlandırılması önerilmektedir. Bu dağılımın temel amacı, biyokütle hammaddesinin üretildiği veya yoğun olarak bulunduğu alanlara mümkün olduğunca yakın tesisler kurulması ve böylece hammadde taşıma mesafelerinin ve buna bağlı lojistik maliyetlerin azaltılmasıdır. Ayrıca, farklı biyokütle türlerinin uygun dönüşüm teknolojileriyle eşleştirilmesi, kaynakların daha etkin kullanılmasına ve sistemin teknik ve ekonomik uygulanabilirliğinin artırılmasına katkı sağlayabilir.

Önerilen entegre biyokütle enerji sistemi kapsamında, Elazığ'ın yaklaşık 951,7 GWh/yıl düzeyindeki teorik biyokütle enerji potansiyelinin önemli bir bölümünün değerlendirilebileceği

öngörülmektedir. Bu potansiyelin yalnızca elektrik üretimi amacıyla değil; elektrik ve ısı üretimi, biyogaz, sentez gazı, biyoyağ, biyokömür ve organik gübre gibi farklı ürünlerin elde edilmesi amacıyla değerlendirilmesi, biyokütle kaynaklarının ekonomik değerinin artırılmasına olanak sağlayacaktır. Böylece enerji üretiminin yanı sıra organik atıkların yönetimi iyileştirilecek, tarımsal üretim için alternatif gübre kaynakları oluşturulacak ve biyokütleden elde edilen katma değerli ürünlerin bölgesel ekonomiye kazandırılması mümkün olabilecektir.

Sonuç olarak, Elazığ'daki biyokütle kaynaklarının kaynak türüne, miktarına ve bölgesel dağılımına göre farklı dönüşüm teknolojileriyle birlikte değerlendirilmesi, sürdürülebilir bir biyokütle enerji sistemi açısından önemli bir yaklaşım sunmaktadır. Biyogaz, gazlaştırma, piroliz ve CHP teknolojilerinin birbirini tamamlayacak şekilde planlanması; enerji arzının çeşitlendirilmesine, organik atıkların ekonomiye kazandırılmasına, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve kırsal kalkınmanın desteklenmesine katkı sağlayabilir. Bununla birlikte, uygulama aşamasında tesislerin kesin yer seçimi yapılmadan önce hammadde sürekliliği, taşıma mesafeleri, yatırım ve işletme maliyetleri, elektrik ve ısı talebi, şebeke bağlantı olanakları ve çevresel etkilerin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada Elazığ ilinin biyokütle kaynakları kapsamlı olarak değerlendirilmiş, mevcut biyokütle envanteri oluşturulmuş, enerji üretim potansiyeli belirlenmiş ve biyokütle dönüşüm teknolojilerinin uygulanabilirliği teknik, ekonomik ve çevresel açılardan incelenmiştir. Elde edilen bulgular, Elazığ'ın tarımsal üretimi, hayvancılık faaliyetleri ve organik atık varlığı sayesinde biyokütle enerjisi yatırımları açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Yapılan hesaplamalara göre il genelinde yıllık yaklaşık 2.615.939 ton biyolojik kökenli atık oluşmaktadır. Bu potansiyelin büyük bölümünü hayvansal atıklar oluştururken, bitkisel atıklar ikinci sırada yer almaktadır. Evsel organik ve sanayi kaynaklı atıklar ise toplam potansiyel içerisinde daha düşük paya sahip olmakla birlikte, özellikle biyogaz üretimi açısından önemli tamamlayıcı kaynaklar oluşturmaktadır.

Biyokütle kaynaklarının enerjiye dönüştürülmesiyle Elazığ'ın yıllık yaklaşık 951,7 GWh yenilenebilir enerji üretme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Enerji potansiyelinin önemli bir kısmı bitkisel atıklardan sağlanırken, hayvansal atıklar da biyogaz üretimi bakımından yüksek bir potansiyel sunmaktadır. Bu durum, ilde farklı biyokütle türlerine uygun dönüşüm teknolojilerinin birlikte değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Teknik değerlendirmeler sonucunda hayvansal gübreler, evsel organik atıklar ve gıda sanayi atıkları için en uygun yöntemin anaerobik çürütme olduğu, düşük nem oranına sahip bitkisel biyokütlelerin ise gazlaştırma ve piroliz teknolojileriyle daha verimli değerlendirilebileceği belirlenmiştir. Ayrıca biyogaz ve sentez gazının Kombine Isı ve Güç sistemlerinde kullanılmasıyla enerji veriminin önemli ölçüde artırılabileceği görülmüştür. Bunun yanında piroliz sonucu elde edilen biyokömür ile biyogaz üretimi sonrasında oluşan fermente gübre, sürdürülebilir tarım uygulamalarını destekleyen önemli yan ürünler olarak öne çıkmaktadır.

Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde biyokütle kaynaklarının enerji üretiminde kullanılmasıyla yıllık yaklaşık 2,38 milyar TL ekonomik değer oluşturulabileceği ve kurulacak tesislerin doğrudan ve dolaylı olarak yaklaşık 3.000 kişilik istihdam sağlayabileceği öngörülmektedir. Bu durum, biyokütle yatırımlarının enerji üretiminin yanında kırsal kalkınmaya, yerel

ekonomiye ve istihdama da önemli katkılar sunacağını göstermektedir.

Çevresel açıdan biyokütle kaynaklarının değerlendirilmesi, sera gazı emisyonlarının azaltılması, organik atıkların kontrol altına alınması, kimyasal gübre kullanımının azaltılması ve toprak ile su kaynaklarının korunmasına önemli katkılar sağlayacaktır. Tarımsal artıkların açık alanda yakılmasının önlenmesi ve hayvansal atıkların kontrollü şekilde işlenmesi sayesinde çevresel sürdürülebilirlik desteklenirken, döngüsel ekonomi yaklaşımının yaygınlaştırılması da mümkün olacaktır.

Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler, Elazığ'da tek bir biyokütle dönüşüm teknolojisi yerine, biyogaz, gazlaştırma, piroliz ve Kombine Isı ve Güç sistemlerinin birbirini tamamlayacak şekilde planlandığı entegre bir biyokütle enerji modelinin daha uygun olduğunu ortaya koymaktadır. Kaynakların oluştuğu bölgelere yakın tesislerin kurulması, taşıma maliyetlerini azaltacak, enerji verimliliğini artıracak ve yatırımın ekonomik sürdürülebilirliğini güçlendirecektir.

Sonuç olarak Elazığ, sahip olduğu biyokütle kaynaklarıyla yenilenebilir enerji üretimi açısından önemli avantajlara sahiptir. Bu potansiyelin etkin şekilde değerlendirilmesi; enerji arz güvenliğinin güçlendirilmesine, fosil yakıt kullanımının azaltılmasına, sera gazı emisyonlarının düşürülmesine, kırsal kalkınmanın desteklenmesine ve atık yönetiminin iyileştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Bu doğrultuda biyokütle yatırımlarının kamu kurumları, yerel yönetimler, üniversiteler ve özel sektörün iş birliğiyle planlanması ve bölgesel kalkınma stratejilerine entegre edilmesi, Elazığ'ın sürdürülebilir enerji hedeflerine ulaşmasında önemli bir rol oynayacaktır.

Kaynakça

Arthurson, J. (2009). Closing the global energy and nutrient cycles through application of biogas residue to agricultural land—Potential benefits and drawbacks. *Energies, 2*(2), 226–242.

Basu, P. (2018). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory* (3rd ed.). Academic Press.

Bridgwater, A. V. (2012). *Biomass fast pyrolysis processes for renewable energy*. Elsevier.

Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 4*(1), 1–73. https://doi.org/10.1016/S1364-0321(99)00007-6

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Corbitt, R. A. (1999). *Standard handbook of environmental engineering* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy & Fuels, 18*(2), 590–598.

Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management, 42*(11), 1357–1378.

Demirbaş, A. (2009). *Biofuels: Securing the planet's future energy needs*. Springer-Verlag.

Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management, 42*(11), 1357–1378.

Dünya Bankası. (2024). *World development indicators 2024*. World Bank.

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2025). *2025 yılı elektrik piyasası fiyat raporu*.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2023). *Türkiye ulusal enerji planı*.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). *Türkiye enerji görünümü 2024*.

European Biomass Association (Bioenergy Europe). (2024). *Statistical report 2024*.

European Commission. (2018). *Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment*. Publications Office of the European Union.

European Commission. (2020). *Circular economy action plan*.

European Commission. (2023). *EU climate action progress report 2023*. Publications Office of the European Union.

European Environment Agency. (2023). *Bioenergy production and use in Europe: Sustainability, carbon neutrality and circular economy*.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). *Energy-smart food for people and climate*.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). *FAOSTAT statistical database*.

International Biochar Initiative. (2015). *Standardized product definition and product testing guidelines for biochar*.

International Energy Agency. (2024). *World energy outlook 2024*.

International Energy Agency Bioenergy. (2023a). *Bioenergy for a net zero future*.

International Energy Agency Bioenergy. (2023b). *Digestate and biofertilizer utilization*.

International Energy Agency Bioenergy. (2023c). *Gasification of biomass and waste*.

International Energy Agency Bioenergy. (2023d). *Pyrolysis and biochar technologies*.

International Organization for Standardization. (2021). *ISO 17225-1: Solid biofuels—Fuel specifications and classes*.

International Renewable Energy Agency. (2016). *Renewable energy benefits: Measuring the economics*.

International Renewable Energy Agency. (2022). *Innovation outlook: Advanced biofuels*.

International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable capacity statistics 2024*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022a). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022b). *Climate change 2022: Mitigation of climate change: Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press.

International Renewable Energy Agency. (2024). *Renewable capacity statistics 2024*.

International Energy Agency. (2024). *World energy outlook 2024*.

Kumar, S., Shukla, S. R., & Singh, M. (2021). *Biomass energy conversion technologies*. Springer Nature.

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.

Leung, D. Y. C., Yin, X. L., & Wu, C. Z. (2004). A review on biogas generation from anaerobic digestion of organic wastes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8*(5), 463–490.

McKendry, P. (2002a). Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. *Bioresource Technology, 83*(1), 37–46.

McKendry, P. (2002b). Energy production from biomass (Part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology, 83*(1), 47–54.

Monnet, F. (2003). *An introduction to anaerobic digestion of organic wastes*. Remade Scotland.

Mohan, D., Pittman, C. U., Jr., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels, 20*(3), 848–889.

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2012). *Green growth studies: Linking renewable energy to rural development*. OECD Publishing.

REN21. (2024). *Renewables 2024 global status report*. REN21 Secretariat.

Singh, A., Pant, B., & Olsen, S. (2013). Biogas production from agricultural residues and livestock manure: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25*, 708–719.

T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Belediye atık istatistikleri ve yönetimi raporu*.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024a). *Bitkisel üretim verileri*.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024b). *Elazığ İl Tarım ve Orman Müdürlüğü faaliyet raporu 2024*.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024c). *Hayvancılık istatistikleri*.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2024d). *Tarımsal destekleme ve kırsal kalkınma raporu 2024*.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu. (2023). *Yenilenebilir enerji teknolojileri raporu*.

Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (2024). *Elektrik dağıtım faaliyet raporu 2024*.

Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2024). *Türkiye elektrik istatistikleri 2024*.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025a). *Adrese dayalı nüfus kayıt sistemi sonuçları 2024*.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025b). *Belediye atık istatistikleri 2024*.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025c). *Bitkisel üretim istatistikleri 2024*.

Türkiye İstatistik Kurumu. (2025d). *Hayvansal üretim istatistikleri 2024*.

United Nations. (2015). *Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*.

United Nations Development Programme. (2024). *Human development report 2024*.

United Nations Environment Programme. (2024a). *Global environment outlook 7*.

United Nations Environment Programme. (2024b). *Global waste management outlook*.

United Nations Industrial Development Organization. (2024). *Industrial development report 2024*.

U.S. Department of Energy. (2023). *Combined heat and power technology fact sheet series*.

U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *Combined heat and power partnership*.

World Bioenergy Association. (2024). *Global bioenergy statistics 2024*.

World Biogas Association. (2019). *Global potential of biogas*.

Woolf, J., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications, 1*, Article 56.

BÖLÜM 2

Güneş Enerjisi Destekli Hibrit Kurutucuda Kültür Mantarlarının Farklı Sıcaklıklarda Kurutulması ve Elektrik Tüketimi Kaynaklı Karbon Emisyonlarının Belirlenmesi

ELİF TURNA[1]
BENGİ GÖZMEN ŞANLI[2]

Giriş

Kültür mantarının (Agaricus bisporus) yüksek nem içeriği, hasat sonrası dayanımını sınırlayan başlıca özelliklerden biridir. Ürünün nem düzeyinin kurutma yoluyla azaltılması, muhafaza süresinin uzatılması ve işlenmiş ürün olarak değerlendirilmesi bakımından önem taşımaktadır. Bununla birlikte kurutma, ısı ve hava dolaşımı için enerji gerektiren bir işlemdir. Bu nedenle işletme sıcaklığının seçimi, hedef son neme ulaşma süresiyle birlikte elektrik gereksinimi ve bu gereksinimin çevresel karşılığı üzerinden ele alınmalıdır (Taşova & Güzel, 2020; Motevali et al., 2011). Bütün mantarların kurutulmasında ürün geometrisi, nem taşınımının gerçekleştiği mesafeyi ve ısıya maruz kalan yüzeyin

[1] Arş. Gör., Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0003-4066-009X
[2] Doç. Dr., Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-6805-2454

özelliklerini belirlemektedir. Rhim ve Lee (2011), bütün ve dilimlenmiş shiitake mantarlarını 40–70 °C aralığında incelemiş; aynı kurutma koşullarında bütün örneklerin daha yavaş kuruduğunu ve sıcaklık yükseldikçe her iki ürün biçiminde de kuruma hızının arttığını saptamıştır. Bütün kültür mantarına ilişkin sayısal bir karşılaştırma sunan Mittal et al. (2012), 60 °C sıcak havada kuru bazda 0,08 g/g nem düzeyine ulaşılması için bütün örneklerde 463 dakika, dilimlerde ise 350 dakika gerektiğini bildirmiştir. Aynı araştırmada, 1350 W maksimum güce sahip mikrodalga cihazının %60 güç ayarında bu süreler sırasıyla 9 ve 8,5 dakika olarak belirlenmiştir.

Bütün mantar şapkaları üzerinde yapılan çalışmalar, farklı sıcaklıkların kurutma süresine etkisini daha ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Xie et al. (2023), sapları uzaklaştırılmış bütün shiitake şapkalarını uzak kızılötesi ışınımla 50, 55, 60, 65 ve 70 °C'de kurutmuş ve süreleri sırasıyla 900, 900, 660, 540 ve 420 dakika olarak raporlamıştır. Araştırmada kurutma, yaş bazda %13 son nem hedefine göre yürütülmüştür. Omari et al. (2018) ise bütün mantarın mikrodalga–sıcak hava ile kurutulmasında 23, 50 ve 70 °C hava sıcaklıklarını, 1,5–2,5 W/g mikrodalga güç yoğunluklarıyla birlikte değerlendirmiş; en düşük özgül enerji tüketimini 23 °C hava sıcaklığı ve sabit 2,5 W/g güç yoğunluğunda elde etmiştir.

Kültür mantarının sıcak havayla kurutulmasına ilişkin Taşova ve Güzel (2020), 50, 60 ve 70 °C koşullarında ortalama işlem sürelerini sırasıyla 9, 7,5 ve 4,5 saat olarak belirlemiştir. Motevali et al. (2011), mantar dilimlerinde altı farklı kurutma yöntemini karşılaştırmış; incelenen koşullarda en düşük ve en yüksek toplam enerji tüketimlerini mikrodalga ve vakum uygulamalarında sırasıyla 0,13 ve 6,22 kWh olarak bildirmiştir. Aynı araştırmada sıcak havalı kurutucunun enerji gereksinimi, sıcaklık artışıyla azalma eğilimi göstermiştir. Bu sonuçlar, işlem

süresindeki kısalmanın enerji tüketimini azaltabildiğini desteklemekle birlikte, farklı ürün biçimlerinin ve cihazların aynı enerji tüketimine sahip olacağını göstermemektedir.

Güneş enerjisi destekli kurutma sistemleri, işlem için gerekli ısının bir bölümünün güneşten karşılanmasına olanak tanımaktadır. Şevik et al. (2013), mantarları 45 ve 55 °C'de kuruttukları güneş enerjisi destekli ısı pompalı düzende farklı çalışma biçimlerinin enerji performansını incelemiştir. Çerçi et al. (2022), mantar dilimlerinin geliştirdikleri güneş kurutucusunda açık güneşe göre yaklaşık 12,4 saat daha kısa sürede kuruduğunu belirlemiştir. Van Hung et al. (2020), istiridye mantarında yaş bazda yaklaşık %90 başlangıç neminden %8–10 son neme ulaşmak için 8–10 saat etkin kurutma süresi bildirmiştir. Son çalışmada işlem, gece arası nedeniyle yaklaşık 1,5 günlük takvim süresine yayılmıştır.

Mantar kurutmanın çevresel etkilerine ilişkin Van Hung et al. (2020), güneşle çalışan şişirilebilir kurutucuda 1 kg kuru ürün başına 0,33 kg CO_2-eşd. emisyon hesaplamıştır. Yazarlar bu emisyonun cihaz imalatından kaynaklandığını, işletme enerjisinin ise güneşten sağlandığını belirtmiştir. Dolayısıyla söz konusu değer, şebekeden elektrik çeken bir kurutucunun yalnız işletme aşamasına ait emisyonuyla aynı hesap sınırını temsil etmemektedir. Mantar kurutmada karbon sonuçlarının değerlendirilmesi, emisyon değerinin yanında ürün miktarının ve kapsanan süreçlerin de açıkça belirtilmesini gerektirmektedir.

Diğer tarımsal ürünler üzerinde yürütülen araştırmalar da elektrik kaynağının emisyon hesabındaki belirleyici rolünü göstermektedir. Karpuzcu et al. (2023), yonca kurutmada 60 °C konvektif uygulama ve rüzgâr kaynaklı elektrik senaryosu için 2,14 g CO_2/kg ürün, 300 W mikrodalga uygulaması ve jeotermal elektrik senaryosu için 72,62 g CO_2/kg ürün bildirmiştir. Bu iki değer hem kurutma yönteminin hem elektrik üretim seçeneğinin farklı olduğu

koşullara aittir. Motevali ve Tabatabaee Koloor (2017), kurutucuların emisyonlarının enerji gereksinimi ve elektrik üretim teknolojisine bağlı olarak değiştiğini; hibrit güneş kurutucusunda güneşin ısı sağlama payı arttıkça sera gazı emisyonlarının azaldığını ortaya koymuştur. Kaveh et al. (2020) farklı kurutma yöntemlerini enerji tüketimi ve emisyonlar bakımından değerlendirmiş, Gökalp ve Çetin (2022) ise portakal dilimlerinde sıcaklık artışıyla CO_2 emisyonlarının azalma eğilimi gösterdiğini bildirmiştir.

Bütün mantara ilişkin araştırmalar, ürün biçimi ve sıcaklığın kurutma süresini etkilediğini; enerji ve çevresel değerlendirmeler ise ölçülen elektrik tüketiminin uygun emisyon faktörüyle ilişkilendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Güneş enerjisi destekli hibrit bir düzende bütün kültür mantarının değerlendirilmesi, ortak ürün hazırlama koşulları ve son nem hedefi altında sıcaklık, elektrik gereksinimi ve elektrik kaynaklı emisyonların birlikte incelenmesini gerektirir. Türkiye şebekesi için bu hesap, tüketim noktasının bağlantı türüne uygun resmî faktör kullanılarak yapılabilmektedir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], 2025).

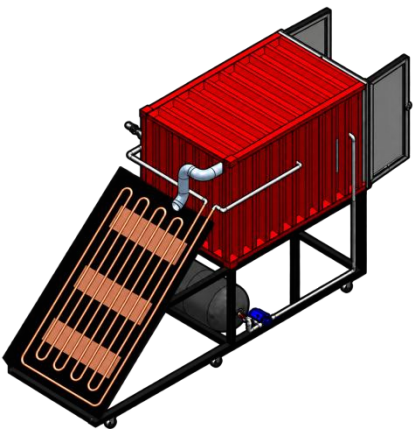
Bu çalışmanın amacı, güneş enerjisi destekli hibrit kurutucuda bütün kültür mantarlarının 50, 55 ve 60 °C sıcaklıklarında kurutulması sırasında, kurutma sıcaklığının toplam elektrik tüketimi ve elektrik tüketiminden kaynaklanan karbon emisyonları üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Bu amaçla yaklaşık 185 g başlangıç ürün yükü ve yaş bazda %10 son nem hedefi esas alınmış; sıcaklık koşulları ortalama kurutma süresi, elektrik tüketimi ve farklı sıcaklık koşulları için CO_2 eşdeğeri emisyon bakımından karşılaştırılmıştır.

Materyal ve Yöntem

Kurutma Sistemi ve Çalışma Prensibi

Deneylerde, güneş enerjisinden sağlanan ısının kurutma kabinine aktarıldığı hibrit bir kurutma sistemi kullanılmıştır. Sistem; güneş kolektörü, kurutma kabini, hava bağlantı hattı ve kapalı devre su dolaşım hattından oluşmakta olup; sistemin genel görünümü Şekil 1'de sunulmuştur.

Şekil 1. Deneysel hibrit kurutucunun kolektör ve kabin yerleşimini gösteren teknik çizim.

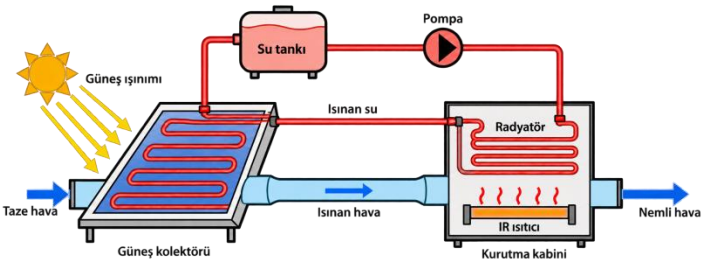


Kaynak: Yazarların deney düzeneği

Kolektördeki siyah soğurucu yüzey, gelen güneş ışınımını ısıya dönüştürerek hava ve su devrelerine aktarmaktadır. Hava devresinde fanla sağlanan akış, kolektörde ısınan havayı kabine taşımaktadır. Su devresinde ise kolektör içindeki 16 m bakır boru boyunca ısınan su, sirkülasyon pompası yardımıyla radyatöre ulaştırılmaktadır. Suyun radyatörde bıraktığı ısı kabin havasına geçmekte, ardından su kolektöre geri dönmektedir. Böylece kabine hem sıcak hava girişiyle hem de radyatör yüzeyinden olmak üzereiki ayrı yolla ısı sağlanmaktadır. Kolektörün yan ve alt

yüzeyleri ile kabin duvarlarında kullanılan yalıtım ile çevreye olan ısı geçişi engellenmektedir. Güneşten kazanılan ısının, istenilen kabin içi sıcaklık şartlarını karşılayamadığı durumlarda termostat, 1500 W nominal güçlü elektrikli kızılötesi (IR) ısıtıcıyı devreye almaktadır. Kabindeki aksiyel fanlar ürün çevresinde hava hareketi oluştururken, nem taşıyan hava yan bacadan tahliye edilmektedir. Isı ve akış yolları Şekil 2'de şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 2. Hava ve su devreleri ile yardımcı ısıtıcının kurutma kabiniyle bağlantıları.

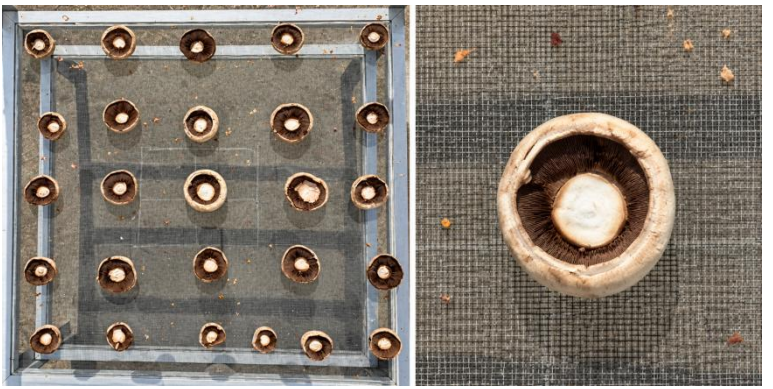


Kaynak: Yazarların deney düzeneği

Numune Hazırlığı ve Başlangıç Nem Tayini

Deney materyali olarak Agaricus bisporus türü kültür mantarı seçilmiştir. Hazırlama öncesindeki yaklaşık 400 g materyalden kabuk ve sap kısımları ayrılarak her deney için yaklaşık 185 g net kurutma yükü elde edilmiştir. Bütün mantarlar, sapın ayrıldığı oyuk bölüm üstte kalacak şekilde tepsiye dizilmiştir. Kütle takibi amacıyla aynı tepsi yükünden beş mantar seçilmiştir. Başlangıçta ortalama yaklaşık 15 g olan bu izleme numuneleri, işlem boyunca kendi tartım kayıtları alınarak takip edilmiştir. Nem tayini için ayrılan örnekler ise bu beş numuneden farklıdır.

Şekil 3. Bütün mantarların tepsideki yerleşimi ve bir izleme numunesinin görünümü.



Kaynak: Yazarların deney düzeneği ve numune görselleri.

Başlangıç nem tayininde, ayrı örneklerin etüve alınmadan önceki net kütleleri ile kurutma sonunda kalan net kütleleri kullanılmıştır. Nüve KD 200 etüvde 105 ± 2 °C'de gerçekleştirilen işlem, ardışık tartımların sabit kütle göstermesine kadar sürdürülmüştür. Örneklerin başlangıç kütlesine göre etüvde oluşan kütle kaybının yüzdesi, yaş baz nem içeriği olarak Eşitlik (1) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Nem(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \qquad (1)$$

Eşitlik (1)'de W_1, etüv işleminden önceki net örnek kütlesi; W_2, sabit kütle koşulunda kalan kuru örnek kütlesidir (gram olarak).

Etüv ölçümlerinden elde edilen ortalama başlangıç nemi yaş bazda %92,03'tür. Deneyler için son nem hedefi yaş bazda %10 olarak tanımlanmıştır. Başlangıç nemi ve kuru madde korunumu kabulüne göre, 185 g başlangıç yükü için hesaplanan hedef son ürün kütlesi yaklaşık 16,38 g'dır. İzleme numunelerine ait bitirme kütleleri ise her mantarın kendi başlangıç tartımı kullanılarak hesaplanmıştır.

Kurutma Koşulları ve Ölçüm Süreci

Kurutma deneyleri Ekim 2026'da Mersin'de gerçekleştirilmiştir. Deneyler, kabin içinin 50, 55 ve 60 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık değeri için yapılmıştır. Bu sıcaklık aralığı, mantarın sıcak hava ile kurutulduğu çalışmalardaki sıcaklık aralığı dikkate alınarak belirlenmiştir (Taşova & Güzel, 2020). Her düzey için üç ayrı günde yürütülen deneylere saat 09.30'da başlanmıştır. Ürün hazırlama ve tepsiye yerleştirme adımları bütün uygulamalarda aynı tutulmuştur. Beş izleme numunesinin tartımları ilk aşamada yarım saatlik aralıklarla alınmış; hedeflenen bitirme kütlelerine yaklaşıldığında tartımlar arasındaki süre azaltılmıştır.

Deneyin bitişi, beş izleme numunesinin her birinin kendi hedef kütlesine ulaşması esas alınarak belirlenmiştir. Başlangıç ile bitiş arasındaki zaman farkı kurutma süresi olarak kaydedilmiştir. Kabin sıcaklığı, kabin bağıl nemi ve dış ortam sıcaklığı sensör kayıtlarından, güneş ışınımı ise solarimetre ölçümlerinden elde edilmiştir. Sıcaklık için °C, ışınım için W/m² ve bağıl nem için % birimleri kullanılmıştır. Her ölçüm sıcaklığı, ilgili deneylerin kurutma dönemine ait güneş ışınımı, kabin bağıl nemi ve dış ortam sıcaklığı değişim aralıklarıyla tanımlanmıştır.

Elektrik Tüketiminin Belirlenmesi

Kurutma sisteminin literatürdeki bir çok çalışmada olduğu gibi elektrik enerjisi gereksinimi, kontrol panosundaki sayacın deney başında ve sonunda okunan değerlerinden belirlenmiştir (Çelen ve Kuş, 2026). Belirlenen bu elektrik tüketimi sistemde bulunan IR ısıtıcı, fanlar, sirkülasyon pompası, aydınlatma, termostat ve sıcaklık–bağıl nem göstergeleri tarafında kullanılan elektrik miktarıdır. İki sayaç okuması arasındaki fark, Eşitlik (2) ile deney başına tüketilen elektrik enerjisi olarak hesaplanmıştır.

$$E_{elk} = S_{son} - S_{ilk} \quad (2)$$

Eşitlik (2)'de Sson ve Silk deney sonu ve başlangıcındaki sayaç okumalarını, Eelk ise bu okumaların farkından bulunan tüketimi göstermektedir. Ölçümde yararlanılan kontrol panosu ve sayaç Şekil 4'te sunulmuştur.

Şekil 4. Elektrik beslemesinin kontrol edildiği pano ve tüketim sayacı.



Kaynak: Yazarların deney düzeneği ve numune görselleri.

Elektrik Tüketimi Kaynaklı Karbon Emisyonlarının Belirlenmesi

Elektrik tüketimi kaynaklı karbon emisyonu, kurutma sırasında şebekeden alınan enerjiye karşılık gelen dolaylı sera gazı salımı olarak tanımlanmıştır. Elektrik tüketiminin birim enerji başına emisyon faktörüyle ilişkilendirilmesine dayanan bu hesaplama yaklaşımı, kurutucuların enerji gereksinimleri üzerinden yapılan çevresel değerlendirmelerde de kullanılmaktadır (Motevali & Tabatabaee Koloor, 2017; Karpuzcu et al., 2023). Deney başına CO eşdeğeri emisyon Eşitlik (3) ile elde edilmiştir.

$$C_{elk} = E_{elk} \times EF \quad (3)$$

Eşitlik (3)'te Celk elektrik kullanımına atfedilen emisyon miktarı (kg CO_2-eşd.), Eelk ölçülen tüketim (kWh) ve EF elektrik tüketim noktası emisyon faktörüdür (kg CO_2-eşd./kWh).

Sistemin elektrik beslemesi için dağıtım hattına bağlı tüketim noktası kabulü esas alınmıştır. Bu doğrultuda ETKB'nin

2025 veri yılına ait 0,469 t CO_2-eşd./MWh değeri kullanılmıştır (ETKB, 2025). Bu faktör, hesapta kullanılan enerji birimine dönüştürüldüğünde 0,469 kg CO_2-eşd./kWh olmaktadır.

Değerlendirmenin sınırı, ürünün kurutulması sırasında tüketilen şebeke elektriğidir. Üretim, taşıma, ambalajlama ve kurutucu imalatı süreçleri bu hesaba dâhil edilmemiştir. Güneşten kazanılan ısı için ayrı bir emisyon değeri hesaplanmamıştır. Karşılaştırmanın temelini yaklaşık aynı miktarda bütün mantarın ortak son nem hedefine ulaşması için gereken süre, tüketilen elektrik ve bu elektriğe karşılık gelen emisyon oluşturmaktadır.

Bulgular ve Tartışma

Başlangıç nem içeriği ve deney koşulları

Ekim 2026'da Mersin'de yürütülen deneylerde kullanılan bütün kültür mantarlarının yaş bazdaki ortalama başlangıç nem içeriği, etüv yöntemiyle %92,03 olarak belirlenmiştir. Her deneyde yaklaşık 185 g bütün mantar kullanılmış ve kurutmanın sonlandırılmasında yaş bazda %10 son nem hedefi esas alınmıştır. Başlangıç nemi ve kuru madde korunumu kabulüne göre, 185 g başlangıç yükünün bu hedefteki son kütlesi yaklaşık 16,38 g olarak hesaplanmıştır. Kurutma boyunca izlenen beş numunenin deneyi bitirme kütlelerinin belirlenmesi, her birinin başlangıç kütleleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Kabin içi kurutma sıcaklıkları 50, 55 ve 60 °C olarak seçilmiştir. Deneyler sırasında kaydedilen güneş ışınımı, dış ortam sıcaklığı, dış ortam bağıl nemi ve kabin bağıl nemine ait değişim aralıkları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Farklı ayar sıcaklıklarındaki deneylerde çevre ve kabin koşullarının değişim aralıkları

Parametre	50 °C	55 °C	60 °C
Güneş ışınımı (W/m²)	595–875	605–895	575–805
Dış ortam sıcaklığı (°C)	29,6–41,8	28,9–44,1	27,6–42,8
Dış ortam bağıl nemi (%)	11–42	11–38	15–47
Kabin bağıl nemi (%)	15,9–31,8	16,1–34,9	16,5–48,1

Kaynak: Deney kayıtları.

Deney sonuçları, üç farklı sıcaklık koşulu için güneş ışınım değerlerinin benzerlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bunun yanında, farklı çevresel koşullarda yürütüldüğünü göstermektedir. Yapılan deneylerde, kabin bağıl neminin üst sınırı 50 °C'de %31,8 iken 60 °C'de %48,1'e ulaşmıştır. Van Hung et al. (2020) da yapmış olduğu çalışmada istiridye mantarlarının güneşle kurutulmasında kurutma hızının değişiminin ışınım, hava sıcaklığı ve bağıl neme bağlı olarak belirgin değişiklikler gösterdiğini ifade etmiştir. Bu nedenle mevcut deneylerde kurutma süresi ve tüketim farklılıkları, kurutma içi sıcaklıklılarıyla birlikte Tablo 1'deki koşullar dikkate alınarak yorumlanmıştır.

Kurutma süresi ve elektrik tüketimi

Bütün mantarların hedef son nem düzeyine ulaşması için gereken ortalama süreler ile deney başına ortalama elektrik tüketimleri Tablo 2'de verilmiştir. Elektrik tüketimi, Materyal ve Yöntem bölümünde açıklanan sayaç okuma yöntemiyle belirlenmiştir.

Tablo 2. Bütün mantarların farklı sıcaklıklardaki ortalama kurutma süreleri ve elektrik tüketimleri

Gösterge	50 °C	55 °C	60 °C
Kurutma süresi (dakika)	335	231	126
Elektrik tüketimi (kWh/deney)	3,156	2,128	1,187

Kaynak: Deney kayıtları.

Kurutma süreleri, kabinin 50, 55 ve 60 °C sıcaklıkları için sırasıyla 335, 231 ve 126 dakika olarak belirlenmiştir. 50 °C referans alındığında süre, 55 °C'de %31,04, 60 °C'de %62,39 kısalmıştır. 55 °C'den 60 °C'ye geçişte kurutma süresindeki kısalma ise %45,45'tir. İncelenen koşullarda en kısa işlem süresi 60 °C kabin içi sıcaklığında elde edilmiştir.

Bütün mantarda sıcaklık ve ısı sağlama yönteminin süreye etkisi literatürde de görülmektedir. Mittal et al. (2012), bütün kültür mantarının 60 °C sıcak havada kuru bazda 0,08 g/g neme ulaşması için 463 dakika gerektiğini bildirmiştir. Xie et al. (2023), sapları ayrılmış bütün shiitake şapkalarının uzak kızılötesi ışınımla kurutulmasında 50, 55 ve 60 °C için sırasıyla 900, 900 ve 660 dakika belirlemiştir. Mevcut sistemde 60 °C'de bulunan 126 dakikalık süre bu değerlerden daha kısadır.

Güneş enerjisi destekli sistemlerde ışınım ve dış ortam koşulları, kabine sağlanan ısıyı ve yardımcı elektrikli ekipmanların çalışma gereksinimini direkt etkilemektedir. Yapılan deneylerde, kabinin 50, 55 ve 60 °C sıcaklıkları için ölçülen elektrik tüketimleri sıcaklık sırasıyla 3,156, 2,128 ve 1,187 kWh/deneydir. 50 °C'ye göre tüketim azalması 55 °C'de %32,57, 60 °C'de %62,39 olarak hesaplanmıştır. 55 °C'den 60 °C'ye yükseltildiğinde ise tüketim %44,22 azalmıştır. Böylece incelenen deneylerde işlem süresinin kısalmasına toplam elektrik gereksinimindeki azalma eşlik etmiştir. Enerji azalması ile süre azalmasının birbirine yakın olması, tüketim farkının çalışma süresine bağlılığını ortaya koymuştur. Ortalama

tüketimin ortalama süreye bölünmesiyle elde edilen süreç başına ortalama güç göstergesi, 50, 55 ve 60 °C için sırasıyla yaklaşık 0,565, 0,553 ve 0,565 kW'dır. Bu hesap anlık güç kaydı veya ısıtıcının tek başına çektiği güç değildir; sistemin toplam elektrik tüketiminin işlem süresine oranıdır. Isıtıcı, fan ve pompa tüketimleri ayrı ayrı ölçülmediğinden bileşenlerin katkıları bu sonuçlardan ayrıştırılamaz. Motevali et al. (2011), mantar dilimlerinin sıcak havayla kurutulmasında sıcaklık yükseldikçe enerji tüketiminin azalma eğilimi gösterdiğini bildirmiştir. Mevcut bütün mantar deneylerinde gözlenen tüketim azalması bu eğilimle aynı yöndedir. Ancak farklı günlerdeki güneş katkısı ile yardımcı ısıtıcının devrede kalma süresi ayrı olarak belirlenmediğinden değişim yalnız ayar sıcaklığının bağımsız etkisine bağlanmamalıdır.

Elektrik tüketimi kaynaklı karbon emisyonları

Sistemin elektrik tüketimi kaynaklı sera gazı emisyonları, dağıtım hattına bağlı tüketim noktası kabulü altında, 2023 veri yılına ait 0,469 kg CO_2-eşd./kWh faktörü kullanılarak hesaplanmıştır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETKB], 2025). Her sıcaklıktaki ortalama elektrik tüketiminin bu faktörle çarpılmasıyla elde edilen emisyonlar Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Farklı sıcaklıklarda elektrik tüketimine bağlı ortalama emisyonlar

Gösterge	50 °C	55 °C	60 °C
Emisyon (kg CO_2-eşd./deney)	1,4802	0,9980	0,5567

Kaynak: Deney kayıtları ve ETKB (2025) emisyon faktörü kullanılarak hesaplanmıştır.

Ortalama emisyon miktarları, kabinin 50, 55 ve 60 °C sıcaklıklarında sırasıyla 1,4802, 0,9980 ve 0,5567 kg CO_2-eşd./deney olarak hesaplanmıştır. 50 °C ile karşılaştırıldığında deney başına emisyon 55 °C'de yaklaşık 0,4821 kg CO_2-eşd., 60

°C'de 0,9235 kg CO_2-eşd. daha düşüktür. Bütün koşullarda aynı emisyon faktörü kullanıldığından emisyon azalması elektrik tüketimindeki azalmayla aynı oranda gerçekleşmiştir. İncelenen sistemde 60 °C sıcaklık koşulu elektrik tüketimi ve elektrik kaynaklı emisyon bakımından en düşük değerleri sağlamıştır. Bununla birlikte güneş enerjisinin sağladığı emisyon tasarrufu, yalnız elektrikle çalışan eşdeğer bir referans deney bulunmadığından ayrıca hesaplanmamıştır. Sonuçlar, yaklaşık 185 g bütün mantarın belirtilen çevre koşullarında kurutulması ve seçilen şebeke emisyon faktörü kapsamında geçerlidir. Bu çalışmada belirlenen karbon emisyon değerleri kurutucudan doğrudan ölçülen gaz çıkışını değil, şebekeden çekilip kullanılan elektriğe atfedilen dolaylı emisyonu göstermektedir. Literatürde ise; bu çalışmamız gibi şebekeden çekilip kullanılan elektriğe göre yapılan karbon emisyonları hesabı yanında direkt kurutma sisteminin imalatı sırasındaki karbon emisyonları içinde değerlendirmeler yer almaktadır. Mantar kurutmaya ilişkin Van Hung et al. (2020), güneşle çalışan bir kurutucu için 0,33 kg CO_2-eşd./kg kuru ürün olduğunu belirtmiştir. Ancak değerin cihaz imalatından kaynaklandığını belirtilmiştir. Mevcut çalışmada ise deney başına şebeke elektriği tüketimi hesaplanmış; cihaz imalatına ait emisyon değeri hesaplamaya dahil edilmemiştir.

Sonuç

Ekim 2026'da Mersin'de gerçekleştirilen kurutma deneylerinde, güneş enerjisi destekli hibrit kurutucuda bütün kültür mantarlarının 50, 55 ve 60 °C sıcaklıklarında kurutulması için harcanan elektrik miktarını ve kullanılan elektrik kaynaklı açığa çıkan karbon emisyonları değerlendirilmiştir. Yaş bazdaki başlangıç nemi %92,03 olan ürün için yaklaşık 185 g yükleme ve yaş bazda %10 son nem hedefi esas alınmıştır. Ortalama kurutma süreleri, 50, 55 ve 60 °C sıcaklıkları için sırasıyla 335, 231 ve 126 dakika;

toplam elektrik tüketimleri 3,156, 2,128 ve 1,187 kWh/deney olarak belirlenmiştir.

50 °C'ye göre elektrik tüketimindeki azalma 55 °C'de %32,57, 60 °C'de %62,39 olarak hesaplanmıştır. 0,469 kg CO_2-eşd./kWh emisyon faktörüyle hesaplanan ortalama emisyonlar 50, 55 ve 60 °C için sırasıyla 1,4802, 0,9980 ve 0,5567 kg CO_2-eşd./deneydir. Bu kapsamda 60 °C sıcaklık ayarı, incelenen sıcaklıklar arasında en kısa kurutma süresini ve en düşük elektrik tüketimi kaynaklı karbon emisyonunu sağlamıştır. Bu sonuç, belirtilen ürün yükü ve deney koşullarında, bütün mantarların kurutma işlemi için elektrik kullanımı bakımından 60 °C sıcaklık koşullarının daha uygun olduğunu göstermektedir. Ürün kalitesi değerlendirilmediğinden aynı sıcaklık bütün kalite ölçütleri açısından en uygun koşul olarak genellenemez.

Teşekkür

Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2024-TP3-5113 numaralı proje ile desteklenerek; Addmix Tarım Danışmanlık Ltd. Şti. firması ile birlikte imal edilmiştir.

Kaynakça/References

Çelen, S., & Kuş, S. (2016). Mikrodalga enerjisinin ayva dilimlerinin kurutulmasına etkisi. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges), 6*(3), 30–40. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/460601

Çerçi, K. N., Saydam, D. B., & Hürdoğan, E. (2022). Drying of mushroom slices in a new type solar drying system and under open sun: Experimental and mathematical investigation. *European Mechanical Science, 6*(4), 221–232. https://doi.org/10.26701/ems.1144456

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025, 31 Aralık). *2023 Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri*. https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-elektrik-uretim-tuketim-emisyon-faktorleri

Gökalp, Z., & Çetin, N. (2022). Evaluation of GGE of different process for drying orange slices. *Current Trends in Natural Sciences, 11*(21), 170–175. https://doi.org/10.47068/ctns.2022.v11i21.020

Karpuzcu, S., Kaplan, M., & Çetin, N. (2023). Yoncanın kurutulmasında farklı kurutma sistemlerinin sera gazı emisyonlarına etkisi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 10*(3), 615–621. https://doi.org/10.30910/turkjans.1215223

Kaveh, M., Amiri Chayjan, R., Taghinezhad, E., Rasooli Sharabiani, V., & Motevali, A. (2020). Evaluation of specific energy consumption and GHG emissions for different drying methods (Case study: Pistacia Atlantica). *Journal of Cleaner Production, 259*, Article 120963. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120963

Mittal, T. C., Sharma, S. R., Muker, J. S., & Gupta, S. K. (2012). Drying behaviour and change in colour and textural properties of mushroom during drying. *International Journal of Food Engineering*, *8*(1), Article 10. https://doi.org/10.1515/1556-3758.1696

Motevali, A., Minaei, S., Khoshtaghaza, M. H., & Amirnejat, H. (2011). Comparison of energy consumption and specific energy requirements of different methods for drying mushroom slices. *Energy*, *36*(11), 6433–6441. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.024

Motevali, A., & Tabatabaee Koloor, R. (2017). A comparison between pollutants and greenhouse gas emissions from operation of different dryers based on energy consumption of power plants. *Journal of Cleaner Production*, *154*, 445–461. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.219

Omari, A., Behroozi-Khazaei, N., & Sharifian, F. (2018). Drying kinetic and artificial neural network modeling of mushroom drying process in microwave-hot air dryer. *Journal of Food Process Engineering*, *41*(7), e12849. https://doi.org/10.1111/jfpe.12849

Rhim, J.-W., & Lee, J. H. (2011). Drying kinetics of whole and sliced shiitake mushrooms (Lentinus edodes). *Food Science and Biotechnology*, *20*(2), 419–427. https://doi.org/10.1007/s10068-011-0059-9

Şevik, S., Aktaş, M., Doğan, H., & Koçak, S. (2013). Mushroom drying with solar assisted heat pump system. *Energy Conversion and Management*, *72*, 171–178. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.035

Taşova, M., & Güzel, M. (2020). Kurutma sıcaklıklarının mantarın (Agaricus bisporus L.) rehidrasyon, model, kuruma performansı ve yüzey alanı değerlerine etkisi. *Turkish Journal of Agricultural Engineering Research*, *1*(1), 74–84. https://dergipark.org.tr/en/pub/turkager/article/704568

Van Hung, N., Fuertes, L. A., Balingbing, C., Paulo Roxas, A., Tala, M., & Gummert, M. (2020). Development and performance investigation of an inflatable solar drying technology for oyster mushroom. *Energies*, *13*(16), 4122. https://doi.org/10.3390/en13164122

Xie, L., Jiang, Y.-S., Wang, Y.-B., Xiao, H.-W., Liu, W., Ma, Y., & Zhao, X.-Y. (2023). Changes in the physical properties and volatile odor characteristics of shiitake mushrooms (Lentinula edodes) in far infrared radiation drying. *Foods*, *12*(17), 3213. https://doi.org/10.3390/foods12173213

BÖLÜM 3

BAHÇE SULAMASINDA SÜRDÜRÜLEBİLİR YAĞMUR SUYU HASADI

Canan CİMŞİT[1], Elif ÖĞÜT[2]

Giriş

Su, insanların temel ihtiyaçlarının karşılanmasının yanı sıra, tarım, endüstri, turizm ve ulaşım alanlarında da oldukça önem arz eden doğal bir kaynaktır. Son yıllarda dünyada bazı bölgelerde şiddetli kuraklıklara, diğer bölgelerde şiddetli yağışlar ve sellere neden olan iklim değişikliği ile birlikte, insanların su kaynaklarını bilinçsizce kullanması ve artan su talepleri endişe yaratmaktadır. Ayrıca, dünya genelinde artan kentleşme ve endüstrileşme sonucu su kirliliği nedeniyle su kaynaklarının ulaşılabilirliği azalmaktadır. Tüm bunlar alternatif su kaynaklarının bulunması ve suyun etkin kullanımına yönelik çözüm önerilerinin bir an evvel uygulamaya geçirilmesini zorunlu hale getirmektedir (Melike ve Rukiah, 2022).

2015 yılında Birleşmiş Milletler (BM) 2030 yılı için 17 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefi önermiştir. Bunlar arasında temiz suya erişim (Hedef 6), uygun fiyatlı ve temiz enerji (Hedef 7), sürdürülebilir şehirler ve topluluklar (Hedef 11) ve iklim değişikliğinin etkilerinden kaçınma eylemleri (Hedef 13) yer alıyor (Şekil 1). Yağmur suyu hasadı sistemi, belirtilen hedeflere ulaşılmasına katkıda bulunmak için umut vadeden bir teknolojidir.



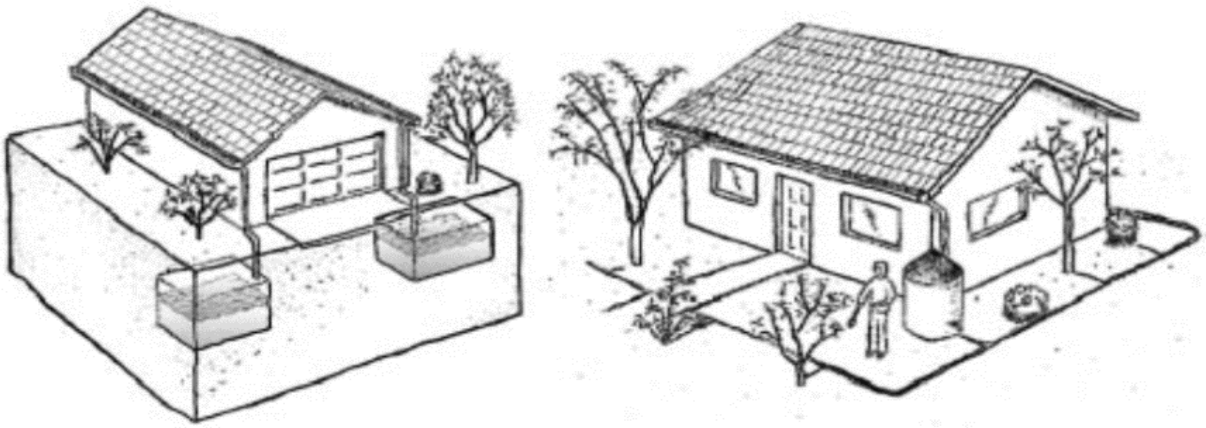
Şekil1. Yağmur Suyu Hasadı Sisteminde Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

Yağmur suyu hasadı; özellikle su sıkıntısı çeken kurak ve yarı kurak bölgelerde yeryüzüne düşen yağmurun toplanıp depolanması olarak ifade edilebilir. Yeterli yağışın bulunmadığı, su temini için altyapısı olmayan, yüzeysel ve yeraltı su kaynaklarının yetersiz olduğu yerleşkeler için iyi bir çözüm olarak sunulmaktadır (Börü ve Toprak, 2022).

---

[1] Kocaeli Üniversitesi, Gölcük MYO, Kocaeli, Türkiye
[2]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Umuttepe, Kocaeli, Türkiye

Su hasadı teknikleri arasında bulunan çatı yüzeyinden su hasadı yönteminde çatı yüzeyine düşen yağış toplanmakta, yağmur olukları yardımıyla toprak yüzeyindeki bir tanka ya da yer altındaki bir depoya aktarılmaktadır (Şekil 2). Evlerin çatılarından toplanan yağmur suları arıtılarak içme suyu seviyesine getirilebildiği gibi bina içerisinde çamaşır makineleri ve tuvalet rezervuarlarında ya da bina dışında bahçe sulama, araç yıkama ve süs havuzunu doldurmakta da kullanılabilmektedir. Yağmur sularının içme suyu amaçlı kullanılma durumunda suyun filtrasyonu, klorlanması ve dezenfekte edilmesi ya da kaynatılması gerekmektedir (Kılıç ve Abuş, 2018).



Şekil 2. Çatı yüzeyinden toplanan suyun depolama ortamı

Yağmur suyunun toplanarak alternatif su ihtiyaçlarının giderilmesinde kullanılması hem su tasarrufu hemde su kaynaklarının korunması ve sürdürülebilirliği açısından büyük önem arz etmektedir (Kılıç ve Abuş, 2018). YSH sistemlerinin kurulması şehirlerin su konusunda kendine yetebilme kapasitesini artırır ve yeni merkezi su altyapıları inşa etme ihtiyacının ertelenmesine yardımcı olabilir (Campisano vd., 2017).

Çevre dostu ve sürdürülebilir bir uygulama olan yağmur suyu hasadı, yağışların çeşitli yöntemlerle toplanması neticesinde, doğrudan veya dolaylı yollarla depolanması sonrasında başta tarımsal olmak üzere günlük su tüketim ihtiyaçlarında ve endüstriyel/sanayi faaliyetlerinde su tüketiminin karşılanması üzerine kurulduğu bir su hasadı tekniğidir. Bu tekniğin en büyük önemi temiz su kaynaklarının sürdürülebilirliğini sağlaması ve bunlar üzerindeki baskının azaltılmasına katkı sunması şeklindedir. Yağmur suyundan daha fazla faydalanılması özellikle tarım sektöründe sulama suyu ihtiyacını azaltma yoluyla tarımda daha az su ihtiyacına neden olmaktadır. Böylece hem temiz suyun sürdürülebilirliği sağlanırken hem de gıda üretimine de devam edilebilmektedir (Yerli ve Çakmakcı, 2026).

Yağmur suyu hasadı sistemlerinin üç temel amacı vardır: birincisi, makro ölçekte, kentsel büyümeye karşı stratejik bir su çözümü sunmak; ikincisi, tasarım ölçeğinde, bir binanın veya mahallenin yağmur suyu talebini mümkün olan en yüksek oranda karşılamak; ve üçüncüsü, merkezi olmayan bir su sistemini gerekçelendiren ekonomik, çevresel ve sosyal sonuçlar elde etmek (Morales-Pinzon vd., 2015).

Yağmur suyu hasadı, su tedariği hususunda alternatif bir kaynak oluşturmanın yanı sıra farklı katkılar da sunmaktadır. Geçirimsiz yüzeylerden oluşan şehirlere düşen yağışlar, şehirsel alanlarda sellere neden olabilmektedir. Yapılan çalışmalar (Freni & Liuzzo, 2019; Jamali vd., 2020; Tamagnone vd., 2020), Yağmur suyu hasadının şehir sellerini sınırlandırma konusunda etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü yağmur suyu hasadı, yağmur suyu akışını azaltarak şehirlerdeki drenaj sistemlerini de rahatlatabilmektedir (Ruso, 2021).Tarımsal arazilerde yapılan YSH çalışmaları, toprak erozyonu üzerinde olumlu katkılara neden olabilmektedir (Cook vd., 2000; Salem vd., 2014). Yağmur suyu hasadı, merkezi su tedarik sistemlerine kıyasla enerji kullanımı ve dolayısıyla sera gazı emisyonlarını da azaltabilmektedir (Silva et al., 2022). Yağmur suyu hasadının ekstra bu olumlu yanları, günümüzde alternatif bir kaynak olarak tercih edilmesini daha da güçlendirmektedir (Kemal Ersayin, 2025).

RWHS, su kaynaklarını çeşitlendirmenin ve daha yüksek düzeyde su güvenliği sağlamanın yollarından biridir. Su güvenliğindeki bu artış, yağmur suyunun sürdürülebilir kullanımını temsil eder. Ayrıca, su temin hizmetlerini etkileyebilecek nitelikteki şiddetli yağışların artmasına ve yağışsız geçen günlerin uzamasına yol açabilen iklim değişikliğinin etkilerini en aza indirmeye de yardımcı olabilir (Sa ´ Silva vd., 2022).

İklim değişikliği bağlamında, aşırı yağış olayları sıklıkla meydana gelmektedir. Hızlı kentleşmeyle birlikte hidrolojik süreçler de önemli ölçüde. Bu ikili bağlamda, yağışın ve hidrolojik döngü sürecinin değişim özelliklerinin incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Bir yandan, bölgesel yağmur suyu hasadı potansiyelinin makul bir şekilde tahmin edilebilmesi için yağış ve akışın değişim dinamiklerine ilişkin araştırmaların güçlendirilmesi gerekmektedir. Diğer yandan, "karbon nötr" hedefi doğrultusunda, yeşil ve gri altyapıların tüm yaşam döngüleri boyunca ortaya çıkan karbon emisyonları ve karbon yutak kapasiteleri de kapsamlı bir şekilde dikkate alınmalıdır (Zhang vd., 2022).

Bu çalışmada, yağmur hasadının planlandığı binanın çatı yüzeylerinden toplanacak yağmur sularının depolarda toplanmak suretiyle bahçe sulamasında kullanılabilir konusunda bir çözüm sunmaktadır. Böylece bu kullanım alanlarında yağmur suyu kullanımı ile şebeke suyu kullanımı azaltılabilir, hem enerji hem de su tasarrufu sağlanabilir.

2. Materyal Ve Metot

2.1. Çatı Yağmur Suyu Hasadı

Çatı üstü yağmur suyu hasadı sistemi, yağmur suyunun çatı alanlarından toplandığı ve rezervuarlarda depolandığı bir tekniktir. Hasat edilen yağmur suyu, yapay yeniden doldurma teknikleri ile yüzey veya yeraltı suyu deposunda depolanabilir. Sistemde çatılardan toplanan yağmur suyunu depolama tanklarına veya besleme çukuruna aktarmak için kanal veya oluklar gereklidir. Çatılardan veya terastan yağmur suyunu aktarmak için bir veya daha fazla tahliye borusu oluklara bağlanır. Oluğun boyutu, en şiddetli yağmur sırasındaki akışa göre tasarlanır. Sistemle hem enerji hem de su tasarrufu sağlanır (URL 1).

Yağmur Suyu Miktarının Hesaplanması

Yağmur suyu toplama (YKK) sisteminin uygun şekilde tasarlanması ve değerlendirilmesi, sistem performansını ve su temininin istikrarını iyileştirmek için gereklidir (Mun and Han, 2012).

Çatıdan toplanacak yağmur suyu miktarının hesaplanması için, çatı ve filtre etkinlik katsayıları, bölgeye düşen yağış miktarı ve toplama alanının büyüklüğü gibi bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır (Melike ve Rukiah, 2022).

Buna göre çatıda toplanan yağmur suyu miktarı;

Çatı Yağmur Suyu Miktarı (m^3) = Yağmur toplama alanı x yağış miktarı x çatı katsayısı x filtre etkinlik katsayısı

Yağmur toplama alanı: Bina çatı alanıdır.
Yağış miktarı: Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından belirlenen toplam yıllık yağış miktarıdır (Kocaeli için).
Çatı katsayısı: Alman standartları tarafından DIN1989'da 0,8 olarak belirtilen katsayıdır. Çatıya düşen bütün yağmurun geri dönüştürülemeyeceğini ifade etmektedir.
Filtre etkinlik katsayısı: Alman standartları tarafından DIN1989'da belirtilen katsayıdır (0,9).

Örnek Uygulama (Kocaeli)

Çatı alanı: 1500 m²
Kocaeli için ortalama yıllık yağış miktarı 810,2 mm=810,2 kg/m^2 (Ölçüm periyodu: 1929-2025, (URL 2))
Çatı Yağmur Suyu Miktarı: 1500 x 810,2 x 0.9 x 0.8 = 875.016 m³'tür.

1000 m² bahçe alanı sulanması hedeflenmektedir.

Yeşil alanların su ihtiyacının hesaplanmasında her bir sulama için su miktarı 5 lt /m² olarak kabul edilmiştir (Melike ve Rukiah, 2022).

Günlük su ihtiyacı: 1000 m² x 5 lt /m² = 5000 lt = 5 m³

Haftada iki kez sulama yapılırsa yıllık su ihtiyacı: 5 m³ x 365/(7/2) = 521 .4 m³

Yağmur suyu hasadı miktarı bahçemizi haftada iki kez sulamak için yeterli gelmektedir.

<u>Yağmur Suyu Hasadı Depo Hacmi</u>

Kocaeli için Aralık ayı yağış miktarı 107,9 mm = 107,9 kg/m²

Su Deposu: 1000 m² x 0,8 x 0,9 x 107,9 kg/m² .= 77.69 m³ bulunur.

Depo boyutlandırması:

2 adet silindirik tank yapılacak olursa:

77.69 / 2= 38.85 m³

H= 3 m kabul edilirse,

$A = V / H = 38.85\ m^3 / 3\ m = 13\ m^2$

$A = \pi D^2/4$

$13x4 = \pi D^2$

D = 4 m

Buna göre depo boyutu:

Depo sayısı : 2

Depo çapı : 4 m

Depo yüksekliği : 3 m

Yağmur suyu hasadı sistemlerinde depo seçiminde depo boyutu önemlidir. Eğer gereğinden büyük büyük bir depo seçilirse gereksiz yere fazla malzeme kullanımı bu da daha yüksek emisyon üretimi anlamına gelir. Gereğinden küçük depo seçilmesi durumunda ise de yağmur suyunun önemli bir bölümü taşarak kaybedilmesine neden olabilir. Bu nedenle optimum depo boyutu belirlenmesi önemlidir. Bu durumda sistemin çevresel ve ekonomik performansını artırır.

2.2. Yağmur Suyu Hasadının Karbon Ayak İzine Etkisi

Yağmur suyu hasadı ile karbon ayak izi arasındaki ilişki şu şekilde gösterilebilir:

Yağmur suyu hasadı

↓

Yağmur suyu kullanımı ile Şebeke suyu kullanımının azalması

↓

Su temini için enerji tüketiminin azalması

↓

Enerji tüketiminin azalmasıyla CO_2 emisyonlarının azalması

Geleneksel şebeke suyunda suyun kaynaktan alınması, arıtılması, pompalanması ve dağıtılması için enerji kullanılmaktadır. Yağmur suyunun yerinde toplanması ve kullanılması bu işlemlerin bir bölümünü ortadan kaldırabilir. Ancak burada yağmur suyu hasadı sistemlerinde özellikle pompa ve pompalama elektriğinin çevresel etkiler açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir (Ghimire vd., 2014). Karbon hesabında sadece işletme değil, tüm yaşam döngüsü dikkate alınmalıdır. Yani düşük karbonlu olabilmesi için yalnızca su tasarrufuna değil, depo, pompa, filtre, borulama ve bakım kaynaklı yaşam döngüsü etkilerine de dikkat edilmelidir (Rashid vd., 2021). Bu nedenle yağmur suyu için gerekli olan depo, enerji verimli pompa, damla sulama ve uygun depo hacmi gibi bileşenler bahçe sulamasında su ve

enerji verimliliğini birlikte ele alan bir sürdürülebilirlik yaklaşımı olarak değerlendirilebilir. Bahçe sulamasında en uygun bu yaklaşımla şebeke suyu tüketimi azaltılırken, uygun sistem tasarımıyla enerji tüketimi ve buna bağlı CO_2-eşdeğeri emisyonların da azaltılması mümkün olabilir.

3. Sonuçlar

Yağmur suyu, başta sulama amaçlı olmak üzere sudan ve su maliyetlerinden tasarruf etmek, kuraklığı önlemek, yağmur suyunun boşa gitmesini önlemek, yeraltı suyu kaynaklarını korumak, taşkın ve sel riskini azaltmak, şebeke suyu temini için gerekli olan enerji tüketimini azaltmak, tarımsal üretimi desteklemek ve ekolojik ayak izinizi azaltmak açısından çok önemlidir. Yağmur suyu hasadı, doğru boyutlandırılmış ve yaşam döngüsü perspektifiyle tasarlanması durumunda başta bahçe sulaması olmak üzere su verimliliği ve düşük karbonlu etkili bir sürdürülebilirlik uygulama olarak değerlendirilebilir.

Yağmur suyu hasadı, daha sonra kullanılmak üzere çatı gibi nispeten temiz yüzeylerden yağmur toplamak, iletmek ve depolamak için sürdürülebilir, ekonomik ve güvenli bir teknoloji yöntemdir. İklim değişikliği ve artan su talebi göz önüne alındığında, bireysel konutlardan sanayi tesislerine kadar geniş bir alanda uygulanması gereken çevre dostu bir su yönetim çözümüdür.

Kaynaklar

Melike Yalılı Kılıç, Kawthr Rukiah, İstanbul Havalimanı'nda Yağmur Suyu Hasadı, OKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi5(2), 495-504, 2022.

Songül Börü, Z. Fuat Toprak, Yağmur Suyu Hasadı Literatürü Üzerine Bir İnceleme, Environmental Impact Assesment Processes for Hydropower Plants, Vol : 5, Number : 2, Page : 42-50, 2022.

Melike Yalılı Kılıç, Merve Nur Abuş, Bahçeli Bir Konut Örneğinde Yağmur Suyu Hasadı, Uluslararası Tarım ve Yaban Hayatı Bilimleri Dergisi (UTYHBD), 4(2): 209 -215, 2018.

Campisano et al., Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives, Water Research 115 195-209, 2017.

Caner Yerli, Talip Çakmakcı, Yağmur Suyu Hasadı; Önem, Kullanım İmkanı ve Sınıflandırması: Türkiye İçin Bir Değerlendirme Analizi, KSÜ Tarım ve Doğa Derg 29 (6), 1473-1483, 2026.

Morales-Pinzon et al., Modelling for economic cost and environmental analysis of rainwater harvesting systems, Journal of Cleaner Production 87 2015, 613-626.

Kemal Ersayin, Yağmur Suyu Hasadı Potansiyelinin Belirlenmesi: Tokat İl Merkezi Örneği Determining Rainwater Harvesting Potential: Tokat City Center Example,

Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi 8(2): 173-182, 2025.

Sa ´ Silva et al., Exploring environmental, economic and social aspects of rainwater harvesting systems: A review, Sustainable Cities and Society 76 2022 103475.

Zhang et al., Review on mechanism and technical measures of urban rainwater harvesting, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 983 2022, 012106.

URL 1:https://www.tarimorman.gov.tr

J.S. Mun, M.Y. Han, Design and operational parameters of a rooftop rainwater harvesting system:Definition, sensitivity and verification, Journal of Environmental Management 93, 147-153, 2012.

URL 2: https://www.mgm.gov.tr/

Ghimire et al., Life cycle assessment of domestic and agricultural rainwater harvesting systems, Environ Sci Technol. 2014 Apr 1;48(7):4069-77.

Rashid et al., Life cycle assessment of rainwater harvesting system components – To determine environmentally sustainable design, Journal of Cleaner Production, Volume 326 2021.

BÖLÜM 4

TÜRKİYE'NİN ENERJİ GÜVENLİĞİ ÇERÇEVESİNDE ULUSLARARASI DOĞAL GAZ POLİTİKALARININ VE ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ ODAKLI ULUSAL YASAL DÜZENLEMELERİN ANALİZİ

ÖZGE KAPLAN[1]
SELÇUK SARIKOÇ[2]

Özet

Bu çalışma, Türkiye'nin enerji güvenliği politikalarını uluslararası doğal gaz jeopolitiği ve enerji dönüşümü odaklı ulusal yasal düzenlemeler çerçevesinde analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada enerji güvenliği kavramının teorik boyutu, Türkiye'nin enerji merkezi olma stratejisi, doğal gaz politikaları, enerji dönüşümü süreci ve 4646 Sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu, 5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kanunu, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ile İklim Kanunu Taslağı eksenindeki hukuki düzenlemeler doküman analizi ve literatür taraması yöntemiyle incelenmiş; ayrıca

[1] Yüksek Lisans Öğrencisi, Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji ve Uygulamaları Bölümü, ozgekaplan93@gmail.com
Orcid: 0000-0003-4858-0553
[2] Doç. Dr., Amasya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, sarikocselcuk@gmail.com, Orcid: 0000-0003-1190-5238

Rusya-Ukrayna Savaşı, Doğu Akdeniz rekabeti ve Hürmüz Boğazı krizi gibi güncel jeopolitik gelişmelerin Türkiye'nin enerji arz güvenliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, Türkiye'nin TANAP, TürkAkım, LNG ve FSRU yatırımları, depolama kapasitesi artışı, yenilenebilir enerji hamleleri ve yerli doğal gaz üretimi sayesinde enerji arz güvenliğini güçlendirdiğini; aynı zamanda enerji diplomasisi ve enerji merkezi olma hedefi doğrultusunda bölgesel enerji jeopolitiğinde daha etkin bir aktöre dönüştüğünü göstermekte olup, enerji dönüşümüne yönelik yasal düzenlemelerin ise Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefiyle uyumlu biçimde sürdürülebilir ve çok boyutlu bir enerji güvenliği modeli oluşturmasına katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Giriş

Enerji, günümüzde devletlerin ekonomik kalkınması, ulusal güvenliği ve dış politika stratejileri açısından temel unsurlardan biri haline gelmiştir. Küresel enerji talebindeki artış, enerji kaynaklarının belirli bölgelerde yoğunlaşması ve jeopolitik krizlerin etkisiyle enerji güvenliği kavramı uluslararası ilişkilerde stratejik bir önem kazanmıştır.

Enerji kaynakları bakımından dışa bağımlı bir ülke olan Türkiye, artan enerji ihtiyacı doğrultusunda enerji arz güvenliğini temel politika alanlarından biri olarak ele almaktadır. Bununla birlikte Türkiye, Avrupa, Orta Doğu, Kafkasya ve Orta Asya arasında bulunan jeostratejik konumu sayesinde enerji ticareti ve transit hatlar açısından önemli avantajlara sahiptir. TANAP, TürkAkım ve Bakü–Tiflis–Ceyhan gibi projeler Türkiye'nin enerji jeopolitiğindeki stratejik önemini artırırken; LNG altyapısı, depolama tesisleri ve yenilenebilir enerji yatırımları da enerji arz güvenliğini güçlendirmektedir.

Çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin geleneksel ve fosil yakıt odaklı "Bölgesel Enerji Ticaret Merkezi (Hub) Olma" stratejik vizyonu ile küresel iklim rejiminin dayattığı "2053 Net Sıfır Emisyon" taahhüdü ve enerji dönüşümü hedefleri arasındaki yapısal/hukuki uyumu analiz etmektir. Bu amaç doğrultusunda makalenin temel özgün araştırma sorusu şu şekilde belirlenmiştir:

"Türkiye'nin uluslararası doğal gaz jeopolitiğinde bağımlılığı esnetmeye ve bir fiyatlandırma merkezi (hub) kurmaya yönelik altyapı/diplomasi hamleleri, ulusal yasal mevzuat (4646, 5346, 5627 Sayılı Kanunlar ve İklim Kanunu Taslağı) düzleminde ilan edilen dekarbonizasyon ve yeşil dönüşüm hedefleriyle stratejik ve sistemsel olarak nasıl sentezlenmektedir?"

Literatürde Türkiye'nin enerji politikaları genellikle ya saf jeopolitik/boru hatları ekseninde ya da tamamen teknik/hukuki yenilenebilir enerji mevzuatı bağlamında tek boyutlu olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın literatüre temel katkısı ve özgün değeri, dışsal jeopolitik şoklar (Hürmüz Boğazı Krizi, Rusya-Ukrayna Savaşı) ile içsel yasal reformları (ETS, YEKDEM, YEKA) entegre bir analitik çerçevede buluşturması ve doğal gazı bir amaç değil yeşil dönüşümün "geçiş yakıtı" olarak konumlandıran dinamik bir model sunmasıdır.

Yöntem

Bu çalışma, küresel enerji jeopolitiğindeki hızlı değişimler ile ulusal yasal mevzuattaki dönüşümleri eş zamanlı ve bütüncül bir yaklaşımla inceleyebilmek adına nitel araştırma metodolojisine uygun olarak kurgulanmıştır. Araştırma, nitel araştırma desenlerinden "Niteliksel İçerik Analizi" (Qualitative Content Analysis) ve "Yönlendirilmiş Doküman Analizi" (Directed Document Analysis) yöntemlerine dayanmaktadır. Metodolojik yaklaşım olarak doküman analizinin seçilmesinin temel nedeni; strateji belgeleri, kanun metinleri ve uluslararası kurumsal raporlar

gibi birincil elden kurumsal verilerin, Türkiye'nin enerji politikalarındaki zihniyet ve yapı değişimini en nesnel şekilde yansıtan somut göstergeler olmasıdır.

Çalışmanın metodolojik tasarımı, literatürde sıklıkla rastlanan doğrusal ve kronolojik bir olay anlatımı yerine, dinamik ve çok boyutlu bir analitik çerçeve sunan "Dışsal Jeopolitik Riskler - İçsel Yasal Enstrümanlar - Stratejik Çıktılar" matrisi üzerine inşa edilmiştir. Bu matris sayesinde, uluslararası sistemde meydana gelen ani şoklar ile ulusal hukuk sisteminin bu şoklara verdiği kurumsal/yasal tepkiler arasındaki diyalektik bağ kurulabilmiştir.

Araştırmanın ampirik zeminini oluşturan analiz sürecinde, verilerin güvenirliğini ve çeşitliliğini sağlamak adına geniş bir resmi veri seti kullanılmıştır. Bu doğrultuda birincil veri kaynağı olarak yasal ve normatif çerçeveyi çizen resmi devlet belgeleri; özellikle Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yayımlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı, 4646 Sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu, 5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu metinleri ve yakın dönemin en kritik dönüşüm eşiğini oluşturan İklim Kanunu Taslağı derinlemesine incelenmiştir. Bu ulusal mevzuat, uluslararası sistemdeki arz-talep dengelerini ve küresel darboğazları gösteren Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ile ABD Enerji Enformasyon İdaresi (EIA) verileri ve kurumsal raporlarıyla desteklenmiştir. Ayrıca, ülkenin fiziksel altyapı kapasitesindeki (FSRU terminalleri, depolama tesisleri ve boru hatları) somut genişlemeyi haritalandırmak adına Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB) 2026 yılı güncel resmi haritası mekânsal ve stratejik bir veri kaynağı olarak analize dahil edilmiştir.

Elde edilen tüm bu nitel ve nicel veriler, doğrusal bir metin okumasının ötesine geçirilerek çağdaş enerji güvenliği literatürünün üç temel boyutu olan Fiziksel (Arz Güvenliği ve Altyapı Temini), Ekonomik (Fiyat İstikrarı ve Piyasa Entegrasyonu) ve Çevresel

(Sürdürülebilirlik ve Dekarbonizasyon) boyutları referans alınarak sistematik bir kodlama ve tematik tasnif sürecine tabi tutulmuştur. Bu analitik süzgeç sayesinde, makro ölçekteki küresel krizler ile mikro ölçekteki ulusal mevzuat çıktıları arasındaki nedensellik ilişkileri somutlaştırılmıştır.

Bu doğrultuda yapılan bağlamsal analizlerde; Hürmüz Boğazı'nda yaşanan bölgesel krizlerin küresel ve ulusal piyasalarda yarattığı ekonomik boyut (fiyat oynaklığı, navlun ve tedarik maliyetlerinin artışı) ile İklim Kanunu Taslağı ve kurulması planlanan Emisyon Ticaret Sistemi'nin (ETS) getirdiği çevresel boyut (karbon maliyetleri, emisyon sınırlandırmaları ve yeşil dönüşüm zorunluluğu) arasındaki yapısal etkileşimler ve çelişkiler ampirik verilerle çözümlenmiştir. Böylece çalışmanın yöntemi, Türkiye'nin hem bir "Enerji Ticaret Merkezi (Hub)" olma hedefinin ekonomik rasyonelini hem de "2053 Net Sıfır" taahhüdünün çevresel normatif sınırlarını aynı analitik düzlemde sorgulamaya imkan tanımıştır.

Teorik Çerçeve ve Uluslararası Enerji Politikalarına Genel Bakış

Türkiye'nin enerji güvenliği ve dönüşüm stratejilerini analiz edebilmek için öncelikle küresel enerji sistemini şekillendiren teorik parametrelerin ve jeopolitik dinamiklerin ortaya konulması gerekmektedir. Günümüzde enerji politikaları yalnızca iktisadi bir meta arzı meselesi olmaktan çıkmış; uluslararası ilişkilerin güç dengelerini belirleyen, iklim rejimiyle sınırları çizilen ve ulusal mevzuatların küresel standartlara uyumunu zorunlu kılan çok boyutlu bir disipline dönüşmüştür. Bu bölümde, enerji güvenliğinin geleneksel ve modern tanımları arasındaki paradigma değişimi ele alınacak; ardından küresel aktörlerin stratejik hamleleri ile bölgesel doğal gaz koridorlarının oluşturduğu jeopolitik zemin analiz edilecektir. Özellikle Paris Anlaşması sonrası ivme kazanan enerji

dönüşümü süreçlerinin uluslararası ticaret üzerindeki etkileri, Türkiye'nin ulusal politikalarının şekillendiği dışsal çerçeveyi anlamlandırmak adına temel referans noktasını oluşturacaktır.

Enerji Güvenliği Kavramı

Enerji güvenliği kavramının evrensel anlamda kabul görmüş bir tanımlamasının bulunmamasının yanında bazı akademisyenler ve uluslararası kuruluşlar kavramla ilgili belli genel tanımlamalar yapmaya çalışmışlardır.

Uluslararası Enerji Ajansına (IEA) göre enerji güvenliği, "tüm yakıt ve enerji kaynaklarına güvenilir ve uygun fiyatlı erişim" olarak tanımlanmıştır. "NATO enerji güvenliğini ele alırken; enerji altyapısının tesisi, istikrarlı bir enerji arzı oluşturulması, ulaşım olanakları ve enerji nakil güzergahlarının korunması üzerinde durmaktadır." (Yılmaz, 2017, s. 172)

Uluslararası kuruluşlarca enerji güvenliği temel olarak kesintisiz enerji arzı, uygun fiyat, altyapı güvenliği, sürdürülebilirlik ve öngörülebilirlik ilkeleri etrafında şekillendiği görülmektedir. Bu çerçevede enerji güvenliği, yalnızca enerjiye erişim meselesi değil aynı zamanda ekonomik istikrar, ulusal güvenlik ve çevresel sürdürülebilirlik ile doğrudan ilişkili çok boyutlu bir kavram niteliği taşımaktadır.

Daniel Yergin enerji güvenliğini genel çerçevede, enerjiye makul maliyetler ve yeterli miktarlar üzerinden erişimin sağlanması olarak tanımlamakta ve bu kavramın ülkelerin ekonomik yapıları ile enerji profillerine bağlı olarak farklı anlamlar kazandığını vurgulamaktadır. Bu bağlamda enerji güvenliği; sanayileşmiş ülkelerde enerji ithalatına bağlı kırılganlıkların azaltılması, gelişmekte olan ülkelerde enerji fiyat dalgalanmalarının makroekonomik denge üzerindeki etkilerinin sınırlandırılması, enerji kaynakları bakımından zengin ülkelerde ise enerjiye yönelik

talebin sürekliliğinin güvence altına alınması şeklinde tezahür etmektedir.

“Enerji kaynaklarının aranması, üretimi, nakli, satışı sürecinde yaşanabilecek fiziksel güvenlik problemleri ile terör saldırıları ve diğer ülkelerin enerji güvenliğini tehdit eden faaliyetler enerji güvenliğinin fizikse güvenlik tanımlamasının özünü oluşturmaktadır.” (Yılmaz, 2017, s. 173)

Enerji güvenliğinin ülkelere özgü önceliklere göre farklılaştığını ortaya koyulmaktadır. Enerji ithalatına bağımlı ülkeler için arz güvenliği ve fiyat istikrarı ön plana çıkarken, enerji zengini ülkeler açısından talep güvenliği ve pazar sürekliliği temel hedef haline gelmektedir. Bu durum, enerji güvenliğinin statik bir kavram olmadığını; ülkelerin ekonomik yapıları, enerji kaynakları ve jeopolitik konumlarına bağlı olarak dinamik biçimde şekillendiğini göstermektedir.

Enerji güvenliği fiziksel, ekonomik ve çevresel olmak üzere üç temel boyutta değerlendirilmektedir. Fiziksel boyut, enerji kaynaklarının çıkarılmasından tüketiciye ulaştırılmasına kadar olan süreçte altyapının korunmasını, terör tehditlerini ve jeopolitik riskleri kapsamaktadır. Ekonomik boyut, arz ve talep güvenliği ile enerji nakil yollarının güvenliğini içermekte, enerji piyasalarında süreklilik ve öngörülebilirlik hedefini öne çıkarmaktadır. Çevresel boyut ise sürdürülebilir kalkınma anlayışı çerçevesinde, enerji kullanımının çevre üzerindeki etkilerinin azaltılmasını ve gelecek kuşakların ihtiyaçlarının gözetilmesini esas almaktadır.

Türkiye'nin durumu Yergin'in “arz güvenliği” tanımına uymakla birlikte, çalışmamızın özgün sorusu tam da bu geleneksel arz güvenliği arayışının (doğal gaz hub'ı olma) modern çevresel boyutla nasıl çelişmediğini teorize etmektedir.

Enerji Güvenliği Kavramının Tarihsel Süreci

Enerji güvenliği kavramının günümüzde küresel ölçekte stratejik bir güvenlik meselesi olarak ele alınması, tarihsel süreçte yaşanan yapısal dönüşümlerin ve krizlerin bir sonucudur.

Sanayi Devrimi, enerji güvenliğinin tarihsel gelişiminde temel bir kırılma noktası oluşturmaktadır. Sanayileşmeyle birlikte artan üretim kapasitesi ve teknolojik ilerleme, enerjiye olan talebi dramatik biçimde artırmış; enerji kaynaklarının sürekliliği ve kontrolü devletler arası rekabetin merkezine yerleşmiştir.

20. yüzyılda yaşanan dünya savaşları ve büyük güç mücadeleleri, enerji güvenliğinin askeri boyutunu belirginleştirmiştir. Özellikle fosil yakıtların modern savaş teknolojilerindeki rolü, enerji kaynaklarını askeri kapasitenin sürdürülebilirliği açısından vazgeçilmez kılmıştır. Bu süreçte petrol, devletlerin jeopolitik hesaplarında merkezi bir konum edinmiş; enerji kaynaklarına sahip bölgeler küresel güç mücadelesinin odak noktası haline gelmiştir. Aynı yüzyıl içerisinde enerji kaynaklarının millileştirilmesi ve OPEC'in kurulması, enerji güvenliğini üretici ülkelerin kolektif çıkarları doğrultusunda yeniden şekillendirmiştir. Bu gelişmeler, enerji güvenliği tartışmalarına arz kontrolü, fiyat belirleme gücü ve üretici ülkelerin egemenlik hakları gibi yeni boyutlar kazandırmıştır. Özellikle 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizleri, enerji arzında yaşanabilecek kesintilerin küresel ekonomik sistemi nasıl derinden etkileyebileceğini ortaya koymuş ve modern anlamda enerji güvenliği anlayışının oluşmasını hızlandırmıştır.

Soğuk Savaş sonrası dönemde ise bölgesel krizler, siyasi istikrarsızlıklar ve küresel ölçekte artan belirsizlikler, enerji güvenliğinin yalnızca petrole indirgenemeyecek kadar kapsamlı bir sorun olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda enerji güvenliği, farklı enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi, tedarik zincirlerinin güvenliği ve küresel enerji piyasalarının istikrarı gibi unsurları içeren çok boyutlu bir kavram haline gelmiştir.

Sonuç olarak enerji güvenliği, tarihsel süreç içerisinde ekonomik ihtiyaçlardan askeri stratejilere, ulusal politikalardan küresel yönetişime uzanan bir dönüşüm geçirmiş; günümüzde devletlerin güvenlik algılarında merkezi bir yer edinmiştir. Bu tarihsel evrim, enerji güvenliğinin dinamik ve değişen uluslararası koşullara bağlı olarak sürekli yeniden tanımlanan bir kavram olduğunu ortaya koymaktadır.

Türkiye'nin Stratejik Vizyonu ve Sentezi

Türkiye'nin enerji politikaları, 21. yüzyılın ilk çeyreğinde iki temel sütun üzerinde yükselmektedir: Bir yanda coğrafi avantajın jeopolitik bir güce dönüştürülmesini hedefleyen "Enerji Merkezi (Hub) Olma" vizyonu, diğer yanda ise küresel iklim rejimiyle uyumlu "2053 Net-Sıfır Emisyon" taahhüdüdür. Geleneksel bakış açısıyla, fosil yakıt ticaretinin merkezileşmesi ile dekarbonizasyon hedefleri birbirine zıt süreçler gibi görünse de Türkiye'nin stratejik vizyonu bu iki dinamiği bir "enerji geçiş köprüsü" modelinde sentezlemeyi amaçlamaktadır.

Bu çerçevede Türkiye, bir taraftan Sakarya Gaz Sahası keşfi, FSRU terminalleri ve TANAP gibi projelerle doğal gaz arz güvenliğini tahkim ederek bölgesel bir fiyatlandırma ve ticaret merkezi olmayı hedeflerken diğer taraftan bu altyapıyı geleceğin düşük karbonlu ekonomisine, özellikle hidrojen ekosistemine entegre etmenin yasal ve teknik zeminini hazırlamaktadır. Dolayısıyla, Türkiye için doğal gaz sadece bir yakıt değil, yenilenebilir enerjiye geçiş sürecindeki kesintili arzı dengeleyen ve yeşil dönüşümün finansmanı için kaldıraç görevi gören stratejik bir enstrümandır. Bu bölüm, söz konusu ikili yapının yarattığı fırsatları, riskleri ve ulusal strateji belgelerindeki yansımalarını analiz etmektedir.

Doğal Gaz Ticaret Merkezi (Hub) Olma Stratejisi

Türkiye'nin uluslararası enerji stratejisinin temel unsurları Dışişleri Bakanlığı tarafından ise şu şekilde sıralanmıştır: Artan talep ve dışa bağımlılığı dikkate alarak, petrol ve doğal gazın tedarikinde güzergâh ve kaynak çeşitlendirmesini sağlamak, bölgesel ve küresel enerji güvenliğine katkıda bulunmak, enerjide bölgesel ticaret merkezi olmak, enerji zincirinin her aşamasında sürdürülebilir kalkınma bağlamında sosyal ve çevresel etkileri dikkate almak, yerli ve yenilenebilir enerjinin elektrik üretimindeki payını artırmak ve nükleeri enerji sepetine dâhil etmek. (Sarıkaya & Öztopal 2022, s. 76)

Türkiye'nin enerji dış politikasının paradigma değişimi, ülkenin enerji arz zincirindeki rolünü edilgen bir transit geçiş koridoru olmaktan çıkarıp, fiyatın belirlendiği ve arzın yönetildiği etkin bir ticaret merkezi (hub) kimliğine dönüştürme hedefi üzerine inşa edilmiştir. Bu strateji, Sakarya Gaz Sahası'ndaki yerli üretim hamlesi, yer altı depolama tesislerinin genişletilmesi ve FSRU terminalleriyle artırılan LNG giriş kapasitesi sayesinde sistemsel bir esnekliğe kavuşmuştur. Jeopolitik düzlemde ise Rusya-Ukrayna savaşı sonrası şekillenen yeni küresel enerji mimarisi, Türkiye'nin merkez ülke olma hedefini stratejik bir zorunluluk seviyesine taşımıştır. Avrupa Birliği'nin enerji güvenliğini yeniden tanımlayarak Rus gazına alternatif rotalar arayışı, Türkiye üzerinden geçen Güney Gaz Koridorunun ve mevcut boru hatlarının değerini katlamıştır. Bu süreçte Türkiye, "enerji güvenliği sağlayıcısı" rolünü üstlenerek Doğu Akdeniz, Hazar Havzası ve Orta Doğu kaynaklarının Avrupa piyasalarına ulaştırılmasında vazgeçilmez bir ara yüz haline gelmiştir. Finansal boyutta EPİAŞ (Enerji Piyasaları İşletme A.Ş.) bünyesinde geliştirilen piyasa mekanizmalarıyla desteklenen bu süreç, Türkiye'nin enerji güvenliğini sadece fiziksel arz ile değil aynı zamanda bölgesel bir referans fiyat oluşturma kabiliyeti ve şeffaf bir ticaret ekosistemi üzerinden yeniden tanımlama girişimidir.

Net Sıfır Emisyon Taahhüdü ve İklim Politikaları

Türkiye'nin enerji stratejisinin ikinci temel sütununu, küresel iklim rejimiyle uyum sağlama ve sürdürülebilir bir enerji dönüşümünü gerçekleştirme hedefi oluşturmaktadır. 2021 yılında Paris İklim Anlaşması'nın onaylanması ve ardından ilan edilen 2053 Net Sıfır Emisyon hedefi, Türkiye'nin enerji politikalarında köklü bir paradigma değişimini beraberinde getirmiştir. Bu vizyon çerçevesinde doğal gaz, kömür gibi yüksek karbon yoğunluklu yakıtlardan çıkış sürecinde "geçiş dönemi yakıtı" olarak konumlandırılmaktadır. Ancak uzun vadede yerini yenilenebilir enerji kaynaklarına ve düşük karbonlu teknolojilere bırakması planlanmaktadır.

Avrupa Yeşil Mutabakatı ve beraberinde gelen Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) gibi uluslararası düzenlemeler, Türkiye'nin sanayi ve enerji sektörünü dekarbonize etmesini sadece çevresel bir tercih değil aynı zamanda ekonomik bir zorunluluk haline getirmiştir. Bu doğrultuda hazırlanan Türkiye Ulusal Enerji Planı, güneş ve rüzgâr enerjisindeki kurulu güç kapasitesini dramatik bir şekilde artırmayı hedeflerken, doğal gaz altyapısının gelecekte "yeşil hidrojen" taşıyacak şekilde dönüştürülmesini öngörmektedir. Dolayısıyla Türkiye'nin iklim politikası, enerji arz güvenliğini tehlikeye atmadan, ulusal yasal mevzuatı yeşil dönüşümle uyumlu hale getirerek karbon yoğunluğunu kademeli olarak düşürme stratejisi üzerine kuruludur.

Türkiye'nin 2053 net sıfır emisyon hedefi, sera gazı salımlarını sıfırlamanın ötesinde "Yeşil Kalkınma" vizyonu doğrultusunda düşük emisyonlu ve iklim direncine sahip bir ekonomik yapının inşasını kapsayan bütünsel bir dönüşüm stratejisidir. Bu stratejik dönüm noktası, İklim Kanunu taslağı başta olmak üzere AB Yeşil Mutabakatı ile uyumlu ulusal ve uluslararası mevzuatın oluşturulmasını, Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) ve karbon vergisi gibi fiyatlandırma mekanizmalarının geliştirilmesini

ve yeşil finansman araçlarının sisteme entegrasyonunu temel almaktadır.

Türkiye'de Enerji Dönüşümü ve Ulusal Yasal Düzenlemelerin Analizi

Türkiye'nin enerji güvenliği stratejisi yalnızca kesintisiz enerji arzını değil aynı zamanda uluslararası iklim taahhütleriyle uyumlu bir "yeşil dönüşüm" sürecini hedeflemektedir. 2000'li yılların başında 4646 Sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu ile başlayan piyasa serbestleşmesi odaklı süreç, günümüzde 5346 Sayılı YEK Kanunu ile karbon yoğunluğunun azaltılmasına ve 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ile talep tarafının disipline edilmesine evrilmiştir. Bu yasal gelişim, stratejik niyetleri yatırımcı için öngörülebilir kılan ve yaptırıma bağlayan bir yapı sunmaktadır. Bu yapının son aşamasını ise 2053 net sıfır hedefine ulaşmada kritik rol oynayacak olan İklim Kanunu ve Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) oluşturmaktadır. Özetle Türk enerji hukuku, enerji arz güvenliğini karbon maliyeti ve verimlilik ekseninde yeniden tanımlayarak bütüncül bir dekarbonizasyon çerçevesine kavuşmaktadır.

4646 Sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu-Serbestleşme Süreci

Türkiye doğal gaz piyasalarında serbestleşme çalışmaları 2001 yılında çıkarılan 4646 sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu (4646 sayılı Kanun) ile başlamıştır. Söz konusu Kanun ile Boru Hatlarıyla Taşımacılık A.Ş.'nin (BOTAŞ) doğal gazın ithalatı, satışı ve fiyatlandırmasına ilişkin tekel hakları kaldırılmıştır. Bu bağlamda, BOTAŞ'ın sahip olduğu ithalat kontratlarının bir kısmı özel sektör oyuncularına devredilerek, bunların hem doğal gaz ithalat hem de doğal gaz toptan satış piyasasına girmesinin önü açılmıştır. (Erek, 2018, s. 55)

4646 Sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu, Türkiye'nin enerji güvenliği mimarisinde piyasa odaklı dönemin başlangıcını temsil eder. Türkiye'nin bir ticaret merkezi (hub) olma hedefinin en temel

hukuki alt yapısını oluşturmaktadır. Türkiye'nin şeffaf, ayrımcı olmayan ve rekabetçi bir piyasa mekanizması olmadan uluslararası gaz ticaretinde referans fiyat oluşturulması mümkün değildir.

Kanunun enerji güvenliği açısından en kritik fonksiyonu, üçüncü tarafların sisteme erişim hakkını (TPA) güvence altına alarak şebeke kullanımında adaleti sağlaması ve depolama faaliyetlerini birer yasal zorunluluk haline getirmesidir. Özellikle son yıllarda yapılan ikincil düzenlemelerle serbestleşme süreci dijital bir ticaret platformu olan EPİAŞ bünyesindeki Organize Toptan Doğal Gaz Satış Pazarı (OTSP) ile taçlandırılmıştır.

"Kanun BOTAŞ'ın doğal gaz ithalatı, dağıtımı, satışı ve fiyatlandırması konularındaki tekel haklarını resmi olarak ortadan kaldırmıştır. BOTAŞ'ın yeniden yapılandırılarak ticaret ve altyapı fonksiyonlarının ayrıştırılmasını öngörmüş ancak bu ayrışma gerçekleştirilememiştir. BOTAŞ'ın ayrıştırılmasındaki gecikme ve BOTAŞ'ın fiyatlandırma mekanizmasını tutarlı bir şekilde uygulamaması hükümetin uluslararası piyasadaki gaz fiyat artışlarının etkisini hafifletmesine olanak tanımıştır." (Dünya Bankası, 2015, s. 35)

Ancak kanunun uygulanma sürecinde BOTAŞ'ın piyasa hakimiyetinin tam olarak kırılamamış olması ve ithalat serbestisinin istenilen hıza ulaşmaması serbestleşme sürecinin tamamlanmamış yönleri olarak tartışılmaktadır. Buna rağmen 4646 Sayılı Kanun, Türkiye'nin uluslararası projelerde güvenilir bir yasal ortak olarak konumlanmasını sağlayan, tahkim ve sözleşme serbestisi normlarını ulusal hukuka entegre eden temel metindir.

5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynakları Kanunu

Türkiye'nin enerji dönüşümü sürecindeki hukuksal lokomotifi olan 5346 Sayılı Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun, fosil

yakıt odaklı enerji sepetinin dekarbonizasyonunu hedefleyen temel düzenlemedir.

Enerji Ajansı verilerine göre bu kanunla tesis edilen Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını Destekleme Mekanizması (YEKDEM), “Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üreten tesislere belirli bir süre için fiyat garantisi ve çeşitli teşvikler sağlayan bir programdır. YEKDEM kapsamında, rüzgar, güneş, jeotermal, biokütle ve hidroelektrik enerji kaynaklarından elektrik üreten tesisler belirli bir süre için devlet tarafından desteklenir.

Yatırımcılara sunduğu alım garantileri ve yerli aksam kullanım teşvikleri sayesinde Türkiye'nin güneş ve rüzgar enerjisi kurulu gücünde devrimsel bir artış yaşanmasını sağlamıştır. Bu artış sadece bir çevresel başarı değil aynı zamanda doğal gazın elektrik üretimindeki payını marjinal düzeye indirmeyi hedefleyen bir "enerji bağımsızlığı" stratejisidir. 2010’lu yılların başında elektrik üretiminin yarısından fazlası ithal doğal gaz ile karşılanırken, YEK Kanunu'nun sağladığı hukuki koruma kalkanı sayesinde yerli ve yenilenebilir kaynakların payı %50 eşiğini aşmıştır.

Yine Enerji Ajansı verilerinde belirtildiği üzere bu dönüşümün daha spesifik ve teknoloji odaklı bir fazı ise Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları (YEKA) Yönetmeliği ile başlatılmıştır. “Yenilenebilir enerji üretim tesislerinden satın alınan elektriğin maliyetinin düşürülmesi, yenilenebilir enerji teknolojilerinde yerli üretimin artırılması ve kalifiyeli insan potansiyelinin artırılması için 09/10/2016 tarih ve 29852 sayılı Resmî Gazete’de Yenilenebilir Enerji Kaynak Alanları Yönetmeliği ile yürürlüğe giren bir yatırım modelidir.”

YEKA modeli büyük ölçekli enerji sahalarının tahsisi karşılığında yerli üretim ve fabrika kurulumu şartı getirerek, enerji dönüşümünü bir sanayi hamlesine dönüştürmüştür. Bu durum,

Türkiye'nin doğal gaza olan bağımlılığını azaltırken aynı zamanda enerji arz güvenliğini yerel kaynaklar üzerinden tahkim etmektedir. Doğal gazın bu denklemdeki rolü ise, YEKA projeleriyle sisteme giren yüksek miktardaki değişken enerjiyi şebekede dengeleyen esnek bir yedek güç kapasitesine evrilmiştir.

5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu

5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, enerjinin etkin ve verimli kullanılması, israfının minimize edilmesi, enerji ekonomisinin hafifletilmesi ve çevrenin korunması amacı taşıyan 2007 yılında hazırlanmış bir kanundur. (Enerji Etüt)

Enerji güvenliği literatüründe "en ucuz ve en temiz enerji, tasarruf edilen enerjidir" prensibi uyarınca, 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu, arz odaklı politikalardan talep odaklı politikalara geçişin hukuksal zeminini oluşturmaktadır. Bu kanun, Türkiye'nin enerji yoğunluğunu düşürerek özellikle ithal doğal gaza olan ihtiyacı yapısal olarak azaltmayı amaçlamaktadır. Enerji verimliliği sadece teknik bir iyileştirme değil aynı zamanda dışa bağımlılığı sınırlayan stratejik bir arz güvenliği mekanizmasıdır. Kanun çerçevesinde binalarda yalıtım zorunluluğu, sanayide enerji yönetim sistemlerinin kurulması ve verimlilik artırıcı projelerin devlet eliyle teşvik edilmesi, doğal gazın hem ısınmada hem de sanayi üretimindeki tüketim payını optimize etmektedir. Bu durum, Türkiye'nin enerji dönüşümü sürecinde, üretilen enerjinin daha rasyonel kullanılmasını sağlayarak karbon ayak izini küçültmekte ve doğal gaz ticaret merkezi olma hedefinde iç piyasa baskısını hafifletmektedir.

İklim Kanunu Taslağı ve Emisyon Ticaret Sistemi (ETS)

Türkiye'nin enerji ve iklim politikalarının nihai sentezini oluşturacak olan İklim Kanunu Taslağı, 2053 Net Sıfır hedefinin yasal bağlayıcılığa kavuştuğu en kritik hukuk metni olarak öne çıkmaktadır. Bu düzenleme, enerjiyi sadece bir meta olarak değil,

"karbon maliyeti" olan stratejik bir varlık olarak tanımlarken, kanunun merkezinde yer alan Ulusal Emisyon Ticaret Sistemi (ETS), piyasa temelli bir mekanizma aracılığıyla "kirleten öder" ilkesini hayata geçirmeyi hedeflemektedir. Özellikle Avrupa Yeşil Mutabakatı kapsamında yürürlüğe giren Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması (CBAM) ile uyum süreci, Türkiye'nin en büyük ticaret ortağı olan Avrupa Birliği'ne yapılan ihracatta karbon vergisi riskini doğurmuştur. Bu durum yerli bir ETS kurulumunu zorunlu kılmıştır.

İklim Kanunu ile tesis edilecek bu sistem, karbon fiyatlandırmasının Türkiye içinde yapılmasını sağlayarak, sanayicinin ödeyeceği karbon bedelinin ülke sınırları içerisinde kalmasına ve yeşil dönüşüm projelerine fon olarak aktarılmasına olanak tanıyacaktır. Enerji sektörü üzerindeki temel etkisi ise, doğal gaz çevrim santralleri gibi tesislerin emisyonları oranında karbon sertifikası alma zorunluluğuyla karşılaşması olacak, bu da doğal gazın "mavi köprü" rolünün ekonomik sınırlarını netleştirerek yatırımları düşük karbonlu hidrojen, nükleer veya yenilenebilir enerji gibi alternatiflere yönlendirecektir. Dolayısıyla İklim Kanunu, fosil yakıt odaklı bir ticaret merkezi vizyonunu, düşük karbonlu ve sürdürülebilir bir enerji ekosistemine entegre eden temel yasal denetim mekanizması işlevini görmektedir.

Küresel ve Bölgesel Enerji Jeopolitiğinde Türkiye

Türkiye'nin enerji jeopolitiğindeki konumu, yalnızca enerji tüketen bir ülke olmasından değil; enerji üretim bölgeleri ile tüketim merkezleri arasında stratejik bir geçiş noktası oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle doğal gaz boru hatları, Türkiye'nin bölgesel enerji güvenliği ve enerji diplomasisi alanındaki etkisini artıran temel araçlardan biri hâline gelmiştir. Bu çerçevede Türkiye, enerji arz güvenliği, kaynak çeşitliliği ve transit ülke avantajını jeopolitik bir güç unsuruna dönüştürmeye çalışırken; uluslararası boru hattı projeleri üzerinden hem bölgesel iş birliklerini

geliştirmekte hem de küresel enerji denkleminde daha etkin bir aktör olarak konumlanmaktadır.

Boru Hattı Diplomasisi ve Bölgesel Jeopolitik Denklemler

Türkiye'nin coğrafi konumu, Hazar Havzası ve Orta Doğu kaynaklarının Avrupa'ya aktarılmasında bir "Enerji Koridoru" oluşturmuştur. Bu koridor, Türkiye'ye bölgesel bir diplomatik güç alanı açmaktadır.

Trans-Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı (TANAP)

Türkiye ve Azerbaycan arasındaki başarılı iş birliğinin en önemli göstergelerinden biri olarak, Güney Gaz Koridorunun kilit halkasını oluşturmaktadır. Projenin temel amacı, Azerbaycan'ın Şah Deniz Sahası'nda üretilen doğal gazı önce Türkiye'ye, ardından Trans Adriyatik Boru Hattı (TAP) aracılığıyla Avrupa'ya güvenilir ve maliyet etkin bir şekilde taşımaktır.

"TANAP, Türkiye ve Avrupa'nın enerji arz güvenliğini arttırarak, Azerbaycan, Türkiye ve AB'yi birbirine daha da yakınlaştırmakta ve sunduğu potansiyelle dünya enerji jeopolitiğini yeniden şekillendirmektedir." (TANAP, 2025) Bu proje, bölgedeki iktisadi ve siyasi iş birliğini güçlendiren stratejik bir enerji köprüsü görevi görmektedir.

Mavi Akım Anlaşması: Süreklilik ve Jeopolitik Sigorta

Türkiye ve Rusya arasında 15 Aralık 1997 tarihinde imzalanan "Rus doğalgazının Karadeniz altından Türkiye Cumhuriyeti'ne sevkiyatına ilişkin anlaşma çerçevesinde Mavi Akım Doğalgaz Boru Hattı Projesi" gündeme gelmiştir. Botaş ve Gazeksport arasında imzalanan 25 yıl süreli anlaşmaya göre, Rusya Federasyonu topraklarından başlayıp Karadeniz'den geçecek bir boru hattı ile Türkiye'ye yılda 16 milyar m^3 doğal gaz taşınması kararlaştırılmıştır. (Oğan, 2003, s. 2)

Projenin en temel önemi, üçüncü ülkelerin transit geçiş risklerini ortadan kaldırarak gaz akışını siyasi veya teknik krizlerden bağımsız, güvenli bir yapıya kavuşturmasıdır. Jeopolitik düzlemde ise Türkiye'nin bölgesel bir enerji merkezi olma vizyonunun ilk somut başarısı kabul edilen Mavi Akım, hem Türk-Rus ilişkilerinde ekonomik bir çapa görevi görmüş hem de TürkAkım gibi daha sonraki devasa boru hattı projelerine teknik ve diplomatik bir referans noktası oluşturmuştur.

Batı Hattı (Balkan Hattı) ve Hukuki Dönüşüm

Batı Hattı, Rus gazının Ukrayna, Romanya ve Bulgaristan üzerinden Türkiye'ye girdiği tarihsel güzergahtır. 1986 tarihli ilk doğal gaz anlaşması bu hat üzerinden yapılmıştır.

Türkiye, bu anlaşmalar çerçevesinde petrolden sonra doğal gaz enerji nakil hatlarının ulaştığı bir konuma yükselmesi bağlamında avantaj kazansa da Batı Hattı, sadece Türkiye'nin ihtiyacının karşılanması için oluşturulan bir hat olması nedeniyle Türkiye'nin küresel anlamda enerji hareketliliğini sağlayan aktörler arasında yer almasını sağlayan bir proje olmamıştır. (Dağlı, 2021, s. 142)

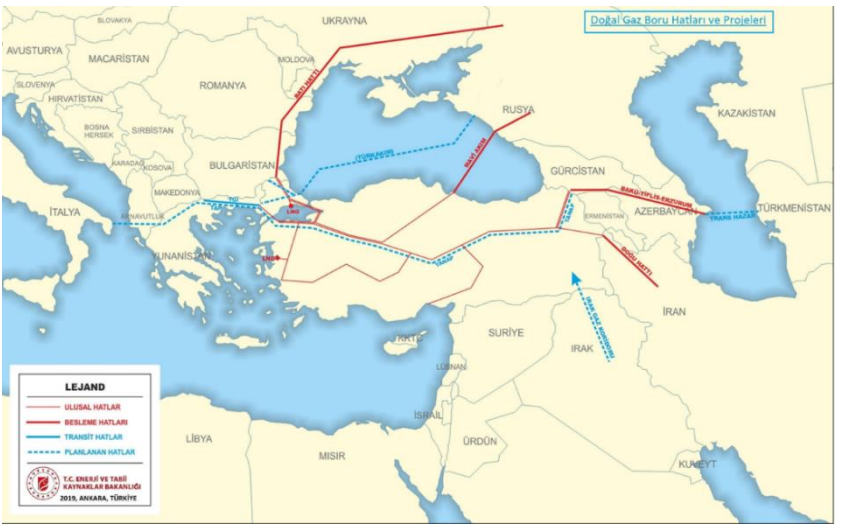
Türkiye'nin Rusya'ya ekonomik olarak daha bağımlı olduğu asimetrik bir yapıya dönüşmüştür. 1987'de faaliyete geçen Batı Hattı Türkiye'nin enerji arzını güvence altına alırken, SSCB'nin dağılmasıyla birlikte Hazar kaynaklarının paylaşımı konusunda iki ülke arasında ciddi bir rekabet baş göstermiştir. Türkiye, Bakü-Tiflis-Ceyhan (BTC) gibi projelerle Rusya'nın bölgedeki enerji tekelini kırarak hem Orta Asya ülkelerine bağımsız bir güzergah sunmuş hem de kendisini küresel piyasalarda stratejik bir enerji geçiş merkezi olarak konumlandırmıştır.

Güney Gaz Koridoru (SGC)

2008 yılında Avrupa Konseyi tarafından önerilen Avrupa'nın Rus gazına olan bağımlılığını azaltmak için Hazar Denizindeki gazı Avrupa'daki pazarlara ulaştırarak Avrupa enerji arzını arttırmayı ve çeşitlendirmeyi amaçlayan projedir. Güney Gaz Koridoru; SCPX (Güney Kafkasya Boru Hattı Genişletilme), TANAP (Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı) ve TAP (Trans Adriyatik Boru Hattı) Projelerini kapsayan dev bir projedir.

Bu altyapılar, AB'nin enerji arz çeşitliliği ve güvenliği stratejisinde Türkiye'yi bölgesel bir enerji köprüsü haline getirmiştir. Son yıllarda yenilenebilir enerji alanında da iş birliği alanları genişlemekte ve offshore rüzgâr, hidrojen üretimi ve enerji depolama teknolojileri gibi konularda AB fonları ve Avrupa Yatırım Bankası desteğiyle yürütülen ortak projeler önem kazanmaktadır.

Harita 1. Türkiye Üzerinden Geçen Doğal Gaz boru Hatları ve Projeleri



Kaynak: (T.C. Enerji Ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Mayıs 2026)

Harita 1'de gösterilen mevcut ve planlanan boru hatları, Türkiye'nin Avrupa ile Avrasya arasındaki çok boyutlu enerji köprüsü rolünü mekansal olarak doğrulamaktadır. Bu altyapılar,

Türkiye'nin enerji diplomasisinde çok boyutlu bir aktör olarak güç kazanmasına ve bölgesel stratejik etkisini artırmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte söz konusu boru hatları, enerji arzının çeşitlendirilmesi, transit geçiş güvenliğinin sağlanması ve uluslararası enerji piyasalarında karşılıklı bağımlılık ilişkilerinin derinleşmesi açısından da kritik bir işlev üstlenmektedir. Böylece Türkiye, yalnızca enerji transferinin gerçekleştiği bir transit ülke değil; enerji politikalarının şekillenmesinde etkili olan stratejik bir jeopolitik merkez olarak öne çıkmaktadır (Dağlı, 2021, s. 142).

Doğu Akdeniz ve Münhasır Ekonomik Bölge (MEB) Tartışmaları

Doğu Akdeniz'deki hidrokarbon keşifleri, 21. yüzyılın başında bölgeyi küresel enerji jeopolitiğinin en dinamik ve çekişmeli alanlarından birine dönüştürmüştür. Türkiye bu süreçte, sadece bir enerji kullanıcısı değil aynı zamanda deniz egemenlik haklarını savunan ve bölge denkleminde merkezi konumunu koruyan bir aktör olarak proaktif bir strateji izlemektedir.

Bu stratejinin en somut dayanağını oluşturan "Mavi Vatan" doktrini, adaların kıta sahanlığı ve münhasır ekonomik bölge (MEB) haklarına dair geleneksel Yunan-Rum tezlerine karşı, ana karaların üstünlüğü ve hakkaniyet ilkelerini temel alan hukuki bir duruş sergilemektedir. Türkiye, kendi sismik araştırma ve sondaj gemileriyle bölgede yürüttüğü faaliyetler aracılığıyla sahada varlık gösterirken, aynı zamanda tüm kıyıdaş devletlerin katılımıyla düzenlenecek bir Doğu Akdeniz Konferansı önerisiyle diplomatik çözüm yollarını açık tutmaktadır. Son dönemde İsrail ve Mısır ile yürütülen normalleşme süreçleri de göz önüne alındığında, Türkiye'nin bu enerji denklemini bir çatışma alanından bölgesel bir iş birliği ve ticaret merkezine dönüştürme potansiyeli, küresel arz güvenliği açısından hayati bir önem taşımaktadır.

Enerji Altyapısında Kapasite Artışı: Depolama ve FSRU Sistemleri

Türkiye'nin enerji arz güvenliği stratejisi, sadece gazın temin edilmesini değil, olası sistemsel şokların ve mevsimsel talep dalgalanmalarının yönetilmesini sağlayan fiziksel bir tampon mekanizması üzerine inşa edilmiştir. Bu kapsamda yürütülen altyapı hamleleri, Türkiye'nin operasyonel esnekliğini artıran iki temel sütun üzerinden yükselmektedir.

Yüzer Depolama ve Gazlaştırma Ünitesi (FSRU) Teknolojisi ve Operasyonel Esneklik

FSRU (Yüzer Depolama ve Gazlaştırma Ünitesi) yatırımları, Türkiye'nin geleneksel boru hattı bağımlılığını esneten ve küresel LNG (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz) piyasasındaki likiditeden anlık olarak faydalanmasını sağlayan stratejik bir oyun değiştiricidir. Sabit kara terminallerinin aksine, çok daha kısa sürede operasyonel hale gelebilen Hatay-Dörtyol ve Edirne-Saros gibi FSRU projeleri, gazın en yoğun tüketildiği sanayi merkezlerine ve batı bölgelerine doğrudan iletim hattı desteği sunmaktadır. Bu teknoloji, özellikle kış aylarında veya teknik arızalar nedeniyle yaşanan boru hattı kesintilerinde sisteme günlük bazda milyonlarca metreküp gaz basabilme kapasitesiyle ulusal şebekenin basınç dengesini korumaktadır. Ayrıca, Türkiye'nin kendi mülkiyetindeki FSRU gemileriyle (örneğin Ertuğrul Gazi) bu hizmeti vermesi, enerji diplomasisinde dışa bağımlılığı azaltarak stratejik bir otonomi sağlamaktadır.

Stratejik Yeraltı Depolama ve Ticaret Merkezi Vizyonu

Fiziksel arz güvenliğinin bir diğer kritik bileşeni olan yer altı depolama tesisleri, Türkiye'nin bölgesel bir enerji ticaret merkezi olma iddiasının fiziksel ve operasyonel garantörü konumundadır. Silivri Doğal Gaz Depolama Tesisi, deniz altındaki tükenmiş rezervuarların kullanımıyla Avrupa'nın en büyük deniz üstü

depolama kapasitelerinden birine ulaşmış; Tuz Gölü Yer Altı Doğal Gaz Depolama Tesisi ise yüksek kapasiteli enjeksiyon ve geri üretim hızıyla devasa bir rezerv alanı oluşturmuştur. Bu tesislerin toplam kapasitesinin yıllık ulusal tüketimin %20'sine ulaşma hedefi, Türkiye'nin sadece iç piyasasını korumakla kalmayıp, aynı zamanda bölgesel bir gaz borsası (HUB) olarak komşu ülkelere gaz ihraç edebilecek "depolama ve yeniden satış" kabiliyetine eriştiğini kanıtlamaktadır. Bu altyapı sayesinde Türkiye, arz-talep dengesizliğinden kaynaklanan fiyat dalgalanmalarını sönümleyebilen ve jeopolitik risklere karşı direnci tahkim edilmiş bir enerji aktörü profili çizmektedir.

Enerji arz Güvenliğinde Paradigma Değişimi: Kaynak Çeşitlendirmesi

Türkiye, tarihsel olarak doğal gaz ihtiyacının büyük bölümünü Rusya, İran ve Azerbaycan'dan gelen uzun vadeli boru hattı sözleşmeleriyle karşılamıştır. Ancak bu yapı hem fiyat esnekliğini kısıtlamış hem de tedarikçi ülkelerle yaşanan diplomatik gerilimlerin enerji akışını tehdit etmesi gibi jeopolitik riskleri beraberinde getirmiştir. Günümüzde bu bağımlılık, statik bir alıcı pozisyonundan dinamik bir piyasa aktörlüğüne geçişi simgeleyen stratejik bir esneklik modeline dönüştürülmektedir.

Boru Hattı Gazının Desantralizasyonu ve Risk Yönetimi

Tek kaynağa veya tek güzergaha dayalı riskleri minimize etmek adına Türkiye, toplam ithalat sepetinde boru hattı gazının payını kademeli olarak düşürerek portföyünü desantralize etmektedir. Bu strateji, sadece teknik arızalardan kaynaklanan kesintilere karşı bir önlem değil, aynı zamanda arz güvenliğini bölgesel siyasi dalgalanmaların bir şantaj unsuru olmasından korumayı amaçlamaktadır. Gaz tedarik yollarının çeşitlenmesi, Türkiye'nin enerji iletim şebekesinin giriş noktalarını çoğaltarak

sistemsel dayanıklılığı artırmakta ve ulusal enerji güvenliğini çok boyutlu bir zemine oturtmaktadır.

Sıvılaştırılmış Doğal Gazın (LNG) Stratejik Kaldıraç Rolü ve Diplomasi

Özellikle ABD, Cezayir ve Katar'dan yapılan LNG (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz) ithalatı, geleneksel boru hattı gazına kıyasla Türkiye'nin elini pazarlık masasında devrimsel nitelikte güçlendirmiştir. Küresel LNG piyasasındaki üretim artışı ve fiyat bolluğu, boru hattı tedarikçileriyle yapılan kontrat yenileme süreçlerinde Türkiye için kilit bir diplomatik enstrüman işlevi görmektedir. Bu likidite sayesinde Türkiye, katı "al ya da öde" (take-or-pay) yükümlülüklerinin esnetilmesi, fiyatların petrol endeksli yapıdan spot piyasa endeksli yapıya evrilmesi ve fiyat revizyonları konusunda rasyonel kazanımlar elde etmektedir. Sonuç olarak LNG, sadece fiziksel bir kaynak değil, Türkiye'nin enerji diplomasisinde manevra alanını genişleten stratejik bir kaldıraç haline gelmiştir.

Rusya-Ukrayna Savaşı Sonrası Dönüşüm: Türkiye'nin Yeni Rolü

2022 yılında patlak veren Rusya-Ukrayna savaşı, İkinci Dünya Savaşı'ndan bu yana Avrupa'nın enerji mimarisinde görülen en radikal kırılmaya yol açmıştır. Avrupa Birliği'nin Rus enerji kaynaklarından hızla kopma stratejisi (REPowerEU), kıtanın kuzeyindeki geleneksel tedarik rotalarını işlevsiz hale getirirken, Türkiye üzerinden geçen güney güzergahlarını kritik birer can damarına dönüştürmüştür. Bu süreçte TürkAkım, Kuzey Akım hatlarının devre dışı kalmasıyla birlikte, Rus gazının güvenli ve kesintisiz bir şekilde Güneydoğu Avrupa'ya ulaştığı nadir ve en güvenilir koridorlardan biri olarak jeopolitik değerini katlamıştır.

Merkez Ülke (Hub) Vizyonu ve Stratejik Özerklik

Rusya'nın Türkiye'de bir gaz dağıtım merkezi (Hub) kurulması yönündeki resmi önerisi, Türkiye'nin bölgesel enerji denklemindeki konumunu "geçiş ülkesi" statüsünden "fiyat belirleyici aktör" statüsüne taşıma potansiyeli barındırmaktadır. Bu vizyon, Türkiye'nin Avrupa Birliği ile enerji alanında kurduğu geleneksel "karşılıklı bağımlılık" ilişkisini daha karmaşık ve stratejik bir boyuta taşımıştır. Türkiye; farklı kaynaklardan (Rusya, Azerbaycan, İran, LNG) gelen gazın harmanlandığı, depolandığı ve uluslararası piyasaya "Türkiye Karışımı" olarak sunulabileceği bir fiziksel ticaret merkezi kurarak, Avrupa'nın enerji arz güvenliğinde vazgeçilmez bir denge unsuru haline gelmektedir.

Re-export Kabiliyeti ve Ticaret Diplomasisi

Türkiye, enerji stratejisinde tarihi bir eşiği aşarak sadece gazı transit ileten bir aktör olmaktan çıkmış, gazın mülkiyetini alarak üçüncü ülkelere satışını gerçekleştiren bir "enerji taciri" kimliğine bürünmüştür. Bulgaristan, Macaristan, Romanya ve Moldova gibi ülkelerle imzalanan doğal gaz tedarik anlaşmaları, Türkiye'nin bölgedeki re-export kabiliyetinin en somut örnekleridir. Bu ticari açılım, Türkiye'nin Avrupa'nın enerji güvenliğindeki rolünü sadece coğrafi bir avantajdan, aktif bir siyasi ve ekonomik enstrümana dönüştürmüştür. Artık Türkiye, Balkanlar ve Orta Avrupa'nın enerji portföylerinde çeşitlilik sağlayan, bölge ülkeleriyle enerji üzerinden yeni diplomatik bağlar kuran merkezi bir güç odağı konumundadır.

Güncel Gelişmeler ve 2026 Vizyonu

Türkiye'nin 2021 yılında açıkladığı "Net Sıfır Emisyon" hedefi ve 2023 yılında başlayan yerli doğal gaz üretimi, 2026 yılı itibarıyla Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin devreye girmesi ve Sakarya Gaz Sahası'ndaki ikinci faz üretim artışıyla birlikte teorik bir stratejiden somut bir enerji bağımsızlığı modeline dönüşmektedir. Bununla birlikte küresel enerji piyasalarında artan jeopolitik gerilimler, enerji arz güvenliği tartışmalarını yalnızca

üretim kapasitesiyle sınırlı olmaktan çıkararak enerji nakil hatları, transit koridorlar ve enerji diplomasisi ekseninde yeniden şekillendirmektedir. Bu bağlamda Türkiye, sahip olduğu jeostratejik konum, enerji altyapısı ve çok yönlü dış politika kapasitesi sayesinde enerji ithalatçısı bir ülke olmanın ötesinde bölgesel enerji güvenliği ve enerji ticaretinde merkezi rol üstlenmeyi hedefleyen stratejik bir aktör olarak öne çıkmaktadır.

Yerli Üretimde Kritik Eşik: Sakarya Gaz Sahası ve Faz-2

Türkiye'nin enerji bağımsızlığı yolundaki en somut adımı olan Sakarya Gaz Sahası, 2025 yılı sonu itibarıyla günlük 10 milyon metreküp üretim kapasitesine ulaşarak yaklaşık 4 milyon hanenin ihtiyacını karşılar hale gelmiştir. 2026 yılı için hedeflenen "İkinci Faz" çalışmalarıyla bu miktarın iki katına çıkarılması öngörülmektedir. Bu durum, sadece cari açığın azaltılmasını sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda Türkiye'nin doğal gaz fiyatlandırmasında bölgesel bir referans noktası olma kabiliyetini de artırmaktadır.

Enerji Sepetinde Yeni Bir dönem: Akkuyu ve Nükleer Güç

Türkiye'nin enerji dönüşümü ve 2053 net sıfır emisyon hedefi doğrultusunda 2026 yılı, nükleer enerjinin bir vaat olmaktan çıkıp fiili bir güç kaynağına dönüştüğü kritik bir dönüm noktasını temsil etmektedir. Akkuyu Nükleer Güç Santrali'nin ilk reaktörünün devreye alınmasıyla birlikte Türkiye, tarihinde ilk kez nükleer enerjiyi baz yük güç kaynağı olarak kullanmaya başlayarak enerji sepetinde stratejik bir çeşitliliğe gitmiştir.

Sınır Ötesi Enerji Diplomasisi: Somali ve Libya Hamleleri

Türkiye, enerji güvenliğini sadece kendi sınırları içerisinde değil, "Mavi Vatan" ve sınır ötesi sismik araştırmalarla da tahkim etmektedir. Oruç Reis gemisinin Somali açıklarındaki faaliyetleri ve

Libya ile yapılan deniz yetki alanları anlaşması, Türkiye'nin enerji diplomasisini jeopolitik bir derinlikle yürüttüğünü göstermektedir. Bu hamleler, Türkiye'nin sadece bir "transit ülke" değil aynı zamanda "kaynak geliştirici" bir aktör olma niyetini ortaya koymaktadır.

Hürmüz Boğazı Krizi ve Türkiye Açısından Stratejik Yansımaları

Basra Körfezi, sahip olduğu devasa enerji kaynakları ve küresel ticaret yollarının kesişme noktasındaki konumuyla, tarih boyunca dünya siyasetinin ve ekonomisinin en kritik düğüm noktalarından biri olmuştur. "Körfez dünyanın en çok petrol üretim alanında olduğu için son derece hassastır. Buradaki enerji nakil işlemleri başta ABD, Çin ve AB ülkeleri olmak üzere tüm dünya için önem arz etmektedir." (Çağatay, 2021, s. 27) Söz konusu enerji trafiğinin ve stratejik akışın kesintisiz işlemesi ise, coğrafi bir zorunluluk olarak tek bir geçiş noktasına bağımlıdır.

Harita 2: Hürmüz Boğazı



Kaynak: (Anadolu Ajansı, 2026)

Harita 2'de görüldüğü üzere küresel enerji arz güvenliğinin sürekliliği bakımından uluslararası sistemin en kritik deniz geçiş noktalarından (chokepoint) biri olan Hürmüz Boğazı, Basra Körfezi'ni Umman Denizi ve açık denizlere bağlamaktadır. Özellikle enerji sevkiyatının büyük ölçüde belirli transit koridorlara bağımlı olması, çağdaş enerji güvenliği anlayışında rota güvenliği ve alternatif ulaştırma ağlarının önemini daha görünür hale getirmektedir. Bu bağlamda Hürmüz Boğazı'nda yaşanan krizler, enerji arz güvenliğinin yalnızca rezerv kapasitesiyle değil; enerji akışının sürdürülebilirliği, lojistik güvenlik ve jeopolitik istikrar unsurlarıyla birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Çağatay, 2021, s. 27).

2026 yılı itibarıyla İran ile ABD/İsrail eksenli bölgesel gerilimlerin yeniden tırmanması neticesinde Hürmüz Boğazı'nda tanker geçişlerinde ciddi aksamalar yaşanmış; bu durum uluslararası enerji piyasalarında arz şokları, fiyat dalgalanmaları ve tedarik zinciri baskıları yaratmıştır. Çeşitli uluslararası raporlara göre, kriz dönemlerinde boğazdan geçen günlük petrol sevkiyatında düşüşler kaydedilmiş, yüzlerce petrol tankeri güvenlik gerekçeleriyle bölgede beklemek zorunda kalmıştır. Söz konusu gelişmeler, enerji arz güvenliğinin üretim kapasitesi veya rezerv miktarıyla sınırlı olmadığını, aksine enerji nakil rotalarının fiziksel ve siber emniyeti, jeopolitik dar boğazların asimetrik tehditlere karşı kırılganlığı ve arz kanallarının çeşitlendirilmesi ile alternatif sevkiyat güzergahlarının stratejik önemi üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini bir kez daha ortaya koymuştur.

Türkiye açısından bakıldığında, Hürmüz Boğazı'nda yaşanan krizler enerji ithalat bağımlılığı, cari açık, enflasyon ve dış ticaret dengesi üzerinde doğrudan etkiler yaratmaktadır. Türkiye'nin enerji tüketiminde ithal petrol ve doğal gazın yüksek payı dikkate alındığında, Hürmüz kaynaklı arz kesintileri ve fiyat artışları ülkenin makroekonomik istikrarı üzerinde önemli baskılar

oluşturabilmektedir. Bunun yanı sıra kriz, Türkiye'nin enerji arz güvenliği stratejilerinde kaynak ve güzergah çeşitlendirmesinin önemini artırmakta; TANAP, TürkAkım, Irak-Türkiye Petrol Boru Hattı ve Doğu Akdeniz enerji projeleri gibi alternatif enerji koridorlarının jeostratejik değerini daha görünür hale getirmektedir.

Bu bağlamda Hürmüz Boğazı krizi, Türkiye açısından yalnızca kısa vadeli enerji maliyetleri bakımından değil aynı zamanda orta ve uzun vadeli enerji diplomasisi, transit ülke konumu ve bölgesel enerji merkezi olma hedefleri açısından da stratejik sonuçlar doğurmaktadır. Kriz, Türkiye'nin enerji güvenliği politikalarının salt tedarik odaklı değil; jeopolitik risk analizi, lojistik güvenlik, altyapı dayanıklılığı ve çok yönlü dış politika koordinasyonu temelinde yeniden şekillendirilmesini gerekli kılmaktadır.

Küresel Enerji Piyasalarına Etkisi

Hürmüz Boğazı'nda meydana gelen güvenlik krizleri, küresel enerji piyasaları üzerinde doğrudan ve çok katmanlı etkiler yaratarak uluslararası ekonomik sistemde önemli kırılganlıkları açığa çıkarmaktadır. Söz konusu krizler öncelikle petrol arzına ilişkin belirsizliklerin artmasına neden olmakta ve bu durum uluslararası enerji piyasalarında risk primlerinin yükselmesiyle birlikte petrol fiyatlarında sert dalgalanmalara yol açmaktadır.

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), bu durumu şu şekilde vurgulamaktadır: "Hürmüz Boğazı gibi hayati su yollarında yaşanan aksamalar fiziksel bir arz kesintisi olmanın ötesinde aynı zamanda küresel piyasalarda 'psikolojik bir prim' yaratarak fiyatları temel arz-talep dengesinin çok ötesine taşıyan sistemik bir şoktur."

Kriz dönemlerinde Brent petrol fiyatlarının varil başına 120 dolar seviyesini aşması, enerji piyasalarının jeopolitik risklere karşı yüksek duyarlılığını ortaya koymaktadır. Bunun yanında, bölgede artan askeri ve siyasi gerilimler enerji taşımacılığına ilişkin

operasyonel riskleri yükselttiğinden, LNG ve petrol tankerlerine yönelik sigorta primleri ile navlun maliyetlerinde kayda değer artışlar meydana gelmektedir. Bu maliyet artışları enerji fiyatlarını etkilediği gibi küresel ticaret ve lojistik maliyetlerini de dolaylı biçimde etkilemektedir.

Öte yandan Hürmüz Boğazı'ndaki istikrarsızlık, özellikle Avrupa ve Asya'daki enerji ithalatçısı ülkeler açısından arz güvenliği kaygılarını derinleştirmektedir. ABD Enerji Enformasyon İdaresi (EIA) verilerine göre, "Dünya deniz yoluyla taşınan petrolünün yaklaşık beşte birinin bu dar geçitten geçmesi, küresel ekonominin bu coğrafi darboğaza (chokepoint) olan yapısal bağımlılığını ve herhangi bir blokajın küresel GSYH üzerindeki yıkıcı potansiyelini teyit etmektedir." Bu bölgelerdeki ekonomilerin önemli ölçüde dış enerji kaynaklarına bağımlı olması, Hürmüz üzerinden gerçekleşen sevkiyatta yaşanan her aksamanın enerji arz sürekliliği üzerinde stratejik risk oluşturmasına neden olmaktadır. Enerji fiyatlarındaki yükselişin üretim maliyetlerini artırması, sanayi sektörleri üzerinde baskı yaratması ve tüketici fiyatlarına yansıması sonucunda ithalatçı ülkelerde enflasyonist baskılar güçlenmektedir. Böylece enerji kaynaklı jeopolitik krizler enerji sektörünün yanı sıra makroekonomik istikrarı, para politikalarını ve büyüme performansını da etkileyen sistemik sonuçlar üretmektedir.

Bu çerçevede Hürmüz Boğazı krizi, enerji güvenliği kavramının enerji kaynaklarına erişim ve tedarik miktarıyla sınırlı olmadığını aynı zamanda bu kaynakların güvenli, kesintisiz ve sürdürülebilir biçimde taşınabildiği ulaştırma güzergahlarının korunmasının da stratejik önem taşıdığını göstermektedir. Stratejik analizlerde sıkça belirtildiği üzere, "21. yüzyıl enerji güvenliği, yer altındaki rezervlerin miktarından ziyade, bu rezervlerin son tüketiciye ulaştığı rotaların jeopolitik emniyetiyle ölçülmektedir." (Yergin, 2023) Dolayısıyla günümüz enerji güvenliği anlayışı, kaynak çeşitliliğinin yanı sıra rota çeşitliliği, alternatif transit

koridorların geliştirilmesi ve jeopolitik dar geçitlere (chokepoint) bağımlılığın azaltılması gibi unsurları da içeren daha bütüncül bir perspektifi gerekli kılmaktadır.

Türkiye İçin Stratejik Fırsatlar

Hürmüz Boğazı merkezli jeopolitik krizler, küresel enerji arz zincirlerinde meydana getirdiği kırılmalar nedeniyle alternatif enerji transit güzergahlarına sahip ülkelerin stratejik önemini artırmaktadır. Bu bağlamda Türkiye, sahip olduğu jeostratejik konum, gelişmiş enerji altyapısı ve çok yönlü bağlantı kapasitesi sayesinde enerji güvenliği denkleminde önemi artan bölgesel aktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Avrupa, Kafkasya, Orta Asya ve Orta Doğu enerji havzalarının kesişim noktasında yer alan Türkiye, Hürmüz Boğazı'na bağımlılığı azaltabilecek kara temelli enerji ulaştırma koridorlarının merkezinde bulunmakta ve bu özelliğiyle alternatif enerji rotalarının şekillenmesinde kritik rol üstlenmektedir.

Türkiye'nin enerji sistemindeki stratejik avantajlarından biri boru hatlarıyla sınırlı olmayan çeşitlendirilmiş enerji altyapısına sahip olmasıdır. Ülkede faaliyet gösteren LNG terminalleri ile Yüzer LNG Depolama ve Yeniden Gazlaştırma Üniteleri (FSRU), küresel LNG piyasalarından esnek ve kısa vadeli tedarik imkanı sağlayarak deniz yolu kaynaklı arz şoklarının etkisini hafifletmektedir. Bu altyapı, Türkiye'nin enerji arz güvenliğini güçlendirmekle kalmayıp aynı zamanda bölgesel kriz dönemlerinde esnek tedarik kapasitesi sunarak enerji piyasalarındaki dayanıklılığını artırmaktadır. Buna ek olarak, Trans Anadolu Doğal Gaz Boru Hattı (TANAP), TürkAkım ve Güney Gaz Koridoru gibi projeler, Türkiye'yi Avrupa enerji arz güvenliği bakımından vazgeçilmez bir transit merkez haline getirmektedir.

Bu noktada literatürde "transit ülke" ile "enerji merkezi (hub)" kavramları arasında önemli bir ayrım bulunmaktadır. "Enerji ticaretinde üretici ve tüketici ülkeler arasındaki iletimi sağlayan

ülkeler, transit ülke olarak kavramsallaştırılmıştır. Transit ülkeler, enerji geçişinden geçiş ücreti alan ve enerji ihtiyacını bu hatlar üstünden karşılayan ülkeler olarak tanımlanmaktadır." (Yılmaz,2021, s.155) "Enerji hub ise enerji hatlarının bir noktada enerjinin toplanmasını, dönüştürülmesini ve re-export (yeniden ihraç) yapılmasını sağlayan noktalar olarak belirtilmiştir." (Yılmaz, 2021, s. 155) Bu çerçevede Türkiye'nin mevcut enerji politikaları, klasik transit ülke rolünün ötesine geçerek enerji depolama, LNG ticareti, spot piyasa gelişimi ve enterkonnekte altyapı yatırımları aracılığıyla bölgesel bir enerji merkezi olma hedefini yansıtmaktadır.

Dolayısıyla Hürmüz Boğazı'nda yaşanan her kriz, alternatif enerji güzergahlarına yönelik uluslararası talebi artırarak Türkiye'nin enerji jeopolitiğindeki ağırlığını yükseltmekte ve ülkenin transit ülke statüsünden stratejik bir enerji merkezine (hub) dönüşümüne ivme kazandıran dışsal bir itici güç rolü oynamaktadır. Bu süreç, Türkiye'ye ekonomik kazançla birlikte Avrupa enerji güvenliği, bölgesel diplomasi ve jeopolitik nüfuz alanlarında da stratejik avantajlar sağlamaktadır. Söz konusu bu stratejik avantajlar, Türkiye'nin bölgesel kriz yönetimi ve uluslararası ittifak sistemleri içerisindeki diplomatik manevra kabiliyetini de doğrudan etkilemektedir.

Türkiye Enerji Diplomasisine Etkileri

Hürmüz Boğazı merkezli bölgesel krizler, Türkiye'nin yalnızca enerji transit rolünü değil aynı zamanda enerji diplomasisi kapasitesini de güçlendiren önemli jeopolitik sonuçlar doğurmaktadır. Küresel enerji arz zincirlerinde meydana gelen kırılmalar, enerji ithalatçısı aktörlerin alternatif tedarik ve transit ortaklarına yönelmesine neden olmaktadır. Bu durum Türkiye'nin uluslararası enerji diplomasisindeki stratejik ağırlığını artırmaktadır. Özellikle Avrupa Birliği açısından değerlendirildiğinde, enerji arz güvenliğinin çeşitlendirilmesi hedefi kapsamında Türkiye'nin

alternatif enerji transit güzergahı ve bölgesel dağıtım merkezi olarak önemi daha görünür hale gelmektedir. Bu süreç, Türkiye–Avrupa Birliği ilişkilerinde enerji güvenliği eksenli yeni bir iş birliği alanı yaratma potansiyeli taşımaktadır.

Bunun yanı sıra Hürmüz Boğazı'na yönelik güvenlik risklerinin artması Körfez ülkelerini ihracat rotalarını çeşitlendirmeye yöneltmektedir. Bu bağlamda Türkiye, enerji taşımacılığı ve lojistik altyapısı sayesinde Körfez ülkeleri için alternatif enerji ulaştırma ve ticaret ortağı olarak öne çıkmaktadır. Özellikle enerji depolama, rafineri, petrokimya ve lojistik alanlarında Türkiye ile Körfez ülkeleri arasındaki stratejik iş birliklerinin derinleşmesi muhtemeldir. Bu durum, Türkiye'nin yalnızca transit ülke değil aynı zamanda enerji değer zincirinin farklı aşamalarında rol alan entegre bir bölgesel enerji aktörü haline gelmesini desteklemektedir.

Ayrıca kriz ortamı, alternatif kara ve deniz enerji güzergahlarına ilişkin projelerin yeniden öncelik kazanmasına yol açabilir. Irak–Türkiye Petrol Boru Hattı'nın kapasite artırımı ve güvenlik bakımından yeniden yapılandırılması, Doğu Akdeniz kaynaklarının Türkiye üzerinden Avrupa pazarlarına taşınması senaryoları ile Orta Koridor kapsamındaki enerji ve lojistik projeleri bu bağlamda stratejik önem kazanmaktadır. Söz konusu gelişmeler, Türkiye'nin çok yönlü enerji koridoru stratejisinin uluslararası aktörler nezdinde daha fazla destek bulmasına katkı sağlayabilir.

Son olarak, artan bölgesel belirsizlikler Türkiye'nin enerji depolama kapasitesini artırma ve bölgesel spot doğal gaz ticaret merkezi olma hedeflerini de hızlandırabilir. Enerji ticaret merkezleri fiziksel transitin ötesinde fiyatlama, ticaret ve piyasa yönlendirme kapasitesi sunduğundan, Türkiye'nin bu alandaki ilerlemesi enerji diplomasisini ekonomik ve jeopolitik etki araçlarıyla destekleyen yeni bir aşamaya işaret etmektedir. Bu doğrultuda Hürmüz kaynaklı krizler, Türkiye'nin enerji

diplomasisini çok boyutlu ve bölgesel güç projeksiyonu sağlayan bir araç haline dönüştürebilir.

2026 Sonrası İçin Stratejik Öngörü

Hürmüz Boğazı'nda yaşanan gelişmeler, çağdaş enerji güvenliği anlayışının yalnızca enerji üretim kapasitesi veya rezerv büyüklüğü üzerinden değerlendirilemeyeceğini; bunun ötesinde jeopolitik dayanıklılık, lojistik esneklik, altyapı çeşitliliği ve kriz yönetim kapasitesi gibi çok boyutlu unsurları içeren daha kapsamlı bir güvenlik perspektifini gerekli kıldığını ortaya koymaktadır. Günümüzde enerji güvenliği, enerji kaynaklarına erişim kadar bu kaynakların güvenli, sürdürülebilir ve kesintisiz biçimde taşınabilmesini sağlayan ulaştırma ağlarının ve stratejik altyapıların korunmasına da bağlı hâle gelmiştir. Bu durum, enerji transit güzergahları üzerinde bulunan ülkelerin uluslararası sistemdeki stratejik önemini artırmaktadır.

Bu bağlamda Türkiye, jeostratejik konumu, çeşitlendirilmiş enerji altyapısı ve Avrupa ile Asya arasındaki bağlantı kapasitesi sayesinde dönüşen enerji güvenliği paradigmasının sunduğu fırsatlardan yararlanabilecek başlıca ülkeler arasında yer almaktadır. Türkiye'nin boru hatları, LNG terminalleri, depolama tesisleri ve enerji ticaret piyasalarına yönelik kurumsal altyapısını güçlendirmesi halinde enerji akışlarının geçtiği bir transit güzergah olmaktan çıkarak enerji yönetişimi, fiyat oluşumu ve bölgesel arz güvenliği üzerinde etkili bir merkez ülke konumuna yükselmesi mümkün görünmektedir.

Dolayısıyla 2026 sonrası dönemde Türkiye'nin enerji stratejisinin başarısı, sahip olduğu coğrafi avantajı ekonomik ve jeopolitik etki kapasitesine dönüştürebilmesine bağlı olacaktır. Bu potansiyelin etkin biçimde değerlendirilmesi durumunda Türkiye bölgesel ölçekte bir transit ülke olmaktan çıkıp Avrupa, Orta Doğu, Kafkasya ve Orta Asya'yı birbirine bağlayan Avrasya enerji

mimarisinin şekillenmesinde belirleyici rol oynayan merkez ülkelerden biri haline gelebilecektir.

Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmanın odağını oluşturan "*Türkiye'nin bölgesel bir enerji ticaret merkezi (hub) olma stratejisi ile 2053 Net Sıfır Emisyon hedefi ve enerji dönüşümü taahhütleri stratejik olarak uyumlu mudur?"* temel araştırma sorusuna, ulusal yasal mevzuatın derinlemesine analizi üzerinden net bir yanıt vermek mümkündür.

Analiz bulguları göstermektedir ki, ilk bakışta çelişkili gibi görünen fosil yakıt (doğal gaz) ticaretini merkezileştirme hedefi ile dekarbonizasyon politikaları, Türk enerji hukukunun evrimsel mimarisinde bütüncül bir "enerji geçiş köprüsü" modeliyle sentezlenmiştir. 4646 Sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu ile temelleri atılan serbestleşme ve şeffaf fiyatlandırma mekanizmaları, Türkiye'nin bölgesel bir hub olmasının önünü açarken 5346 Sayılı YEK Kanunu ve YEKA modelleri, elektrik üretiminde doğal gazın payını yapısal olarak aşağı çekerek yeşil dönüşümü finanse edecek bir ekonomik alan yaratmıştır. 5627 Sayılı Enerji Verimliliği Kanunu ise talep tarafını disipline ederek iç piyasadaki gaz tüketim baskısını hafifletmiş ve hub stratejisi için gerekli olan "re-export" kapasitesine yasal bir kaldıraç sağlamıştır.

Bu uyumun nihai ve en somut yasal garantörü ise İklim Kanunu Taslağı ve kurulacak olan ulusal Emisyon Ticaret Sistemi'dir. ETS vasıtasıyla doğal gaza getirilecek "karbon maliyeti", gazın sonsuz bir enerji kaynağı değil yenilenebilir enerji entegrasyonunu şebekede dengeleyen esnek bir "geçiş yakıtı" olduğunu normatif olarak tescillemektedir.

Sonuç olarak Türkiye'nin yasal düzenlemeleri, ülkeyi sadece fiziki gazın geçtiği edilgen bir transit hat olarak değil karbon emisyon değerinin ölçüldüğü, yeşil hidrojen dönüşüm altyapısının hazırlandığı ve AB Yeşil Mutabakatı standartlarına uyumlu bir

"Düşük Karbonlu Enerji Ticaret Merkezi" olarak kurgulamaktadır. Dolayısıyla, Türkiye'nin Hub olma vizyonu ile Net Sıfır hedefi arasında yapısal bir çelişki bulunmamakta; aksine mevcut yasal mevzuat, bu iki stratejik hedefi birbirini besleyen ve dekarbonizasyon sürecini rasyonel bir patikaya oturtan dinamik bir denge modeli halinde dönüştürmektedir.

Yazarların Katkı Oranı

Araştırma Tasarısı Ö.K. ve S.S., Literatür Taraması Ö.K., Veri Toplama ve Sınıflandırma Ö.K, Analiz, Sentez ve Değerlendirme Ö.K. ve S.S. Metin Oluşturma Ö.K. ve S.S.

Çıkar Çatışması

Araştırmanın yazarları olarak herhangi bir çıkar çatışma beyanımız bulunmamaktadır.

Yapay Zekâ Kullanımı Bildirimi

Bu çalışmanın hazırlanma sürecinde, dil bilgisi, imla ve ton düzenlemesi, metin organizasyonu ve akademik yazım desteği amacıyla yapay zekâ araçlarından yararlanılmıştır. Kullanılan içerikler akademik etik kuralları çerçevesinde incelenmiş ve gözden geçirilmiştir. Yapay zekâ yalnızca yardımcı araç olarak kullanılmış; çalışmanın bilimsel değerlendirme, analiz ve nihai içeriği yazarlara aittir.

Kaynakça

Allı, Ç. (2016). Hürmüz Boğazı'ndaki Abu Musa Ve Tunb Adaları Üzerindeki Anlaşmazlıklar. *Uluslararası Afro-Avrasya*

Araştırmaları Dergisi(2), 26-35. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/342896 adresinden alındı

Aslan, M. (2026). *Hürmüz Boğazı Krizi: Küresel Ekonomide enerji Şoku ve Sistemik Kırılganlıklar.* İran: İran Araştırmaları Merkezi. https://www.iramcenter.org/uploads/files/savasin_ekonomik_etkleri_murat_aslan.pdf adresinden alındı

Çağatay, B. (2021). *Basra Körfezi'nde Enerji Güvenliği ve Jeopolitik Rekabet.* İstanbul: Orion Kitabevi.

Çelikpala, M. (2014). Enerji Güvenliği: NATO'nun Yeni Tehdit Algısı. *Uluslararası İlişkiler Akademik Dergisi, 10*(40), 75-99. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/540268 adresinden alındı

Dağlı, F. Ö. (2021). Putin Dönemi Rusya-Türkiye İlişkilerinde Enerjinin Rolü. *Rusad 6*, 131-153. doi:http://dx.doi.org/10.48068/rusad.964280

DEMİR, A. (2014, Mayıs). İran'ın Basra Körfezi'ni Bloke İhtimali ve Hürmüz Boğazı'ndan Geçişlerin Uluslararası Hukuk Açısından Analizi. *Savunma Bilimleri Dergisi, 13*(1), 107-140. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/180232 adresinden alındı

Enerji Ajansı. (2025, aralık 29). *Enerji Ajansı-Yekdem Nedir?* 2025 tarihinde Enerji Ajansı: https://enerjiajansi.com.tr/yekdem-nedir/ adresinden alındı

Enerji Etüt. (2026, Ocak 02). Enerji Etüt: https://www.enerjietutraporu.com/5627-sayili-enerji-verimliligi-kanunu.html adresinden alındı

ENGiN, N. (Temmuz 2010). ENERJİ KAYNAĞI OLARAK DOĞALGAZ VE TÜRKİYE. *MARMARA COĞRAFYA*

DERGİSİ(22), 233 - 244. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/3220 adresinden alındı

Erek, H. (tarih yok). Elektrik İle Doğal Gaz Piyasalarının Yakınsaması ve Rekabet Hukuk. *Rekabet Dergisi*, 48-85. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1476606 adresinden alındı

Küçük, Ü. (2022). Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Konusunda Kurumsal Yapılanma ve Yerel Yönetimlere İlişkin Mevzuat İçinde Yenilebilir Enerji. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 12*(1), 369-381. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2071251 adresinden alındı

Mirici, M. E., & Berberoğlu, S. (2022, Ocak). Türkiye Perspektifinde Yeşil Mutabakat ve Karbon Ayak İzi: Tehdit Mi? Fırsat Mı? *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, 8*(1), 156-164. doi:10.21324/dacd.982396

Murat Aslan, B. G. (2023). Akkuyu Nükleer Enerji Santrali: Adana, Hatay ve Mersin Bölgesinde Nükleer Enerji Santrali ve Nükleer Güvenliğe Yönelik Görüşün Ekonomi ve Toplumsal Güvenlik Bağlamında Ölçülmesi. *Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 41*(2), 175-203. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2456971 adresinden alındı

Oğan, S. (2003, Ağustos). Mavi Akım Projesi: Bir Enerji Stratejisi ve Stratejisizlik Örneği. *Aylık Strateji ve Analiz E-Dergisi*(7), 2-20. http://www.emreozgur.com/Mavi.pdf adresinden alındı

Oktay, E., & Çamkıran, R. F. (2005). Avrupa Birliği Enerji Güvenliği Açısından Türkiye'nin Önemi. *Avrupa Araştırmaları*

Dergisi, 13(1-2), 67-86. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1392 adresinden alındı

Saraçoğlu, F., & Kutlu, M. (2025). Sınırda Karbon Düzenleme Mekanizması ve Türkiye'ye Olası Etkileri. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 27*(1), 1-26. doi:https://doi.org/10.26745/ahbvuibfd.1593438

Sarıkaya, Y., & Öztopal, M. K. (2022). Türkiye'nin Enerji Öbeği Olma Stratejisinin Doğal Gaz Sektörü Bakımından Değerlendirilmesi. *Karadeniz Araştırmaları Dergisi, XIX*(76), 1025-1041. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2838232 adresinden alındı

Sevim, C. (2012). Küresel Enerji Jeopolitiği ve enerji Güvenliği. *Journal of Yasar University, 26*(7), 4378-4391. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/179360 adresinden alındı

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2022). *Türkiye Ulusal Enerji Planı.* Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf adresinden alındı

Tuncer, F. F., & Altınsoy, Z. D. (2020). Doğu Akdeniz'de Münhasır Ekonomik Bölge Tartışmaları Ve Türkiye'nin Vizyonu. *Akademik Hassasiyetler, 7*(13), 21-45. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1127786 adresinden alındı

Uluslararası Enerji Ajansı. (2025, Aralık 09). Uluslararası Enerji Ajansı: https://www.iea.org/topics/energy-security adresinden alındı

Varoğlu, A. (2022, Ocak). Kuzey Akım Ve Kuzey Akım-2 Boru Hatlarının Ekonomik, Politik Ve Çevresel Açıdan

Değerlendirilmesi. *Yer Altı Kaynakları Dergisi*(21), 37-59. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2180746 adresinden alındı

Yılmaz, D. (2021, Haziran 1). Enerji Güvenliği Açısından Bir Transit Ülke Olarak Türkiye. *Yüksek Lisans Tezi*. Bursa, Bursa, Türkiye: Bursa Uludağ Üniversitesi.

Yılmaz, D. (2021). Türkiye'nin Enerji Politikası Ve Altyapısı Bağlamında Enerji Hub Potansiyeli. *Ulusam Türkiye Politik Çalışmalar Dergisi, 1*(1), 33-48. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2286078 adresinden alındı

Yılmaz, S., & Kalkan, D. K. (2017, Aralık). Enerji Güvenliği Kavramı: 1973 Petrol Krizi Işığında Bir Tartışma. *Uluslararası Kriz Ve Siyaset Araştırmaları Dergisi, 1*(3), 169-199. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/391852 adresinden alındı


BİDGE