

**Araştırma Makalesi**

**Ortalama - Varyans Yaklaşımı ile İnovasyon Düzeyinin Enerji Dönüşümünde Maliyet ve Risk Etkisinin İncelenmesi**

*Investigating the Impact of Innovation Level on Cost and Risk at the Energy Transition by Mean-Variance Approach*

<p><b>Volkan ALAÇAM</b> Hacettepe Üniversitesi İşletme Bölümü <a href="mailto:valacam@epdk.gov.tr">valacam@epdk.gov.tr</a> <a href="https://orcid.org/0000-0002-1675-5729">https://orcid.org/0000-0002-1675-5729</a></p>	<p><b>Mehmet Baha KARAN</b> Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi İşletme Bölümü <a href="mailto:bkaran@hacettepe.edu.tr">bkaran@hacettepe.edu.tr</a> <a href="https://orcid.org/0000-0002-3923-4598">https://orcid.org/0000-0002-3923-4598</a></p>
--	---

<b>Makale Geliş Tarihi</b>	<b>Makale Kabul Tarihi</b>
<b>06.01.2025</b>	<b>07.02.2025</b>

**Öz**

*Bu çalışma, sürdürülebilir enerji sistemlerine geçişe odaklanmakta ve başarılı enerji dönüşümlerini kolaylaştırmada teknolojik yeniliklerin temel rolünü vurgulamaktadır. Özel olarak, bu enerji dönüşümü bağlamında optimal enerji üretim portföylerinin, çeşitli inovasyon senaryoları altında maliyet ve risk profillerini nasıl etkilendiğini incelemektedir. Araştırma, ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE) denetimi altında faaliyet gösteren Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'ndan (NREL) elde edilen kamuya açık verileri kullanarak bu verilere Modern Portföy Teorisi'nin Ortalama - Varyans Yaklaşımını uygulamaktadır. Bulgular; 2035 ile 2045 yılları arasında yenilenebilir enerjinin daha büyük bir payını içeren çeşitlendirilmiş optimal enerji portföylerinin elde edilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu optimal portföyler içinde kömür ve doğalgaz santral teknolojilerinin büyük ölçüde biokütle teknolojileriyle yer değiştireceği öngörülmektedir. 2035 - 2045 dönemi için analiz edilen tüm senaryolar boyunca, beklenen risk ile portföy maliyeti oranında belirgin bir azalma görülmektedir; bu da her bir maliyet birimi için daha büyük risk azaltımının sağlanabileceğini önermektedir. Bu çalışma, politika yapıcılara yenilenebilir kaynaklara daha fazla bağımlılığı teşvik eden enerji üretim politikaları uygulama konusunda rehberlik sağlamaktadır. Bu kapsamda, iklim değişikliğini azaltmaya yönelik çevresel zorunlulukları ve enerji güvenliği ile ilgili küresel jeopolitik endişeleri de dikkate almaktadır.*

**Anahtar Kelimeler:** Enerji Dönüşümü, İnovasyon, Enerji Üretim Portföyü, Modern Portföy Teorisi, Ortalama-Varyans Yaklaşımı.

**Abstract**

*This study focuses on the transition to sustainable energy systems, emphasizing the essential role of technological innovation in facilitating successful energy transitions. It specifically examines how various innovation scenarios influence cost and risk profiles of optimal energy production portfolios within the context of energy transition. The research utilizes the Mean-Variance Approach from Modern Portfolio Theory, with publicly available data sourced from the National Renewable Energy Laboratory (NREL), which operates under the oversight of the U.S. Department of Energy (DOE). The findings indicate that between 2035 and 2045, it is possible to achieve diversified optimal energy portfolios that incorporate a greater share of renewable energy. Additionally, it is projected that coal and natural gas power plant technologies will largely be supplanted by biomass technologies within these optimal portfolios. Throughout all scenarios analyzed for the 2035 - 2045 period, there is a notable decrease in the ratio of expected risk to portfolio cost, suggesting that greater risk reduction can be attained for each unit of cost incurred. This study provides valuable guidance for policy makers on implementing energy production policies that encourage a greater reliance on renewable*

**Önerilen Atıf /Suggested Citation**

Alaçam, V. & Karan, M.B., 2025, Ortalama - Varyans Yaklaşımı ile İnovasyon Düzeyinin Enerji Dönüşümünde Maliyet ve Risk Etkisinin İncelenmesi, *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi*, 60(1), 347-365.

*sources. It considers both environmental imperatives aimed at mitigating climate change and global geopolitical concerns related to energy security.*

**Keywords:** *Energy Transition, Innovation, Energy Production Portfolio, Modern Portfolio Theory, Mean-Variance Approach.*

## 1. Giriş

Son yirmi yılda, hidrokarbonlar gibi geleneksel enerji kaynaklarından yenilenebilir alternatiflere kayda değer bir geçiş olmuştur ve bu durum büyük enerji şirketlerinin portföylerini önemli ölçüde etkilemiştir. Bu geçiş, fosil yakıtların çevresel etkilerini ele alma konusundaki acil ihtiyacından kaynaklanmaktadır; bu yakıtlar, karbondioksit emisyonları aracılığıyla hem yerel hem de küresel kirliliğe büyük katkı sağlamaktadır. Buna karşılık, yenilenebilir enerji üretimi, minimal emisyonlar üreterek iklim değişikliğini hafifletmede kritik bir rol oynamaktadır. Küresel nüfuslar ve ekonomiler büyüdükçe, enerji talebinin artması beklenmektedir; bu özellikle gelişmiş ülkelerde geçerlidir. Bu durum, ekonomik faaliyetlerin fosil yakıt tüketiminden ayrılmasını gerektirmektedir; böylece ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarda sürdürülebilirlik sağlanabilir. Düşük ekolojik etkiye sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, gelecekte düşük karbonlu enerji sistemlerinin geliştirilmesi için gereklidir. Kyoto Protokolü, ülkelerin sera gazı konsantrasyonlarını dengelemek amacıyla karbondioksit emisyonlarını 1990 seviyelerine düşürmesini zorunlu kılmaktadır (Gupta, 2016). Avrupa Birliği, daha temiz enerji kaynaklarına geçişte liderlik ederken, fosil yakıt kaynaklarına sahip olmayan ülkeler giderek yenilenebilir enerjiye yönelmektedirler; bu da enerji güvenliğini artırma amacını taşımaktadır (Vezzoni, 2023). Bu kaymaya rağmen, mevcut yatırımlar hala maliyet etkinliği ve depolama avantajları nedeniyle fosil yakıtları tercih etmektedir. Bu alanda sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), temizliği ve taşınabilirliği ile özellikle dikkat çekicidir. Ayrıca 2050 yılına kadar net sıfır emisyonu sağlamak için yenilenebilir teknolojilere ve altyapıya yıllık yaklaşık 4,5 trilyon dolarlık önemli yatırımlar gerekmektedir (Stefán, 2023). Bununla birlikte, yenilenebilir enerji alanındaki son yenilikler, sürdürülebilir alternatiflere geçişin mümkün olduğunu göstermektedir. Schumpeter'in yenilik teorisi, yeniliğin ekonomik yapıları köklü bir şekilde dönüştürdüğünü; eski paradigmaları yaratıcı bir şekilde yok ederken sürekli olarak yenilerini ürettiğini öne sürmektedir (Schumpeter & Swedberg, 2021). Bu süreç, mevcut durumu zorlayan yeni ürünler ve süreçler aracılığıyla ekonomik gelişim için stratejik bir itici güç işlevi görmektedir (Foster & Kaplan, 2011). Enerji sektöründe, yıkıcı yenilikler mevcut pazarlardaki maliyetleri azaltabilir veya çevre dostu tüketicilere yönelik yeni pazarlar yaratabilir. Teknolojik ilerlemeler, bu yeniliklerin ileriye taşınmasında temel bir rol oynamaktadır (Marques et al., 2020). Son teknolojik gelişmeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının yükselişini hızlandırmış ve önemli maliyet düşüşlerine yol açmıştır. Bu trend politika yapımcıların dikkatini çekmiştir; ancak geleneksel kaynaklarla karşılaştırıldığında yenilenebilir kaynakların daha yüksek maliyetleri güvenlik ve ekonomik uygulanabilirlik konularında karmaşık bir ikilem oluşturmaktadır (Vakulchuk et al., 2020). Yenilenebilir enerji kaynakları henüz hidrokarbonlarla maliyet paritesine ulaşmamış olsa da ulusal enerji portföylerinde belirgin bir kayma yaşanmaktadır. Gelecek yönelimi, yenilenebilirlerin maliyet ve risk entegrasyonunu etkileyen devam eden teknolojik ilerlemelere bağlı olacaktır. Bu çalışma, 2035 ile 2045 yılları arasında yenilenebilir kaynakların artan payını öngörmeyi ve ulusal enerji karmalarında baskın olacak ana enerji kaynaklarını tanımlamayı amaçlamaktadır. Çeşitli yenilik senaryoları içinde beklenen araştırma ve geliştirme sonuçlarını incelerken teknolojik ilerlemelerle ilişkili riskleri ve düşük maliyetli faydaları dikkate almaktadır. Bu araştırma için veriler, ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE) denetimindeki Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı'ndan (NREL) sağlanan kamuya açık veri setlerinden elde edilmiştir. ABD'nin Ar-Ge faaliyetlerindeki liderliği, bu verilerin yatırımcılar ve politika yapımcılar için eyleme geçirilebilir içgörüler sunması açısından özellikle önemlidir. Ernst & Young'a (EY) göre ABD, güçlü politika çerçeveleri ve yenilenebilir sektörlerdeki önemli yatırımlar nedeniyle enerji yatırımları için en cazip ülkelerden biri olarak istikrarlı bir şekilde sıralanmaktadır (EY, 2023). Yenilenebilir Enerji Ülke Cazibesi Endeksi, ABD'yi 2020 yılından beri yenilenebilir yatırımlar için önde gelen bir destinasyon olarak sıralamaktadır (EY, 2023); bu da karar vericiler için kaynak tahsis stratejileri hakkında kritik bilgiler sunmaktadır. Bu durum bu çalışmanın politika yapımcılar ve uluslararası yatırımcılar açısından bir referans noktası olma amacıyla uyumakta ve çalışmanın bu konudaki temel motivasyonunu desteklemektedir. Bu sebeple bu çalışmada, 2020'den 2045'e kadar ABD'deki tipik elektrik üretim tesislerinde kullanılan hem fosil hem de yenilenebilir enerji kaynaklarını kapsayan ve NREL'den sağlanan kamuya açık veri setleri kullanılmıştır. Çalışma bu dönemde yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarının optimal portföyler içindeki payını artırıp artırmayacağını Markowitz'in performans - risk dengesi üzerine odaklanan portföy teorisi temelinde incelemektedir (Markowitz, 1952).

Çalışmanın bulguları, kömür ve doğalgaz santrallerinin payının azalacağını ve yerini biokütle santrallerinin alacağını öngörmektedir. Özellikle orta senaryoda, düşük risk seviyeleriyle karakterize edilen optimal portföylerde bu eğilim belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu bulgular yenilikçi ekonomilerin kömüre

olan bağımlılığı azaltma çabalarını önceliklendirdiğini göstermektedir. Ayrıca, çalışmanın bulgularına göre inovasyon düzeyinin artışıyla birlikte en düşük risk seviyelerindeki optimal portföylerde yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin payında önemli bir artış gözlemlenmektedir. Çalışmanın bulguları, yenilik kapsamının bu değişimleri önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymakta; yüksek inovasyon seviyelerine sahip senaryolar, biokütle teknolojilerinin 2045 yılına kadar optimal portföylerde daha belirgin hale geleceğini göstermektedir. Ayrıca çalışmanın bulguları, belirli yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle biokütle teknolojilerine yönelik yatırımların artırılmasını savunmakta ve kömür ile doğalgaz yerine sürdürülebilir, düşük riskli enerji kaynaklarını teşvik eden politikaları desteklemektedir. Bu sonuçlar, enerji sektöründeki yenilik seviyelerinin artmasıyla yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyonunun arttığına dair bir ilişkiyi ortaya koymakta; bu da inovasyon düzeyinin sürdürülebilir enerji çözümlerini yönlendirme potansiyelini göstermektedir. Çalışmanın bulguları ayrıca farklı yenilik senaryolarının 2045 yılına kadar optimal elektrik üretim portföylerinin maliyet ve risk profilleri üzerinde farklı etkileri olacağını ve 2035 - 2045 dönemi için analiz edilen tüm senaryolar boyunca, beklenen risk ile portföy maliyeti oranında belirgin bir azalma olacağını göstermektedir.

Bu çalışma farklı alanlarda çeşitli katkılar sağlamaktadır. İlk olarak, enerji portföyü tahmini ile maliyet ve risk açısından potansiyel enerji portföylerini öngörmek amaçlanmaktadır; bu, enerji üretiminde karşılaşılabilecek belirsizlikleri azaltmak için kritik bir adımdır. İkinci olarak, yenilik seviyelerinin etkisi incelenecek ve artan yenilik seviyelerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının payları üzerindeki etkileri araştırılacaktır; bu araştırma, yeniliklerin sektördeki dönüşüm sürecine katkısını anlamak açısından önem taşımaktadır. Üçüncü olarak, yenilik seviyelerinin farklı etkileri üzerinde durulacak ve optimal enerji portföylerinde her kaynağın payı üzerindeki değişken etkiler gösterilecektir; bu durum, yatırımcıların hangi kaynaklara yönelmesi gerektiği konusunda bilgi sağlayacaktır. Dördüncü olarak, farklı inovasyon senaryolarının enerji dönüşümünün etkisi altında oluşacak optimal enerji portföylerinin maliyetleri ve riskleri üzerindeki etkileri açıklanacaktır; bu, enerji geçiş süreçlerinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Son olarak, metodolojik katkı sağlanarak Modern Portföy Teorisi kullanılacaktır; bu yaklaşım, enerji portföylerinin daha sistematik bir şekilde yönetilmesine ve enerji üretiminde risk yönetimi etkinliğine rehberlik sağlayarak yenilenebilir enerji yatırımlarının daha rasyonel bir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Çalışma altı bölümden oluşmaktadır: girişin ardından literatür taraması ve hipotez geliştirme, sonrasında veri sunumu ve metodoloji ve son olarak bulguların tartışılması ve sonuçların çıkarımları bölümleri yer almaktadır.

## 2. Literatür ve Hipotez Geliştirme

Karbon bazlı yakıtlardan düşük veya sıfır karbon alternatiflerine geçiş, teknoloji geliştiricileri, politika yapımcılar, piyasa aktörleri ve finansal kurumlar gibi tüm ilgili taraflar arasında iş birliğini teşvik eden yapılandırılmış bir yenilik yaklaşımını gerektirmektedir. Teknolojik ilerlemeler, enerji geçişlerini kolaylaştırmada her zaman kritik bir rol oynamış, özellikle güneş panelleri ve elektrikli araçlar (EV'ler) gibi anahtar teknolojilerde maliyetlerin düşmesi ve yatırım risklerinin azalmasıyla enerji verimliliğindeki iyileştirmeleri desteklemiştir. Bu konuyu araştıran birçok çalışma, enerji üretim sistemlerinin yapılarını, süreçlerini ve yeteneklerini geliştirmek için yeni yollar keşfetmiştir. Araştırma yöntemleri ve veri kaynaklarındaki farklılıklara rağmen, yeniliğin enerji maliyetlerini azaltma, daha temiz enerji seçeneklerinin pazar payını genişletme ve sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etme konusundaki olumlu etkileri konusunda yaygın bir görüş birliği vardır. Bu ortak anlayış, enerji sektörüne yenilikçi teknolojilerin entegre edilmesinin daha sürdürülebilir bir geleceği desteklemek için gerekli olduğunu vurgulamaktadır. Ganda (2019) çalışmasında, yenilenebilir enerji tüketimi ile araştırma ve geliştirme harcamaları ile karbon emisyonları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir negatif korelasyon bulmuştur; bu analizi 2000-2014 yılları arasında seçilmiş OECD ekonomilerinden elde edilen verilerle Genelleşmiş Anlamlılık Yöntemi (GMM) kullanarak gerçekleştirmiştir. Murshed ve arkadaşları (2022), E7 ülkelerinde karbon nötrlüğüne ulaşmak için yenilenebilir teknoloji yeniliğine yönelik uzun vadeli yatırımların önemini vurgulamış ve 2007-2018 yılları arasındaki verileri içeren ekonometrik bir analiz kullanmışlardır. Chen ve Lee (2020), bireysel ülke özelliklerinin çevresel sürdürülebilirliği önemli ölçüde etkilediğini belirterek, 1996-2018 yılları arasında 96 ülke verilerine uygulanan Birleşik Alan Ekonometrik Modeli (SDM) ile yeniliğin karbon emisyonları üzerindeki küresel etkisinin anlamlı olmadığını ortaya koymuşlardır. Zhao ve arkadaşları (2022), enerji yeniliği ve küreselleşmenin G7 ülkelerinde ekolojik ayak izlerini olumsuz etkilediğini göstermiştir; bu analiz 1990 - 2018 yılları arasındaki verileri kullanarak Kesitsel Dağıtılmış Gecikmeli Otoregresif Modelini (CS-ARDL) uygulamıştır. Patwa ve arkadaşları (2021), yeniliğin çevresel ve sosyo-ekonomik zorluklarla başa çıkmada kritik olduğunu belirtmiş ve 183 tüketicinin yanıtlarına dayanan ampirik olarak doğrulanmış bir döngüsel ekonomi benimseme modelini desteklemiştir. Ullah ve arkadaşları (2021), Pakistan'da teknolojik yenilikler ile karbon emisyonları arasında asimetrik uzun vadeli bir ilişki tespit etmiş; bu analizi 1990 - 2018 verileriyle Dağıtılmış Gecikmeli

Otoregresif Model (ARDL) kullanarak gerçekleştirmiştir. Haldar ve arkadaşları (2023), gelişen ekonomilerin çevresel olarak sürdürülebilir ekonomik büyüme için yenilenebilir enerji üretimini artırmaları gerektiği sonucuna varmış; bu analizi 2000-2018 yılları arasındaki 16 gelişen ekonomi verileriyle Araçsal Değişken GMM ve Driscoll-Kraay Standart Hataları ile Sabit Etkiler Regresyonu kullanarak yapmışlardır. Ozturk ve Ozturk (2018), Türkiye'de teknolojik yeniliğin geleneksel kaynaklardan enerji tüketimi üzerinde uzun vadeli negatif bir etkisi olduğunu bulmuş; bu analizi 1980 - 2015 yılları arasındaki verilerle ARDL Modelini kullanarak gerçekleştirmiştir. Lin ve Zhu (2019), teknolojik yeşil yeniliğin karbon emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını; bu durumu 2000 - 2015 yılları arasındaki Çin'e ait bölgesel panel verilerine uygulanan Doğrusal Regresyon Modeli (LRM) ile göstermiştir. Fernández ve arkadaşları (2018), araştırma ve geliştirme harcamalarıyla ölçüldüğünde, yeniliğin gelişmiş ekonomilerde karbondioksit azaltımına önemli katkılarda bulunduğunu Ordinary Least Squares Method (OLS) ile analiz ederek AB-15 ülkeleri, ABD ve Çin'in 1990-2013 verilerini inceledikleri çalışmada ortaya koymuşlardır. Wang ve arkadaşları (2020), orta gelirli G20 ülkelerinde yenilenebilir enerji gelişimini yönlendiren en kritik faktörün araştırma ve geliştirme olduğunu tespit etmiş; bu analizi 1990-2017 yılları arasında G20 ülkelerinden toplanan verilerle çoklu eşbütünlük tahmin yöntemleri kullanarak gerçekleştirmiştir. Alam ve Murad (2020), teknolojik yenilikteki ilerlemenin OECD ülkelerinde uzun vadede yenilenebilir enerjiye geçişi önemli ölçüde etkilediğini; bunu ekonomik büyüme ve ticaret açıklığı ile birlikte ARDL Modelini kullanarak 1970 - 2012 yılları arasındaki 25 OECD ülkesine ait verilerle incelemişlerdir. Solarin ve arkadaşları (2022), teknolojik yeşil yeniliğin yenilenebilir enerji teknolojileri ve üretimi üzerinde önemli bir olumlu etkiye sahip olduğunu; böylece daha temiz enerji kaynaklarına olan talebi artırdığını Moment Method Quantile Regression (MMQR) ile BRICS ülkeleri arasındaki 1993 - 2018 verilerini analiz ederek göstermiştir. Assi ve arkadaşları (2021), çevresel teknolojilerdeki yeniliklerin ve reel GSYİH büyümesinin ASEAN ekonomilerinde yenilenebilir enerjiye geçişte belirleyici faktörler olduğunu belirtmiş; bu analizi 1998-2018 yılları arasındaki verilerle Panel ARDL Analizi ve Dumitrescu-Hurlin Panel Nedensellik Testi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Töbelmann ve Wendler (2020), çevresel yeniliklerin karbondioksit emisyonlarını azaltmaya olumlu katkıda bulunduğunu ancak genel inovasyon faaliyetlerinin emisyon azaltımını anlamlı şekilde etkilemediğini belirtmiş; bu analizi AB-27 ülkeleri üzerinde Genelleşmiş Anlamlılık Yöntemi (GMM) ile gerçekleştirmiştir. Son olarak, Mongo ve arkadaşları (2021), çevresel yeniliklerin genel olarak uzun vadede karbondioksit emisyonlarını azalttığını ancak kısa vadeli etkilerin rebound etkileri nedeniyle olumsuz olabileceğini bildirmiştir; bu çalışma EU-15 ülkeleri üzerindeki ARDL Modeli ile 1991-2014 yılları arasındaki verileri kullanmıştır.

Görüldüğü üzere teknolojik yenilik, ekonomik büyümenin temel itici gücü olarak geniş bir kabul görmektedir ve enerji üretiminde sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak için gereklidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarına geçişin teorik çerçevesi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir ve J.A. Schumpeter, yenilik teorisinde önemli bir figür olarak tanınmaktadır. Schumpeter, yeniliği üç boyutla tanımlamıştır: yeni veya geliştirilmiş ürünlerin ve süreçlerin tanıtımı, yeni fikirlerin uygulanması ve yeni teklifler geliştirmeye yönelik eylemler (Schumpeter & Swedberg, 2021). Howitt ve Aghion (1998), Schumpeter'in yaklaşımının içsel büyüme modellerine dayandığını belirterek, yeniliğin, özellikle radikal yeniliklerin, ekonomik büyümeyi teşvik etmedeki kritik rolünü vurgulamışlardır. "Yaratıcı yıkım" kavramı, yıkıcı yeniliklerin eski teknolojileri ve uygulamaları daha verimli alternatiflerle değiştirmesi yoluyla uzun vadeli faydalar üretebileceğini göstermektedir. Bu durum, BRICS, ASEAN ve OECD ülkeleri gibi enerji sektöründe teknolojik ilerlemelerin belirgin olduğu ülkelerde özellikle gözlemlenmektedir. Örneğin, Sharma ve arkadaşları (2021), 1990 - 2018 yılları arasında BRICS ülkelerinden elde edilen panel verilerini kullanarak teknolojik yeniliğin yenilenebilir enerji tüketimini olumlu yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Bu bulgular, temiz enerji kaynaklarının benimsenmesini önemli ölçüde artıran yeşil teknolojik yenilikleri vurgulayan Solarin ve arkadaşlarının (2022) çalışmasıyla da örtüşmektedir. Benzer şekilde, Lin ve Zhu (2019), Alam ve Murad (2020) ile Assi ve arkadaşlarının (2021) çalışmaları, daha yüksek yenilik seviyelerinin yenilenebilir enerji tüketimini olumlu yönde etkileyebileceğini desteklemekte ve yenilenebilir enerji kaynaklarının genel enerji karışımındaki payının gelecekte artmasının muhtemel olduğunu önermektedir. Bu bağlamda ilk olarak aşağıdaki hipotez önerilebilir:

***H<sub>1a</sub> :*** *Bir ekonominin enerji sektöründeki inovasyon seviyesinin artması, temiz enerji dönüşümünü destekleyerek enerji portföylerinde yenilenebilir kaynaklara dayalı enerji üretim teknolojilerinin daha yüksek bir paya sahip olmasına yol açacaktır.*

Daha temiz enerjilere geçişin küresel iklim değişikliği ile başa çıkmada kritik öneminin devam etmesi nedeniyle, politika yapımcıların, endüstri paydaşlarının ve araştırmacıların yeniliğin maliyet düşürme üzerindeki rolünü anlamaları ve bu düşüşlerin enerji üretim portföyleriyle ilişkili riskleri nasıl etkilediğini kavramaları önemlidir. Bu kapsamda Elia ve arkadaşları (2021), enerji teknolojisi inovasyonundaki mevcut uygulamaların kapsamlı bir analizini yaparak, yenilenebilir enerji teknolojileri ile ilişkili maliyetlerin artan önemini

vurgulamıştır. Ayrıca Ye ve arkadaşları (2022), yenilenebilir enerji politikalarının genellikle teknolojik riski artırma eğiliminde olduğunu bulmuş; bu durumun firmaların yeni yenilenebilir teknolojileri geliştirme ve benimseme teşviklerini azaltabileceği belirtilmiştir; bu durum ise politika araçlarını ayarlamakla tamamen hafifletilememektedir. Dahası, deLlano-Paz ve arkadaşları (2018), maliyet ve teknoloji riskini modellerine dahil ederek Avrupa'da maliyet-risk perspektifinden yenilenebilir enerji teknolojilerinin payını artırmanın gerekliliğini vurgulamışlardır. Özellikle çevresel etkileri en aza indirirken arz güvenliğini korumak için rüzgâr enerjisinin teşvik edilmesini savunmuşlardır. Bu bağlamda, enerjide artan inovasyonun daha düşük üretim maliyetlerine yol açıp açmadığının değerlendirilmesi; bunun yanı sıra bu durumun enerji üretim portföylerindeki ilişkili riskleri nasıl etkilediğinin incelenmesi kapsamında önerilen ikinci hipotez aşağıdaki gibidir:

***H<sub>1b</sub>*** : *Enerji sektöründeki inovasyon seviyesinin artması, optimal enerji üretim portföylerinde risk-maliyet oranının azalmasına yol açacaktır.*

Bu ikinci hipotez, inovasyon ilerledikçe sadece üretim maliyetlerini veya risklerini düşürmekle kalmayıp aynı zamanda çeşitli enerji kaynaklarıyla ilişkili riskler ile maliyetler arasındaki dengeyi de iyileştireceğini öne sürmektedir; böylece yenilenebilir enerji yatırımlarının genel stabilitesi ve çekiciliği artacaktır.

Diğer taraftan güneş, rüzgâr ve hidro gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi, farklı teknolojiler arasında önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Huenteler ve arkadaşları (2016), enerji teknolojilerinin farklı yenilik ve öğrenme süreçlerinden geçtiğini vurgulayarak, teknoloji politikalarının bu spesifik özelliklere göre uyarlanması gerektiğini önermektedir. Öte yandan, Michalak ve Wolniak (2023), 2015-2020 yılları arasında Avrupa Birliği'nde bir ülkenin yenilik endeksi ile enerji karışımındaki yenilenebilir enerji oranı arasında güçlü bir pozitif korelasyon bulmuşlardır. Çalışmaları, yenilikçi ekonomilerin kömüre olan bağımlılığı azaltarak karbon salınımını düşürmeye odaklandığını desteklemekte; bu da belirli yenilenebilir enerji kaynaklarının zamanla daha avantajlı hale gelebileceğini göstermektedir. Bu nedenle son olarak aşağıdaki hipotez önerilmektedir:

***H<sub>1c</sub>*** : *İnovasyon düzeyinin optimal enerji portföylerindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payı üzerindeki etkisi, her teknolojinin spesifik özelliklerine ve olgunluğuna bağlı olarak değişecektir.*

Bu son hipotez, yeniliğin ilerlemesiyle birlikte etkilerinin her enerji kaynağının teknolojik olgunluğu ve piyasa dinamiklerine göre farklılık göstereceğini öngörmektedir.

### 3. Veriler

Araştırma, 2045 yılına kadar üç farklı yenilik senaryosunda çeşitli enerji üretim teknolojilerini değerlendiren Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti (LCOE) metriklerine dayanmaktadır. Bu çalışma, teknolojik ilerlemelere temellendirilmiş olup, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından sağlanan Elektrik Üretim Teknolojileri Veri Setinden (ATB) kamuya açık verileri kullanmaktadır (NREL, 2023). Yapılan analizler, özellikle 2019 ve 2022 Excel çalışma kitaplarından elde edilen verileri içermekte olup, doğal gaz ve kömür santralleri ile ilgili detaylar 2019 çalışma kitabından alınmıştır.

NREL, ABD Enerji Bakanlığı'nın Enerji Verimliliği ve Yenilenebilir Enerji Ofisi'nin denetimi altında kurulmuş kamuya açık bir tesistir. Elektrik Üretim Teknolojileri Veri Seti (ATB), hem yenilenebilir hem de geleneksel enerji teknolojilerinin maliyetleri, verimlilikleri ve operasyonel özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler sunan önemli bir kaynaktır. Bu veri seti, ABD'deki çeşitli elektrik üretim tesislerinin ekonomik uygulanabilirliğini vurgulamakla kalmayıp, aynı zamanda yenilenebilir enerji üretim tesislerinin profilini çıkarmakta veya benzer kaynak potansiyellerine sahip coğrafi bölgeleri yansıtan vaka çalışmalarını sunmaktadır (NREL, 2023).

Bu çalışmada, ATB veri setindeki 2020 verileri temel yıl olarak kullanılmıştır. Her yenilik senaryosu için tüm LCOE metrikleri, SolverStudio programı kullanılarak optimizasyon analizi için birleştirilmiş bir Excel dosyasında derlenmiştir. LCOE verisi, her yenilik senaryosundaki farklı teknolojik ilerlemeler arasında temel maliyetlerin ve performans parametrelerinin karşılaştırılmasını sağlar; bu da gelecekteki projeksiyonları mümkün kılar. Bu metrik, elektrik sektörü modelleme veya karmaşık teknoloji karşılaştırmaları ile ilgili analizlerde temel maliyet ve performans parametrelerini tanımlamak için kritik öneme sahiptir.

LCOE, beklenen enerji üretimi üzerinden maliyetleri dağıtarak güç sistemi tasarımı ve işletiminde kritik bir kavramdır ve bu metrik varsayılan yıllık ortalama kapasite faktörüne dayanmaktadır. Belirli teknolojilerin rekabetçiliğini etkileyen çeşitli faktörleri dikkate alır; bunlar arasında başlangıç sermaye maliyetleri, kapasite faktörleri ve finansman maliyetleri bulunmaktadır. Sonuç olarak, LCOE, bir projenin finansal sürdürülebilirliğini sağlamak için elektrik fiyatının proje ömrü boyunca satılması gereken minimum ortalama

fiyatı gösterir (O'Neill, 2021). Bu bileşik metrik, temel teknoloji maliyetlerini ve performans parametrelerini kapsar (NREL, 2023):

$$LCOE = \frac{FCR \times CAPEX + FOM}{CF \times 8.760(\text{hours/yr})} + VOM + FUEL \quad (1)$$

Burada (1) nolu eşitlikte:

- **Sermaye Harcamaları (CAPEX):** Enerji şirketlerinin fiziksel varlıkları edinmek, yükseltmek veya bakımını yapmak için ayırdığı fonlardır; bu varlıklar arasında mülk, ekipman ve altyapı bulunmaktadır.
- **İşletme ve Bakım Harcamaları (OPEX):** Bir enerji santralının varlıklarının günlük işletimi ve bakımı için gerekli olan tüm maliyetleri kapsar. OPEX, faaliyet seviyelerine göre değişen Değişken İşletme ve Bakım Maliyetleri (VOM) ile çıktıya bakılmaksızın sabit kalan Sabit İşletme ve Bakım Maliyetleri (FOM) olarak ikiye ayrılır.
- **Kapasite Faktörü (CF):** Varlığın ömrü boyunca uzun vadeli bir ortalama üzerinden, gerçek yıllık çıktının tam kapasitedeki maksimum olası çıktıya oranı olarak tanımlanır.
- **Sabit Ücret Oranı (FCR):** Yatırım maliyetlerini karşılamak için müşterilerden gereken yıllık geliri temsil eder; bu, her yatırımın proje hizmet maliyetlerini finanse etmesini ve sürdürülebilirliğini sağlar.
- **Fuel:** Elektrik üretimi için ısı üretmek amacıyla yakılan malzemelerle ilgili harcamaları ifade eder.
- **8,760 saat/yıl:** Bu rakam, bir yıldaki toplam saat sayısını gösterir; 365 günü 24 saat ile çarparak hesaplanır.

Araştırma, 2045 yılına kadar projeksiyonlar doğrultusunda üç farklı yenilik senaryosu altında NREL'den elde edilen LCOE verilerini kullanarak elektrik üretim teknolojilerindeki gelecekteki maliyet trendlerini ve teknolojik ilerlemeleri analiz etmeye odaklanmaktadır. NREL, uzman analizi ve modelleme tekniklerine dayanarak aşağıdaki üç teknolojik yenilik senaryosunu belirlemiştir (NREL, 2023):

- **Konservatif Teknoloji Yenilik Senaryosu:** Bu senaryo, teknolojik yenilikte minimal değişiklikler öngörmektedir. Tarihsel yatırımlar ve devam eden endüstriyel öğrenme, piyasa iyileştirmelerine mütevazı katkılarda bulunurken, hem kamu hem de özel Ar-Ge yatırımları düşük seviyelerde kalmaya devam etmektedir.
- **Orta Düzey Teknoloji Yenilik Senaryosu:** Bu senaryo, mevcut yeniliklerin daha geniş bir şekilde benimsenmesini ve piyasa hazır teknolojilerin tanıtımını öngörmektedir. Kamu ve özel Ar-Ge yatırımlarının mevcut seviyelerde stabil kalması beklenmektedir; bu da beklenen teknolojik ilerlemeyi yansıtmaktadır.
- **İleri Düzey Teknoloji Yenilik Senaryosu:** Bu senaryo, mevcut yetenekleri aşan önemli ilerlemeleri öngörmektedir; bu da erken aşama yeniliklerin yaygın piyasa benimsenmesini teşvik etmektedir. Önemli teknolojik atılımları desteklemek amacıyla maksimum düzeyde kamu ve özel Ar-Ge yatırımlarını içermektedir.

Bu yapılandırılmış senaryolar, farklı yenilik ve yatırım seviyelerinin önümüzdeki yirmi yıl içinde elektrik üretim teknolojilerinin ekonomik uygulanabilirliği ve dağılımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için çalışmaya bir çerçeve sunmaktadır.

#### 4. Metodoloji

Çalışmanın önerdiği model, elektrik üretim portföyleriyle ilişkili risk ve maliyetleri minimize etmek amacıyla tasarlanmış kısıtlı bir optimizasyon çerçevesi kullanmaktadır; bu çerçeve, toplam maliyetlerin önceden belirlenmiş bir değere uyum sağlamasını da dikkate almaktadır. Bu modelin temel amacı, belirli bir portföy maliyet seviyesinde riski minimize etmektir ve bu amaç, çalışmada, Harry Markowitz tarafından 1952'de tanıtılan Modern Portföy Teorisi'nden (MPT) Ortalama - Varyans Yaklaşımını kullanarak gerçekleştirilmektedir (Markowitz, 1952). MPT, verileri analiz etmede yardımcı olan matematiksel bir çerçeve sunarken, belirli bir risk seviyesinde beklenen getirileri maksimize etmek veya maliyetleri minimize etmek amacıyla yatırım portföyleri oluşturmak için sistematik bir yöntem sağlamaktadır (Stempien & Chan, 2017). Bu çerçeve, yatırımcıların risk ve getiriler arasında optimal bir denge sağlamalarına yardımcı olurken düşük maliyetli çözümlere odaklanmaktadır.

Çalışmada "Ortalama - Varyans" yaklaşımını kullanmanın gerekçesi, portföy seçimi ile ilgili yerleşik yatırım davranışlarını yansıtmaya yeteneğidir (deLlano-Paz et al., 2018; Markowitz, 1952). Bu metodoloji, elektrik

portföyleri bağlamında yaygın olarak uygulanmıştır. Örneğin, Suksonghong ve arkadaşları (2014), üretim şirketlerinin karşılaştığı portföy optimizasyonu zorluklarını ele almak için çeşitli genetik algoritmaların kullanımını araştırmışlardır. Araştırmaları, bu sorunları çözmeye farklı genetik algoritmaların etkinliğini analiz etmiştir. Benzer şekilde, Kazagic ve arkadaşları (2014), yenilenebilir enerji genişlemesi ve karbon salınımının azaltılması ile ilgili belirli hedefleri karşılamak için optimal elektrik jeneratörlerini tanımlamayı amaçlamışlardır. Algarvio ve arkadaşları (2017), son kullanıcı tüketicileri için portföyleri optimize etmek amacıyla Markowitz'in teorisine dayalı bir model geliştirmişlerdir. Ayrıca, deLlano-Paz ve arkadaşları (2018), farklı teknolojiler arasında tüm üretim maliyetlerini kapsayan modelleri savunmuşlardır.

Bu çalışmada, MPT'yi optimizasyon sürecine uyarlayarak çeşitli elektrik üretim yöntemleriyle ilişkili maliyetler ile gelecekteki risk profilleri arasındaki ilişkinin optimize edilmesi amaçlanmıştır; bu da NREL raporlarından elde edilen içgörülere dayanmaktadır. Bu süreç, optimal çözümleri temsil eden çoklu noktaları içeren etkin bir sınır oluşturmaktadır. Optimizasyon, enerji planlama zorluklarını tanımlayan çeşitli kısıtlar altında ya portföy maliyetlerini ya da risk değerlerini minimize etmeyi hedefler. Bu süreçten elde edilen optimal çözüm seti, enerji planlama bağlamlarında genellikle uygun bir setin alt segmentinde ortaya çıkan etkin bir sınırı tanımlar. Bu durum, araştırmada uygulanan modelde "getiriler" yerine "maliyetler" üzerine vurgu yapması nedeniyle ortaya çıkmakta ve burada standart sapma "risk" ölçüsü olarak kullanılmaktadır (deLlano-Paz et al., 2018).

Daha fazla açıklık sağlamak gerekirse, araştırmada uygulanan modelde "risk", özellikle beklenen portföy riski, farklı elektrik üretim teknolojileriyle ilişkili maliyetler (LCOE) tarafından belirlenmektedir; bu da bu maliyetler arasındaki korelasyon katsayılarından elde edilen standart sapmalar kullanılarak hesaplanmaktadır. Çalışma, üç farklı yenilik seviyesinde çeşitli elektrik üretim teknolojilerine ait LCOE verilerini içermekte ve buna göre hedef fonksiyonlar formüle edilmektedir. Ayrıca, LCOE seviyelerini yansıtan 30 ve 40 bütçe kısıtları optimizasyon modeline entegre edilmiştir; bu kısıtlar altında optimal portföylerin riskleri değerlendirilmiştir. Bu metodoloji, etkin sınır eğrilerini oluşturmayı kolaylaştırmaktadır.

Sonuç olarak, araştırmada uygulanan modeldeki her portföy grubu toplamda NREL'in ATB Excel çalışma kitaplarında belirtilen farklı özelliklere sahip toplamda 102 geleneksel ve yenilenebilir enerji üretim alt teknolojilerini içermektedir (NREL, 2023):

**Tablo 1. Geleneksel ve Yenilenebilir Enerji Üretimi Alt Teknoloji Dağılımı**

Yenilenebilir Alt Teknoloji Grupları	Geleneksel Alt Teknoloji Grupları
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kara Tabanlı Rüzgâr Enerjisi Santralleri (10 alt teknoloji)</li> <li>• Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi Santralleri (14 alt teknoloji)</li> <li>• Büyük Ölçekli Fotovoltaik (PV) Güç Santralleri (10 alt teknoloji)</li> <li>• Ticari Ölçekli Fotovoltaik (PV) Güç Santralleri (10 alt teknoloji)</li> <li>• Mesken Ölçekli Fotovoltaik (PV) Güç Santralleri (10 alt teknoloji)</li> <li>• Konsantre Güneş Enerjisi (CSP) Santralleri (3 alt teknoloji)</li> <li>• Jeotermal Güç Santralleri (6 alt teknoloji)</li> <li>• Hidroelektrik Güç Santralleri (12 alt teknoloji)</li> <li>• Büyük Ölçekli PV Artı Depolama Sistemleri (10 alt teknoloji)</li> <li>• Biokütle Enerji Santralleri (1 alt teknoloji)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Doğal Gaz Güç Santralleri (6 alt teknoloji)</li> <li>• Kömür Güç Santralleri (8 alt teknoloji)</li> <li>• Nükleer Güç Santralleri (2 alt teknoloji)</li> </ul>

Bu tablo, çeşitli yenilenebilir ve geleneksel enerji üretim teknolojilerini kendi alt gruplarına ayırarak, her kategori içindeki belirli alt teknoloji sayısını göstermektedir. Bu bağlamda, beklenen portföy maliyeti ve riski

ile kısıtları içeren hedef fonksiyonu da dahil olmak üzere araştırmada uygulanan matematiksel model aşağıda sunulmuştur:

*Beklenen portföy maliyeti:*

$$E(C_p) = \sum_t x_t E(LCOE_{t_i}) \quad (2)$$

Burada (2) nolu eşitlikte;

- $E(\cdot)$ , bir değişkenin beklenen değerinin hesaplanmasını gösterir.
- $C_p$ , portföyün maliyetidir.
- $x_t$ , genel portföyde teknoloji "t"nin payını temsil eder.
- $LCOE_{t_i}$ , "t" teknolojisi için "i" inovasyon düzeyinde maliyet seviyesi

*Beklenen portföy riski:*

$$\sigma_p = \left\{ \sum_{t=1}^{102} x_t^2 \sigma_t^2 + \sum_{t_1=1, t_2=1}^{102} \sum_{t_1 \neq t_2}^{102} (\sum_{\forall C_1} \sum_{\forall C_2} \sigma_{c_1 t_1} \sigma_{c_2 t_2} \rho_{c_1 t_1, c_2 t_2}) x_{t_1} x_{t_2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Burada (3) nolu eşitlikte;

- $\sigma_p$ , portföy riskini (standart sapma) temsil eder.
- $x_t$ , genel portföyde teknoloji t'nin payını ifade eder.
- $\sigma_t^2$ , teknoloji t'nin maliyetinin (LCOE) varyansıdır.
- $\sigma_{c_1 t_1}$ , teknoloji  $t_1$ 'in maliyetinin ( $c_1=LCOE_{t_1}$ ) standart sapmasıdır.
- $\rho_{c_1 t_1, c_2 t_2}$ , teknoloji  $t_1$ 'in maliyeti ( $c_1=LCOE_{t_1}$ ) ile teknoloji  $t_2$ 'nin maliyeti ( $c_2=LCOE_{t_2}$ ) arasındaki korelasyon katsayısını temsil eder.

*Risk minimizasyonu amaç fonksiyonu:*

$$\text{Min} \{ \sigma_p \} = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{102} x_t^2 \sigma_t^2 + \sum_{t_1=1, t_2=1}^{102} \sum_{t_1 \neq t_2}^{102} (\sum_{\forall C_1} \sum_{\forall C_2} \sigma_{c_1 t_1} \sigma_{c_2 t_2} \rho_{c_1 t_1, c_2 t_2}) x_{t_1} x_{t_2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\text{Min} \{ \sigma_p \} = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{102} x_t^2 (\sigma_{LCOE_{t_i}}^2) + \sum_{t_1=1, t_2=1}^{102} \sum_{t_1 \neq t_2}^{102} (\sigma_{LCOE_{t_1}} \sigma_{LCOE_{t_2}} \rho_{LCOE_{t_1}, LCOE_{t_2}} x_{t_1} x_{t_2}) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

*Maliyet minimizasyonu amaç fonksiyonu:*

$$\text{Min} \{ E(C_p) \} = \text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^{102} x_t E(LCOE_{t_i}) \right\} \quad (6)$$

*Kısıtlar:*

$$E(C_p) = \sum_t x_t E(LCOE_{t_i}) = C_{\text{portfolio budget}} \quad (7)$$

$$\sum_t x_t = 1$$

$$\forall t, x_t \geq 0$$

Bu matematiksel formülasyon, enerji üretim portföyünü optimize ederken, belirli kısıtlamalar dahilinde hem riskin hem de maliyetlerin nasıl en aza indirileceğini özetlemektedir.

## 5. Bulgular

Aşağıdaki Tablo 2, araştırma bulgularına dayanarak analiz edilen optimal portföyler içindeki enerji üretim teknolojilerinin yüzdesel dağılımını göstermektedir. Araştırmada her senaryoyu kapsamlı bir şekilde yorumlamak için dört farklı maliyet - risk temelli portföy kullanılmıştır. LR tanımı, en düşük risk seviyesine karşılık gelen optimal portföy ağırlıklarını belirtirken, LC en düşük maliyet seviyesindeki ağırlıkları ifade etmektedir. Ayrıca, iki dengeleme portföyü kullanılmıştır: C40, 40 birimlik bütçe kısıtı altında optimal portföy ağırlıklarını temsil ederken, C30, 30 birimlik bütçe kısıtı altındaki ağırlıkları yansıtmaktadır. Şekil 1, 2 ve 3'te



gösterildiği gibi, C30 ve C40 portföyleri, riskler ve getiriler (düşük maliyet) açısından daha dengeli bir yaklaşım sergilemektedir.

Araştırmanın önemli bir bulgusu, gelecekteki orta ve ileri senaryolar altında kömür ve doğalgaz santrali teknolojilerinin payının azalmasının öngörülmesidir; biokütle giderek bu teknolojilerin yerini almaktadır. Orta senaryoda, yenilenebilir enerji, 2035 ve 2045 yıllarında en düşük risk seçeneği altında çeşitlendirilmiş optimal enerji portföylerine yol açabilir. 2045 yılına gelindiğinde, bu risk seviyesinde kömürün payının önemli ölçüde azalması beklenirken, maliyetleri minimize etmek kömürün portföyden tamamen çıkmasına neden olmaktadır. Biokütle en düşük risk seçeneği altında önemli bir paya sahipken, maliyet faktörleri dikkate alındığında optimal portföylerdeki varlığı sifıra düşmektedir.

İleri senaryoda, özellikle en düşük risk seçeneğinde, 2045 yılına kadar yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak çeşitlendirilmiş optimal portföyler geliştirmek mümkündür. Ancak hem 2035 hem de 2045 yıllarında, 30 ve 40 birimlik daha düşük maliyet seviyelerinde doğalgaz ve hidroelektrik paylarında bir artış olacaktır. Bulgular ışığında önümüzdeki yirmi yıl boyunca karasal rüzgâr enerjisi ile ilişkili maliyetlerin ve risklerin azalması beklenilebilir; bu da optimal enerji portföylerindeki temsilini artıracaktır.

Araştırmanın en dikkat çekici sonucu, kömür, doğalgaz ve biokütle teknolojileri ile ilgili en düşük risk seviyelerine sahip optimal portföylerin dönüşümüdür. Yüksek yenilik seviyeleri ile karakterize edilen bölgelerde, bu düşük riskli optimal portföylerde kömür ve doğalgaz teknolojilerine dayanan elektrik üretiminin yüzde dağılımı zamanla kademeli olarak azalmaktadır; bu da biokütleyle dayalı elektrik üretiminde bir artışa zemin hazırlamaktadır. Biokütle teknolojileri yükselen inovasyon seviyesiyle birlikte bu düşük riskli portföylerde ivme kazandıkça, yüzdesel dağılımı da zamanla artmaktadır. Bu trend yenilik seviyelerine bağlı olarak evrilmeye devam etmektedir; biokütlenin payı minimal risk seviyelerine sahip optimal portföylerde artarken, kömür ve doğalgazın payları buna karşılık olarak azalmaktadır. Böylece birinci ve üçüncü hipotez bu sonuçlarla desteklenmektedir.

Buna karşın, Konservatif senaryo altında zamanla düşük risk seviyelerinde yüksek oranda yenilenebilir enerji içeren optimal portföylere ulaşmak mümkündür. Maliyetlerin düşmesiyle birlikte karasal rüzgâr enerjisinin payının artması beklenmektedir. Önemli bir nokta olarak, bu Konservatif senaryo içinde en düşük risk seçeneğinde kömür kullanımının zamanla arttığı görülürken, doğalgazın payının azaldığı gözlemlenmektedir.

**Tablo 2. Farklı İnovasyon Senaryoları Altında Optimum Enerji Üretim Portföylerinde Geleneksel ve Yenilenebilir Enerji Üretim Teknolojilerinin Yüzdesel Dağılımı**

**Orta Düzey Senaryo\***

<i>Teknoloji</i>	<i>2035</i>				<i>2045</i>			
	<i>LR</i>	<i>C40</i>	<i>C30</i>	<i>LC</i>	<i>LR</i>	<i>C40</i>	<i>C30</i>	<i>LC</i>
<i>Konsantre Güneş Enerjisi (CSP)</i>	-	-	-	-	-	0,22	-	-
<i>Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi</i>	-	-	-	-	-	0,75	-	-
<i>Büyük Ölçekli Fotovoltaik (PV)</i>	0,87	0,74	41,71	0,74	0,69	6,45	39,43	100
<i>Kara Tabanlı Rüzgâr Enerjisi</i>	0,06	13	3,26	98,78	0,02	12,55	11,56	-
<i>Ticari Ölçekli Fotovoltaik (PV)</i>	0,76	0,26	-	0,27	0,52	-	-	-
<i>Mesken Ölçekli Fotovoltaik (PV)</i>	0,72	0,03	-	0,03	0,43	0,41	0,02	-
<i>Jeotermal</i>	0,57	-	-	-	0,35	0,58	-	-
<i>Biyoenerji</i>	24,64	-	-	-	22,63	0,29	-	-
<i>Hidroelektrik</i>	3,03	32,06	17,42	0,05	2,04	32,28	19,33	-

<b>Büyük Ölçekli PV Artı Depolama</b>	0,17	6,91	-	0,13	-	12,92	0,04	-
<b>Kömür</b>	49,13	-	-	-	50,8	1,68	-	-
<b>Doğal Gaz</b>	8,71	47	37,61	-	9,4	31,63	29,62	-
<b>Nükleer</b>	11,34	-	-	-	13,12	0,24	-	-
<b>Toplam</b>	100	100	100	100	100	100	100	100

**İleri Düzey Senaryo\***

<b>Teknoloji</b>	<b>2035</b>				<b>2045</b>			
	<b>LR</b>	<b>C40</b>	<b>C30</b>	<b>LC</b>	<b>LR</b>	<b>C40</b>	<b>C30</b>	<b>LC</b>
<b>Konsantre Güneş Enerjisi (CSP)</b>	0,07	-	-	-	-	-	-	-
<b>Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi</b>	-	-	0,05	-	-	0,02	-	-
<b>Büyük Ölçekli Fotovoltaik (PV)</b>	0,48	2,47	48,24	-	1,67	0,28	6,52	-
<b>Kara Tabanlı Rüzgâr Enerjisi</b>	0,06	8,98	8,89	100	0,36	9,46	13,6	100
<b>Ticari Ölçekli Fotovoltaik (PV)</b>	0,18	-	-	-	0,01	0,08	0,01	-
<b>Mesken Ölçekli Fotovoltaik (PV)</b>	0,21	-	-	-	-	0,08	-	-
<b>Jeotermal</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Biyoenjerji</b>	30,57	-	-	-	66,43	-	-	-
<b>Hidroelektrik</b>	2,83	48,63	19,56	-	2,84	47,26	14,72	-
<b>Büyük Ölçekli PV Artı Depolama</b>	-	8,45	8,02	-	-	9,82	8,92	-
<b>Kömür</b>	43,53	-	0,03	-	23	-	-	-
<b>Doğal Gaz</b>	8,04	31,47	15,19	-	2,15	33	56,23	-
<b>Nükleer</b>	14,03	-	0,02	-	3,54	-	-	-
<b>Toplam</b>	100	100	100	100	100	100	100	100

**Konservatif Düzey Senaryo\***

<b>Teknoloji</b>	<b>2035</b>				<b>2045</b>			
	<b>LR</b>	<b>C40</b>	<b>C30</b>	<b>LC</b>	<b>LR</b>	<b>C40</b>	<b>C30</b>	<b>LC</b>
<b>Konsantre Güneş Enerjisi (CSP)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Deniz Üstü Rüzgâr Enerjisi</b>	-	-	-	-	-	-	-	-

<b>Büyük Ölçekli Fotovoltaik (PV)</b>	0,73	8,19	50,6	-	0,76	11,25	48,17	-
<b>Kara Tabanlı Rüzgâr Enerjisi</b>	6,04	22,42	28,68	100	7,01	27,63	23,52	100
<b>Ticari Ölçekli Fotovoltaik (PV)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Mesken Ölçekli Fotovoltaik (PV)</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Jeotermal</b>	10,94	-	-	-	11,33	-	-	-
<b>Biyoenjerji</b>	6,75	-	-	-	6,61	-	-	-
<b>Hidroelektrik</b>	0,17	46,34	20,72	-	0,12	49,42	28,31	-
<b>Büyük Ölçekli PV Artı Depolama</b>	0,97	-	-	-	2,1	2,12	-	-
<b>Kömür</b>	51,44	-	-	-	51,98	-	-	-
<b>Doğal Gaz</b>	14,04	23,05	-	-	10,96	9,58	-	-
<b>Nükleer</b>	8,92	-	-	-	9,13	-	-	-
<b>Toplam</b>	100	100	100	100	100	100	100	100

- \*LR, Senaryolardaki en düşük risk seviyesine sahip optimum portföy ağırlıklarını temsil eder.  
 \*LC, Senaryolardaki en düşük maliyet seviyesine sahip optimum portföy ağırlıklarını temsil eder.  
 \*C40, Senaryolardaki 40 birim maliyet (bütçe) kısıtlamasıyla optimum portföy ağırlıklarını temsil eder.  
 \*C30, Senaryolardaki 30 birim maliyet (bütçe) kısıtlamasıyla optimum portföy ağırlıklarını temsil eder.

**Tablo 3. Farklı İnovasyon Senaryoları Altında Enerji Üretim Portföylerinin Maliyet ve Risk (Standart Sapma) Tablosu**

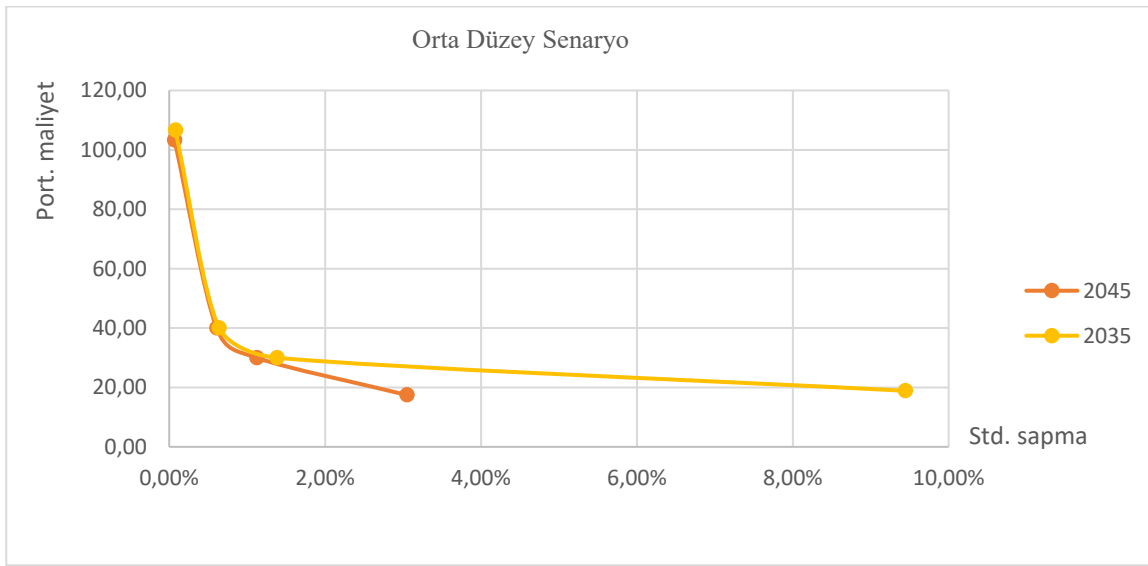
<b>Orta Düzey Senaryo 2035</b>			<b>Orta Düzey Senaryo 2045</b>		
Portföy Maliyeti	Std. Sapma	R/C	Portföy Maliyeti	Std. Sapma	R/C
106,65	0,08%	0,000008	103,32	0,07%	0,000007
40	0,64%	0,000160	40	0,61%	0,000153
30	1,38%	0,000460	30	1,12%	0,000373
18,88	9,44%	0,005000	17,46	3,05%	0,001747
<b>İleri Düzey Senaryo 2035</b>			<b>İleri Düzey Senaryo 2045</b>		
Portföy Maliyeti	Std. Sapma	R/C	Portföy Maliyeti	Std. Sapma	R/C
105,98	0,08%	0,000008	117,1	0,06%	0,000005
40	0,53%	0,000133	40	0,44%	0,000110
30	1,84%	0,000613	30	0,94%	0,000313
15,62	11,73%	0,007510	14,31	9,09%	0,006352
<b>Konservatif Düzey Senaryo 2035</b>			<b>Konservatif Düzey Senaryo 2045</b>		
Portföy Maliyeti	Std. Sapma	R/C	Portföy Maliyeti	Std. Sapma	R/C
110,4	0,13%	0,000012	110,84	0,11%	0,000010
40	0,91%	0,000228	40	0,85%	0,000213
30	2,57%	0,000857	30	1,92%	0,000640
20,7	8,70%	0,004203	20,72	6,83%	0,003296

Not: R/C, Standart Sapmanın (Portföy Riski) Portföy Maliyetine bölünmesiyle hesaplanır.

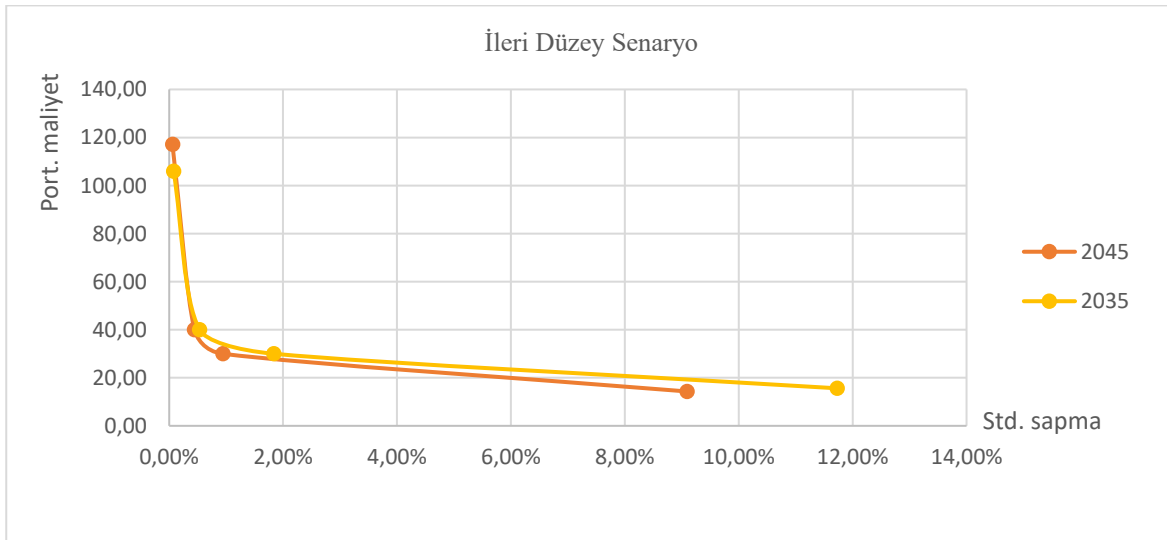
Yukarıda yer alan Tablo 3, belirli yıllar için gerçekleşen araştırma sonuçlarına dayanarak hem geleneksel hem de yenilenebilir enerji teknolojilerini içeren enerji üretim portföylerinin maliyet ve risk analizini sunmaktadır. Tablo, farklı yenilik senaryoları ve yıllar boyunca çeşitli portföylerin maliyet-risk (standart sapma) seviyelerini özetlemektedir. Ayrıca, her portföy seviyesi için hesaplanan risk-maliyet oranlarını da içermektedir. Risk - maliyet oranları (R/C), portföy riskinin maliyetine bölünmesiyle elde edilmekte olup, birim maliyet başına risk ölçüsü sağlamaktadır. Dikkate değer bir şekilde, bu oran optimal portföyler için tüm yenilik senaryolarında yıllar içinde azalan bir eğilim göstermektedir. Yenilik seviyeleri arttıkça, R/C oranı da optimal enerji portföyleri için düşmekte ve bu durum, maliyet başına daha iyi bir risk azaltımı sağlandığını göstermektedir.

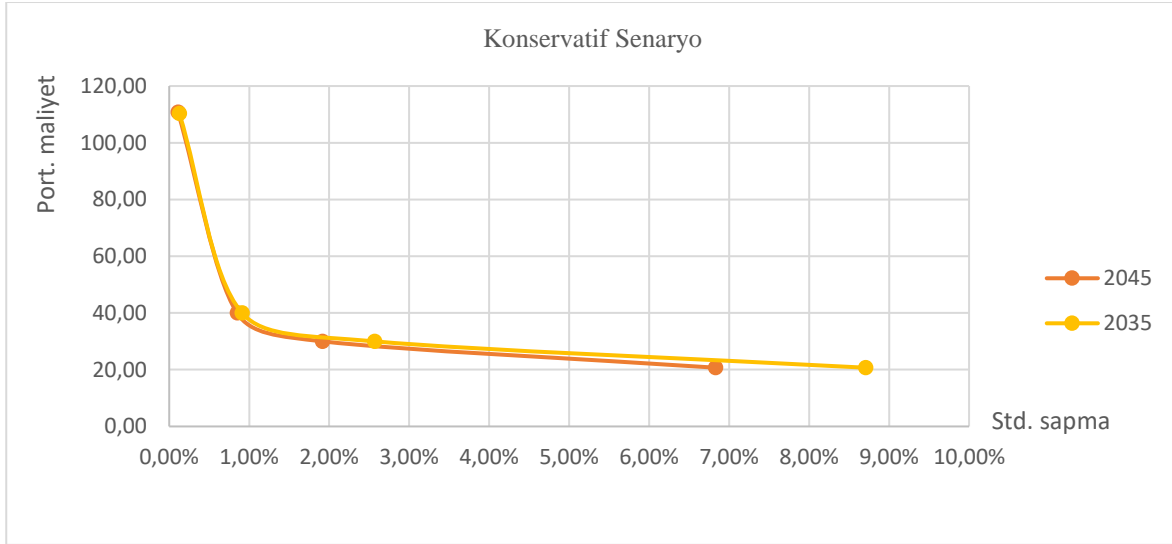
Yatırım veya portföy yönetiminde daha düşük bir risk-maliyet oranına ulaşmak, etkili ve verimli bir risk yönetimini ifade eder ve potansiyel olarak artırılmış genel risk ayarlı getiriler (düşük maliyet) sağlayabilir. Zamanla gözlemlenen R/C oranındaki azalma, önceki bulguları pekiştirmekte ve gelecekte daha etkili portföylerin geliştirilmesinin mümkün olabileceğini önermektedir; bu durum yenilik seviyelerine bağlıdır. Bu eğilim, üstlenilen riskler ile bu riskleri yönetmek için tahsis edilen kaynaklar arasında daha iyi bir uyum sağlamakta ve böylece ikinci hipotezi de desteklemektedir.

**Şekil 1. Orta Düzey İnovasyon Senaryosundaki Portföylerin Yıllara Göre Etkin Sınır Grafikleri**



**Şekil 2. İleri Düzey İnovasyon Senaryosundaki Portföylerin Yıllara Göre Etkin Sınır Grafikleri**



**Şekil 3. Konservatif Düzey İnovasyon Senaryosundaki Portföylerin Yıllara Göre Etkin Sınır Grafikleri**

Ayrıca, yukarıda yer alan Şekil 1, 2 ve 3, analiz yıllarında üç farklı yenilik senaryosu için optimal portföylerin etkin sınır grafiklerini göstermektedir. Bu grafikler, her senaryonun zamanla iyileşmiş bir risk-maliyet ilişkisi sağladığını ve 2045 yılında optimal performans sergilendiğini ortaya koymaktadır. Bu çerçevede gerek tablolar gerekse de grafikler, eğer amaç portföy maliyetlerini minimize etmekse, artan yenilik seviyelerinin Modern Portföy Teorisi'nin ortalama-varyans yaklaşımı aracılığıyla elde edilen optimal portföylerde önemli maliyet düşüşlerine yol açtığını göstermektedir. Bu maliyet azaltma potansiyeli, enerji üretim teknolojileri ve portföy yönetimi açısından umut verici bir bakış açısını temsil etmektedir.

## 6. Sonuç ve Öneriler

Çalışmada, enerji dönüşümünün optimal enerji üretim portföylerinin maliyet ve risk profilleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için Modern Portföy Teorisi'nin Ortalama-Varyans Yaklaşımı uygulanarak bunun için NREL'den elde edilen ATB verileri kullanılmıştır. Öncelikle, bu inovasyon senaryolarıyla ilişkili en düşük risk ve maliyetleri temsil eden etkin sınır eğrileri oluşturulmuştur. Ardından, önümüzdeki yirmi yıl için projeksiyonları yapılan optimal portföylerde geleneksel ve yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin yüzdesel dağılımı sunulmuştur. Bu kapsamda, temiz enerji dönüşümünün ortaya çıkan optimal portföyler üzerindeki hem risk hem de maliyet açısından sonuçları incelenmiştir.

Araştırmanın sonuçları, kömür ve doğalgaz santrallerinin payının orta ve ileri senaryolar altında azalacağını ve yerini biokütle santrallerinin alacağını öngörmektedir. Özellikle orta senaryoda, düşük risk seviyeleriyle karakterize edilen optimal portföylerde bu eğilim belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir. Michalak ve Wolniak (2023) tarafından yapılan çalışmalar, yenilikçi ekonomilerin kömüre olan bağımlılığı azaltma çabalarını önceliklendirdiğini göstermektedir. Bu bağlamda, 2045 yılına kadar mevcut teknolojik eğilimler doğrultusunda "Orta Senaryo" altında biokütle teknolojilerine olan tercihin artacağı hipotezi desteklenmektedir.

Bir diğer önemli bulgu ise "Orta Senaryo" ve "İleri Senaryo" altında en düşük risk seviyelerinde optimal portföylerde yenilenebilir enerji üretim teknolojilerinin payında gözlemlenen önemli artıştır. Bu gözlem, Sharma et al. (2021), Solarin et al. (2022), Lin ve Zhu (2019), Alam ve Murad (2020) ve Assi et al. (2021) tarafından gerçekleştirilen araştırmalarla desteklenmektedir. Kömürden biokütle enerji teknolojilerine geçiş zamanla devam etmekte olup, rüzgâr enerjisi düşük maliyetli portföylerde öne çıkmakta ve güneş enerjisi belirli senaryolarda önem kazanmaktadır.

Ayrıca çalışmanın analizleri, yenilik kapsamının bu değişimleri önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır. "İleri Senaryo" gibi yüksek inovasyon seviyelerine sahip senaryolar, biokütle teknolojilerinin 2045 yılına kadar optimal portföylerde daha belirgin hale geleceğini göstermektedir; bu da yeniliğin enerji kaynakları tercihleri üzerindeki dönüştürücü etkisini vurgulamaktadır. Bu içgörüler doğrultusunda, bu çalışma belirli yenilenebilir enerji kaynaklarına, özellikle biokütle teknolojilerine yönelik yatırımların artırılmasını savunmakta ve kömür ile doğalgaz yerine sürdürülebilir, düşük riskli enerji kaynaklarını teşvik eden politikaları desteklemektedir.

Çalışmanın analizleri ayrıca farklı yenilik senaryolarının 2045 yılına kadar optimal elektrik üretim portföylerinin maliyet ve risk profilleri üzerinde farklı etkileri olacağını göstermektedir. Özellikle artan yenilik

seviyeleri bu portföylerde risk seviyelerinin azalmasıyla bağlantılıdır; ancak bu durum maliyetlerdeki artışlarla birlikte gelmektedir. Bu durum, daha temiz enerji çözümlerini takip ederken yüksek maliyetler ile azaltılmış riskler arasında temel bir dengeyi vurgulamakta; böylece enerji portföylerindeki risk yönetimi stratejilerinin etkinliğini artırmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma, inovasyon düzeyinin temiz enerji geçişlerini kolaylaştırmadaki stratejik rolünü vurgulamakta ve iklim değişikliği ile küresel jeopolitik güvenlik sorunlarıyla ilgili çevresel zorlukları ele alma potansiyeliyle birlikte enerji sektöründe inovasyonu teşvik etmenin, sürdürülebilir portföylere ulaşmak ve herkes için daha temiz bir gelecek sağlamak açısından stratejik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu kapsamda araştırma sonuçları, bir ekonominin enerji sektöründeki yenilik seviyelerinin artmasıyla yenilenebilir enerji teknolojilerinin entegrasyonunun arttığına dair bir ilişkiyi ortaya koymakta; bu da inovasyon düzeyinin sürdürülebilir enerji çözümlerini yönlendirme potansiyelini göstermektedir. Ayrıca çalışma, enerji politikalarının şekillendirilmesinde yenilenebilir enerji teknolojilerine öncelik vermenin kritik önemini vurgulamaktadır. Kömür gibi yüksek karbon salınımına neden olan kaynaklara olan bağımlılığın azaltılmasını ve yenilenebilir alternatiflerin tercih edilmesini önermektedir. İnovasyona öncelik vererek politika yapıcılar bu geçişi stratejik teşvikler, işbirliği ve iş modeli geliştirmeleri aracılığıyla hızlandırabilirler. Ancak bu dönüşümle ilişkili maliyetlerin ve risklerin dikkatlice yönetilmesi de kritik önem taşımaktadır.

Araştırma bulgularına dayanarak, Türkiye'nin enerji politikası, yenilenebilir enerji yatırımlarının artırılması ve güneş ile rüzgâr enerjisi santrallerinin kurulu gücünün genişletilmesi üzerine odaklanmalıdır; bu, mevcut hedeflerin revize edilmesi ve düzenli olarak yenilenebilir enerji kaynak alanları ihalelerinde yeterli kapasite tahsis edilmesi ile gerçekleştirilebilir. Hibrit sistemlerin yaygınlaştırılması teşvik edilmeli ve bu kapsamda çeşitli yenilenebilir enerji üretim sistemlerinin entegrasyonu sağlanmalıdır. Biokütle enerjisi potansiyelinin artırılması için mevcut biokütle santrallerinin kapasitesinin genişletilmesi ve yeni biokütle enerji santrallerinin kurulması teşvik edilmelidir. Bu alanda atıkların enerjiye dönüştürülmesi sürecinde halkın bilinçlendirilmesi amacıyla kamuoyunu bilgilendirme kampanyaları düzenlenmeli ve atık ayrıştırma konusunda eğitimler verilmelidir. Enerji iletim altyapısının güçlendirilmesi için gerekli yatırımlar yapılmalı ve batarya ile enerji depolama kapasitesinin artırılması yönündeki adımlara daha fazla teşvik sağlanmalıdır. Ayrıca, uluslararası düzeyde stratejik işbirlikleri geliştirilerek inovasyona dayalı bilgi ve teknoloji transferi sağlanmalı, enerji üretiminde yeni teknolojilerin geliştirilmesine yönelik AR - GE faaliyetleri ve inovasyonel yaklaşımlar daha fazla desteklenerek Türkiye'nin yenilenebilir enerji alanındaki rekabet gücü artırılmalıdır. Bu düzenlemeler, Türkiye'nin mevcut enerji politikalarını güçlendirerek sürdürülebilir bir enerji geleceği inşa etmesine katkıda bulunacaktır.

Diğer taraftan ekonomik değerlendirmelerin ötesinde, karbon dioksit emisyonlarını azaltmayı hedefleyen çevresel zorunluluklar doğrultusunda daha temiz enerji geçişlerine global düzeyde de acil bir ihtiyaç bulunmaktadır. Son dönemdeki jeopolitik olaylar ve bölgesel çatışmalar, fosil yakıt bağımlılığıyla ilgili zayıflıkları ortaya koymuş ve yenilenebilir kaynaklara daha fazla bağımlılığı teşvik eden enerji politikalarının global düzeyde yeniden değerlendirilmesine yol açmıştır. Bu çerçevede bu çalışmada kurgulanan optimizasyon modeli esas olarak maliyetlerden kaynaklanan ölçülebilir risklere odaklanmakta ancak aynı zamanda sürekli inovasyonlar aracılığıyla optimal enerji portföylerinde daha fazla risk azaltma yollarını da vurgulamaktadır.

Gelecek araştırmalar gelişen global ölçekli enerji dönüşümü manzarasının daha kapsamlı bir değerlendirmesini sağlamak adına kaynak mevcudiyeti ve altyapı kapasitesi gibi pratik kısıtlamalarla birlikte maliyet bazlı riskler yanında daha geniş jeopolitik riskleri de ele almalı ve böylece bu kritik konuyu daha iyi anlamamıza katkıda bulunmalıdır.

## Referanslar

- Alam, M. M., & Murad, M. W. (2020). The impacts of economic growth, trade openness and technological progress on renewable energy use in organization for economic co-operation and development countries. *Renewable Energy*, 145, 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.054>
- Algarvio, H., Lopes, F., Sousa, J., & Lagarto, J. (2017). Multi-agent electricity markets: Retailer portfolio optimization using Markowitz theory. *Electric Power Systems Research*, 148, 282-294.
- Alvarez-Herranz, A., Balsalobre-Lorente, D., Shahbaz, M., & Cantos, J. M. (2017). Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels [Article]. *Energy Policy*, 105, 386-397. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.009>
- Arnesano, M., Carlucci, A. P., & Laforgia, D. (2012). Extension of portfolio theory application to energy planning problem–The Italian case. *Energy*, 39(1), 112-124.

- Assi, A. F., Zhakanova Isiksal, A., & Tursoy, T. (2021). Renewable energy consumption, financial development, environmental pollution, and innovations in the ASEAN + 3 group: Evidence from (P-ARDL) model. *Renewable Energy*, 165, 689-700. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.052>
- Chen, Y., & Lee, C.-C. (2020). Does technological innovation reduce CO2 emissions? Cross-country evidence. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121550. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121550>
- deLlano-Paz, F., Calvo-Silvosa, A., Antelo, S. I., & Soares, I. (2018). Power generation and pollutant emissions in the European Union: A mean-variance model. *Journal of Cleaner Production*, 181, 123-135. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.108>
- Elia, A., Kamidelivand, M., Rogan, F., & Ó Gallachóir, B. (2021). Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110488. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110488>
- EY. (2023). Ernst & Young. Retrieved 4/12/2023 from [https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en\\_gl/topics/power-and-utilities/ey-recai-61-report.pdf](https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/en_gl/topics/power-and-utilities/ey-recai-61-report.pdf)
- Fernández, Y. F., López, M. F., & Blanco, B. O. (2018). Innovation for sustainability: the impact of R&D spending on CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3459-3467.
- Foster, R., & Kaplan, S. (2011). *Creative Destruction: Why companies that are built to last underperform the market--And how to success fully transform them*. Crown Currency.
- Ganda, F. (2019). The impact of innovation and technology investments on carbon emissions in selected organisation for economic Co-operation and development countries. *Journal of Cleaner Production*, 217, 469-483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.235>
- Godin, B. (2015). *Innovation contested: The idea of innovation over the centuries*. Routledge.
- Godin, B., & Schubert, C. (2021). Research on the history of innovation: from the spiritual to the social. In *A research agenda for social innovation* (pp. 21-38). Edward Elgar Publishing.
- Gupta, A. (2016). Climate change and Kyoto protocol: An overview. *Handbook of environmental and sustainable finance*, 3-23.
- Haldar, A., Sucharita, S., Dash, D. P., Sethi, N., & Chandra Padhan, P. (2023). The effects of ICT, electricity consumption, innovation and renewable power generation on economic growth: An income level analysis for the emerging economies. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135607>
- Howitt, P., & Aghion, P. (1998). Capital Accumulation and Innovation as Complementary Factors in Long-Run Growth. *Journal of Economic Growth*, 3(2), 111-130. <https://doi.org/10.1023/A:1009769717601>
- Huenteler, J., Schmidt, T. S., Ossenbrink, J., & Hoffmann, V. H. (2016). Technology life-cycles in the energy sector — Technological characteristics and the role of deployment for innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 104, 102-121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.09.022>
- Kazagic, A., Merzic, A., Redzic, E., & Music, M. (2014). Power utility generation portfolio optimization as function of specific RES and decarbonisation targets – EPBiH case study. *Applied Energy*, 135, 694-703. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.001>
- Lin, B., Omoju, O. E., & Okonkwo, J. U. (2016). Factors influencing renewable electricity consumption in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 687-696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.003>
- Lin, B., & Zhu, J. (2019). The role of renewable energy technological innovation on climate change: Empirical evidence from China. *Science of The Total Environment*, 659, 1505-1512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.449>
- Madlener, R., Glensk, B., & Raymond, P. (2009). Applying Mean-Variance Portfolio Analysis to E. ON's Power Generation Portfolio in the UK and Sweden. 6th IEWT Conference, TU Wien,

- Markowitz, H. (1952). PORTFOLIO SELECTION\*. *The Journal of Finance*, 7(1), 77-91. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x>
- Marques, G., Dias, M., & Vianna, J. (2020). Innovation in the electricity sector in the age of Disruptive Technologies and renewable Energy Sources: A Bibliometric study from 1991 to 2019. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci*, 7(2), 261-272.
- Michalak, A., & Wolniak, R. (2023). The innovativeness of the country and the renewables and non-renewables in the energy mix on the example of European Union. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9(2), 100061. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100061>
- Mongo, M., Belaïd, F., & Ramdani, B. (2021). The effects of environmental innovations on CO2 emissions: Empirical evidence from Europe. *Environmental Science & Policy*, 118, 1-9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.12.004>
- Murshed, M., Apergis, N., Alam, M. S., Khan, U., & Mahmud, S. (2022). The impacts of renewable energy, financial inclusivity, globalization, economic growth, and urbanization on carbon productivity: Evidence from net moderation and mediation effects of energy efficiency gains. *Renewable Energy*, 196, 824-838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.012>
- NREL. (2023). National Renewable Energy Laboratory,. Retrieved 08/08/2023 from <https://atb.nrel.gov/electricity/2022/index>
- O'Neill, S. (2021). Perovskite pushes solar cells to record efficiency. *Engineering*, 7(8), 1037-1040.
- Ozturk, F., & Ozturk, S. (2018). Exploring the Nexus of Coal Consumption, Economic Growth, Energy Prices and Technological Innovation in Turkey. *Asian Economic and Financial Review*, 8(12), 1406-1414. <https://doi.org/10.18488/journal.aefr.2018.812.1406.1414>
- Patwa, N., Sivarajah, U., Seetharaman, A., Sarkar, S., Maiti, K., & Hingorani, K. (2021). Towards a circular economy: An emerging economies context. *Journal of Business Research*, 122, 725-735. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.015>
- Roques, F. A., Newbery, D. M., & Nuttall, W. J. (2008). Fuel mix diversification incentives in liberalized electricity markets: A Mean–Variance Portfolio theory approach. *Energy Economics*, 30(4), 1831-1849.
- Schumpeter, J., & Backhaus, U. (2003). *The Theory of Economic Development*. In J. Backhaus (Ed.), *Joseph Alois Schumpeter: Entrepreneurship, Style and Vision* (pp. 61-116). Springer US. [https://doi.org/10.1007/0-306-48082-4\\_3](https://doi.org/10.1007/0-306-48082-4_3)
- Schumpeter, J. A., & Swedberg, R. (2021). *The theory of economic development*. Routledge.
- Shabir, M., Paziienza, P., & De Lucia, C. (2023). Energy innovation and ecological footprint: Evidence from OECD countries during 1990–2018. *Technological Forecasting and Social Change*, 196, 122836. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122836>
- Sharma, R., Shahbaz, M., Kautish, P., & Vo, X. V. (2021). Analyzing the impact of export diversification and technological innovation on renewable energy consumption: Evidences from BRICS nations. *Renewable Energy*, 178, 1034-1045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.06.125>
- Solarin, S. A., Bello, M. O., & Tiwari, A. K. (2022). The impact of technological innovation on renewable energy production: Accounting for the roles of economic and environmental factors using a method of moments quantile regression. *Heliyon*, 8(7).
- Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Stefán, C. I. (2023). The World Economic Forum. In *The Palgrave Handbook of Non-State Actors in East-West Relations* (pp. 1-13). Springer.
- Stempien, J. P., & Chan, S. H. (2017). Addressing energy trilemma via the modified Markowitz Mean-Variance Portfolio Optimization theory. *Applied Energy*, 202, 228-237. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.145>
- Suksonghong, K., Boonlong, K., & Goh, K.-L. (2014). Multi-objective genetic algorithms for solving portfolio optimization problems in the electricity market. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 58, 150-159.



- Sweezy, P. M. (1943). Professor Schumpeter's Theory of Innovation. *The Review of Economics and Statistics*, 25(1), 93-96. <https://doi.org/10.2307/1924551>
- Töbelmann, D., & Wendler, T. (2020). The impact of environmental innovation on carbon dioxide emissions. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118787. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118787>
- Ullah, S., Ozturk, I., Majeed, M. T., & Ahmad, W. (2021). Do technological innovations have symmetric or asymmetric effects on environmental quality? Evidence from Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128239>
- Vakulchuk, R., Overland, I., & Scholten, D. (2020). Renewable energy and geopolitics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 122, 109547. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109547>
- Vezzoni, R. (2023). Green growth for whom, how and why? The REPowerEU Plan and the inconsistencies of European Union energy policy. *Energy Research & Social Science*, 101, 103134.
- Wang, Q., Li, S., & Pisarenko, Z. (2020). Heterogeneous effects of energy efficiency, oil price, environmental pressure, R&D investment, and policy on renewable energy -- evidence from the G20 countries. *Energy*, 209, 118322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118322>
- WIPO. (2023). Retrieved 4/12/2023 from [https://www.wipo.int/global\\_innovation\\_index/en/2023#:~:text=Now%20in%20its%2016th%20edition,progress%20in%20innovation%20over%20time](https://www.wipo.int/global_innovation_index/en/2023#:~:text=Now%20in%20its%2016th%20edition,progress%20in%20innovation%20over%20time).
- Ye, F., Paulson, N., & Khanna, M. (2022). Are renewable energy policies effective to promote technological change? The role of induced technological risk. *Journal of Environmental Economics and Management*, 114, 102665. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jeem.2022.102665>
- Zhao, X., Adebayo, T. S., Kong, X., & Al-Faryan, M. A. S. (2022). Relating energy innovations and natural resources as determinants of environmental sustainability: The role of globalization in G7 countries. *Resources Policy*, 79, 103073. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103073>

**Research Article****Ortalama - Varyans Yaklaşımı ile İnovasyon Düzeyinin Enerji Dönüşümünde Maliyet ve Risk Etkisinin İncelenmesi***Investigating the Impact of Innovation Level on Cost and Risk at the Energy Transition by Mean-Variance Approach*

<p><b>Volkan ALAÇAM</b> Hacettepe Üniversitesi İşletme Bölümü <a href="mailto:valacam@epdk.gov.tr">valacam@epdk.gov.tr</a> <a href="https://orcid.org/0000-0002-1675-5729">https://orcid.org/0000-0002-1675-5729</a></p>	<p><b>Mehmet Baha KARAN</b> Prof. Dr., Hacettepe Üniversitesi İşletme Bölümü <a href="mailto:bkaran@hacettepe.edu.tr">bkaran@hacettepe.edu.tr</a> <a href="https://orcid.org/0000-0002-3923-4598">https://orcid.org/0000-0002-3923-4598</a></p>
--	---

**Extensive Summary**

The transition to sustainable energy systems is a critical global challenge driven by the urgent need to mitigate climate change and enhance energy security. This study emphasizes the pivotal role of technological innovations in facilitating successful energy transformations. Specifically, it investigates how optimal energy production portfolios are influenced by various innovation scenarios, focusing on their cost and risk profiles. By utilizing publicly available data from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) under the supervision of the U.S. Department of Energy (DOE), this research applies the Mean-Variance Approach of Modern Portfolio Theory to analyze these datasets and derive actionable insights for policymakers. The primary objectives of this research are threefold: first, to assess the impact of energy transformation on optimal energy production portfolios; second, to analyze how different innovation scenarios affect cost and risk profiles; and third, to provide actionable insights for policymakers aimed at enhancing renewable energy adoption. To evaluate the impact of energy transformation on the cost and risk profiles of optimal energy production portfolios, this study employs the Mean-Variance Approach of Modern Portfolio Theory. This approach allows for a systematic analysis of the trade-offs between expected returns and associated risks when constructing energy portfolios. The analysis utilizes data obtained from NREL's Annual Technology Baseline (ATB), which provides comprehensive information on various energy technologies, their costs, and performance metrics. Publicly available datasets from NREL were utilized to gather relevant information on traditional and renewable energy sources, including coal, natural gas, biomass, wind, and solar technologies. The ATB data includes projections for technology costs and performance characteristics from 2020 to 2050, allowing for an in-depth analysis of potential future scenarios. The first step in the analysis involved constructing efficient frontier curves representing the lowest risks and costs associated with different innovation scenarios. These curves illustrate the trade-offs between expected returns (energy production) and associated risks (costs and variability). The efficient frontier serves as a benchmark for identifying optimal portfolios under varying levels of technological innovation. Subsequently, projections for the percentage distribution of traditional and renewable energy production technologies in optimal portfolios over the next twenty years were developed. Various innovation scenarios were defined, including low, medium, and high innovation levels, reflecting different rates of technological advancement and market adoption. The findings indicate that between 2035 and 2045, diversified optimal energy portfolios can achieve a larger share of renewable energy. It is projected that coal and natural gas power plant technologies will be significantly replaced by biomass technologies within these optimal portfolios. Throughout all scenarios analyzed for the 2035 - 2045 period, there is a notable reduction in the expected risk-to-cost ratio of the portfolios. This suggests that greater risk reduction can be achieved for each unit of cost incurred. The research anticipates a decline in the share of coal and natural gas power plants under medium and advanced scenarios, with biomass plants taking their place. This trend is particularly pronounced in optimal portfolios characterized by low-risk levels under medium scenarios. The findings support the hypothesis that preferences for biomass technologies will increase under medium innovation scenarios by 2045. Another significant finding is the substantial increase in

the share of renewable energy production technologies within optimal portfolios at the lowest risk levels under both medium and advanced scenarios. The transition from coal to biomass energy technologies continues over time, with wind energy emerging prominently in low - cost portfolios while solar energy gains importance in specific scenarios. The implications of these findings are profound for policymakers aiming to promote sustainable energy practices. Policymakers should prioritize investments in research and development (R&D) for renewable technologies, particularly biomass, wind, and solar power. This can be achieved through funding initiatives, tax incentives for clean technology startups, or public-private partnerships aimed at accelerating innovation. Establishing regulatory frameworks that support renewable energy integration into existing grids is essential. This includes revising zoning laws to facilitate renewable installations, providing subsidies for clean technology adoption, and implementing carbon pricing mechanisms that make fossil fuels less economically attractive. Also increasing public awareness about the benefits of renewable energy sources can drive consumer demand for clean technologies. As renewable energies become more prevalent in optimal portfolios, enhancing grid infrastructure to accommodate decentralized energy generation becomes crucial. Investments in smart grid technologies can improve efficiency and reliability while facilitating greater integration of renewables into existing systems. The analysis also emphasizes the importance of effective risk management strategies within optimal energy portfolios. Portfolio diversification remains a key strategy for managing risks associated with fluctuating energy prices and regulatory changes. By incorporating a mix of renewable sources alongside traditional ones during the transition phase, stakeholders can mitigate potential financial risks associated with market volatility. Continuous monitoring of technological advancements in renewable energy can inform strategic decisions regarding portfolio adjustments. Staying abreast of innovations allows stakeholders to capitalize on emerging opportunities while minimizing exposure to outdated technologies that may not provide competitive advantages in future markets. Engaging in scenario planning exercises can help organizations anticipate future market conditions influenced by policy changes or technological breakthroughs. By preparing for various potential outcomes—such as shifts in consumer preferences or regulatory landscapes—stakeholders can develop robust strategies that remain viable under different circumstances. Beyond economic evaluations, there is an urgent need for cleaner energy transitions aligned with environmental imperatives aimed at reducing carbon dioxide emissions. Recent geopolitical events and regional conflicts have exposed vulnerabilities associated with fossil fuel dependency; thus, prompting a reevaluation of energy policies that encourage greater reliance on renewable resources. The optimization model primarily focuses on measurable risks arising from costs but also highlights pathways for further risk reduction within optimal energy portfolios through continuous innovations. Future research should comprehensively assess the evolving global landscape of energy transformation while addressing practical constraints such as resource availability and infrastructure capacity alongside broader geopolitical risks that may impact supply chains or technology deployment timelines. By prioritizing innovation, policymakers can accelerate this transition through strategic incentives—such as grants or low-interest loans for clean technology projects—collaboration between public entities and private companies focused on developing new solutions as well as business model developments that facilitate faster adoption rates among consumers. This research underscores that effective policy frameworks must evolve alongside technological advancements to create a resilient energy landscape capable of meeting future demands sustainably while addressing pressing environmental concerns head-on. Through concerted efforts across sectors—governmental bodies working together with private enterprises alongside academic institutions—the vision for a sustainable future powered by clean energies can become a reality that benefits both current generations as well as those yet unborn who will inherit our planet's resources moving forward into an uncertain future filled with challenges requiring innovative solutions tailored specifically towards achieving lasting change across all aspects related directly or indirectly influencing our ability harness nature's bounty responsibly without compromising its integrity over time. In conclusion, this study provides valuable insights into how technological innovations can reshape our approach to sustainable energy production. By understanding these dynamics better—particularly regarding cost-efficiency versus risk management—stakeholders can make informed decisions that align economic viability with environmental stewardship effectively paving pathways toward achieving ambitious sustainability goals globally while fostering resilience against uncertainties posed by climate change challenges ahead.