

Enerji Sektöründe Ar-Ge Faaliyetlerinin Gelişimi: Karşılaştırmalı Bir Analiz

Ömer Özdiñç^a 

^a Dr., SER Danışmanlık, Altunizade, Yetimhane Sk. Numara:8 Daire: 7, Üsküdar 34662 İstanbul.

E-posta: omer.ozdinc@sd.com.tr

ÖZ Türkiye enerji sektörü, 2009-2023 döneminde araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) harcamaları ve istihdam yapısında önemli değişimler göstermiştir. Merkez Bankası Gelir Tablosu (GT) verilerine göre enerji sektörünün Ar-Ge giderleri 2009'da 17.690,6 milyon TL'den 2023'te 259.792,7 milyon TL'ye yükselmiştir. Ancak, bu artışın genellikle imalat ve yazılım gibi diğer sektörlerin gerisinde kaldığı görülmektedir. Buna karşılık, Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) anket verileri, özellikle 2019-2023 döneminde enerji sektöründeki Ar-Ge harcamalardaki artış oranının diğer sektörlerin oldukça ilerisinde olduğunu göstermekte, bu durumun veri analitiği ve yapay zeka teknolojilerinin bu sektörde kullanılmaya başlanmasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Enerji sektörünün net satışlar ve faaliyet giderleri içindeki Ar-Ge payları oldukça düşük seyretmekte ve 2023 yılı hariç genel yükselme trendine uymamaktadır. Sektörün karlılığında ciddi bir istikrarsızlık gözlemlenmiş, 2009-2023 döneminin 6 yılında zarar edildiği tespit edilmiştir. Karlılığın artmasıyla Ar-Ge'ye daha fazla kaynak aktarıldığına dair anlamlı bir ilişki verilerle doğrulanmamıştır. Ar-Ge istihdamı açısından, enerji sektörü 2019'a kadar diğer sektörlerin gerisinde kalırken, 2020'den sonra %100'ün üzerinde bir artışla öne çıkmıştır. Ancak, Ar-Ge personelinin toplam çalışanlar içindeki oranı (%0,56) hala Türkiye ticari sektör ve imalat sektörü ortalamalarının (%1,36 ve %1,96) oldukça altındadır. Çalışmada, Merkez Bankası ve TÜİK verileri arasında önemli tutarsızlıklar olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun muhasebe mevzuatı ile anket beyanları arasındaki farklardan kaynaklanabileceği ve detaylı inceleme gerektirdiği düşünülmektedir. Enerji sektörünün Ar-Ge ve istihdam performansı, teknolojik kapasite oluşumu ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından kritik öneme sahiptir ve veri tutarlılıkları üzerine daha derinlemesine analizler yapılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler

enerji sektörü • Ar-Ge • istihdam • karlılık

The Evolution of R&D Activities in the Energy Sector: A Comparative Analysis

ABSTRACT Turkey's energy sector underwent significant transformations in research and development (R&D) expenditures and employment structure during the period from 2009 to 2023. According to data from the Central Bank's Income Statement (IS), R&D expenditures in the energy sector increased from 17.690,6 million TRY in 2009 to 259.792,7 million TRY in 2023. However, this growth has generally lagged behind other sectors such as manufacturing and software. In contrast, survey data from the Turkish Statistical Institute (TurkStat) indicate that R&D expenditure growth in the energy sector significantly outpaced other sectors between 2019 and 2023, a trend that may be associated with the increasing integration of data analytics and artificial intelligence technologies. The sector's R&D share within net sales and operating expenses remains low and does not follow the general upward trend—except in 2023. Profitability in the sector has shown substantial instability, with losses recorded in six of the fifteen years examined. The data does not confirm a statistically significant relationship between increased profitability and greater allocation to R&D. In terms of employment, the energy sector lagged behind other sectors until 2019, but experienced a more than 100% increase in R&D personnel after 2020. Nevertheless, the share of R&D personnel in total employment (0.56%) remains well below the average levels for Turkey's commercial and manufacturing sectors (1.36% and 1.96%, respectively). The study identifies significant inconsistencies between Central Bank and TurkStat data, likely stemming from differences between accounting regulations and survey declarations, which warrant further investigation. Given the strategic importance of R&D and employment performance in shaping technological capacity and achieving sustainable development goals, deeper analyses on data consistency are recommended.

Keywords

energy sector • R&D • employment • profitability

Atf: Özdiñç, Ö. (2025) Enerji Sektöründe Ar-Ge Faaliyetlerinin Gelişimi: Karşılaştırmalı Bir Analiz *EnergyTR*, 2(1), 85–109.

Başvuru: 03.02.2025 **Kabul:** 17.05.2025

EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Motivation

Turkey's energy sector has experienced notable changes in R&D investment and employment structure between 2009 and 2023, developments that are crucial for the country's economic development goals and strategies for sustainable growth. This comprehensive analysis evaluates the dynamics of R&D and employment in the energy sector through a comparative lens, juxtaposing them with the manufacturing and information and communication technology (ICT) sectors to provide a deeper understanding of sectoral transformation.

The energy sector holds strategic significance not only due to supply-demand dynamics but also because of its potential to generate employment and build technological capacity. Global trends such as digitalization, green transformation, and technology-driven growth strategies have compelled the sector to adopt a more innovative and interdisciplinary approach. The rising demand for specialized human capital in areas such as data analytics, automation, artificial intelligence, software development, and green technologies is reshaping the landscape. These shifts have triggered new, collaborative investment models between the public and private sectors, driving increased R&D spending.

In Turkey's case, the energy sector has long grappled with challenges such as foreign dependency, energy security, and investment financing. Since the mid-2000s, structural reforms have been introduced, including a shift toward domestic and renewable sources, liberalization of energy markets, and the integration of environmental sustainability goals into policy frameworks. However, the impacts of these reforms on employment and R&D investment remain under-explored, especially when compared to high-impact sectors like manufacturing and ICT. This study aims to reveal the structural transformation within the energy sector and to provide policymakers with a comparative framework for sectoral prioritization, resource allocation, and strategic planning.

Literature Review

The relationship between energy sector R&D expenditures and employment has been the subject of numerous national and international studies, many of which focus on the role of R&D and employment in the transition to renewable energy. Analyses based on Turkish data often reveal a positive and significant correlation between R&D investment and energy consumption. It is frequently argued that renewable energy investments have greater employment potential compared to fossil fuels. European research highlights the insufficiency of R&D investment in the energy sector to meet climate neutrality targets. Furthermore, while R&D in the energy sector contributes to operational efficiency when integrated into production processes, in the ICT sector it is more directly associated with innovation outputs and technology transfer. However, comparative studies specifically focusing on R&D employment in the energy sector remain limited.

Findings and Analysis

This study utilizes data from the Central Bank's Income Statement and TurkStat's R&D activity surveys to analyze R&D expenditures, employment structures, and profitability across the energy, manufacturing, software, and broader commercial sectors for the 2009–2023 period.

R&D expenditures in the energy sector increased from 17,690.6 million TRY in 2009 to 259,792.7 million TRY in 2023. Excluding the anomaly observed in 2011—when values were lower than in 2009 and 2010, accompanied by a significant decline in profitability—R&D spending in the energy sector generally trailed behind that of other sectors. For example, between 2015 and 2019, R&D expenditures in energy rose by 38.8%, while the manufacturing sector increased by 129.1%, software by 198.5%, and the overall commercial sector by 185.3%.

According to TurkStat data, the energy sector's R&D expenditures increased substantially from 13,728 million TRY in 2009 to 766,534 million TRY in 2023. Particularly in the last four years (2019–2023), the energy sector's performance

significantly outpaced that of other sectors—a trend that may be attributed to the expanding application of data analytics and AI technologies in R&D processes.

In both the Central Bank and TurkStat datasets, the R&D share of net sales in the energy sector remains low. According to the Central Bank, this share fell from 0.023% in 2009 to 0.012% in 2023. TurkStat figures indicate a rise from 0.018% to 0.036% over the same period. With the exception of 2023, the energy sector has not followed the upward trend observed in the broader commercial sector.

The share of R&D expenditures within the sector's operating costs also remains modest—declining from 0.396% in 2009 to 0.328% in 2023. Recent years have seen performance drop below earlier levels.

Profitability in the energy sector has been highly unstable. Negative profitability (i.e., losses) was recorded in six of the fifteen years studied—2013, 2014, 2015, 2016, 2018, and 2021. Notably, there is a discrepancy between the textual claim of nine loss-making years and the tabulated data. The analysis confirms that increased profitability does not necessarily correlate with higher R&D investment.

The number of R&D personnel in Turkey increased from 45,922 in 2010 to 206,929 in 2023—a nearly fivefold rise. In the energy sector, R&D personnel grew from 177 in 2010 to 767 in 2023, showing consistent growth. However, the sector lagged behind others until 2019. For example, between 2011 and 2015, the energy sector's R&D workforce increased by only 3%, compared to 41% in other commercial sectors, 25% in manufacturing, and 68% in ICT. After 2020, a distinct trend emerged: by 2023, the energy sector had more than doubled its R&D personnel compared to 2019, surpassing growth rates in other sectors. This acceleration is likely tied to the integration of advanced technologies like AI and data science.

Despite this momentum, the proportion of R&D personnel in total employment remains low at 0.56%, compared to 1.36% in the overall commercial sector and 1.96% in manufacturing. Table 3 presents differing figures for R&D

employment ratios in the energy sector (e.g., 20.6% in 2019 and 28.4% in 2023), which diverge significantly from the text's cited range (0.27%–0.56%). This suggests methodological inconsistencies arising from variations in data sources and measurement approaches.

Overall Assessment and Inconsistencies

Significant inconsistencies exist within the data related to the energy sector. The most notable is the discrepancy between the Central Bank's income statement figures and TurkStat's R&D survey results. These inconsistencies may stem from differences between accounting regulations and survey declarations, or from inaccuracies in corporate survey responses—issues that necessitate detailed investigation. Interestingly, data on the software sector shows greater consistency across the two sources, warranting further exploration.

Conclusion and Recommendations

The R&D and employment performance of the energy sector holds critical importance for technological capacity-building and the achievement of sustainable development goals. While Turkey has demonstrated considerable growth in R&D capacity across all sectors, the energy sector has generally lagged behind—although it has shown renewed momentum in the past four years. Whether this momentum will be sustained remains an open question deserving of close observation.

This study highlights the need for more in-depth analyses of data inconsistencies and sectoral dynamics. It offers a critical foundation for the reconfiguration of Turkey's energy strategies from a human capital and knowledge economy perspective. Future research should investigate the micro-level causes of discrepancies between Central Bank and TurkStat data, assess the comparative consistency observed in the software sector, and more closely examine the relationship between profitability and R&D investment in the energy sector. Moreover, it should be explored whether the recent surge in R&D employment is driven by the establishment of new firms consolidating their R&D teams.

Enerji sektörü, devletlerin iktisadi kalkınma hedefleri bakımından taşıdığı çok katmanlı işlev nedeniyle sadece enerji arz-talep dinamikleri çerçevesinde değil, aynı zamanda istihdam üretme ve teknolojik kapasite oluşumu bağlamından da stratejik bir ehemmiyete sahiptir. Enerji sektörü, üretimden ulaşıma, konuttan sanayiye değin geniş bir ekonomik alana etki ederken hem büyüme üzerinde kaldıraç etkisi yaratmakta hem de sürdürülebilir kalkınma politikaları çerçevesinde önemli bir yerde bulunmaktadır. Dolayısıyla enerji sektörünün incelenmesi, sadece enerji güvenliği, fiyat istikrarı ya da dışa bağımlılık gibi klasik konularla sınırlı kalmamalı; sektörel istihdam yapısı, beceri düzeyleri, bilgi üretimi kapasitesi ve araştırma-geliştirme (Ar-Ge) faaliyetleri de sistematik biçimde analiz edilmelidir.

Son yıllarda küresel ölçekte hızlı bir biçimde yaşanan dijitalleşme, yeşil dönüşüm ve teknoloji temelli büyüme stratejileri, enerji sektörünün de daha yenilikçi ve çok disiplinli bir yapıya dönüşmesini gerektirmektedir. Bilhassa yaygınlaşan yenilenebilir enerji teknolojileri, artan enerji verimliliği uygulamaları ve kurumsallaşan iklim değişikliğiyle mücadele politikaları, enerji sektöründe istihdam edilen emeğin niteliğini ve dağılımını da doğrudan etkilemektedir. Yeni koşullar altında enerji sektörü, sadece mühendislik veya işletme alanlarında değil; veri analitiği, otomasyon, yapay zekâ, yazılım ve yeşil teknoloji gibi alanlarda da uzmanlaşmış insan kaynağı talep eden çok katmanlı bir yapıya kavuşmaktadır. Bu dönüşüm aynı zamanda sektörün Ar-Ge yatırımlarını da artırmakta; yeni enerji teknolojilerinin geliştirilmesi, depolama çözümleri, iletim altyapısı ve dijital platformlar gibi konularda kamu ve özel sektörün iş birliğine dayalı yeni yatırım modellerini ortaya çıkarmaktadır.

Türkiye bağlamında enerji sektörü uzun yıllardır dışa bağımlılık, arz güvenliği ve yatırım finansmanı gibi temel problemleri alanlar çerçevesinde değerlendirilmektedir. 2000'li yılların ortasından itibaren ise enerji politikalarında yaşanan kurumsal dönüşümle birlikte, yerli ve yenilenebilir kaynaklara yönelme, enerji piyasalarının serbestleştirilmesi, kamu yatırımlarının yeniden yapılandırılması ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerinin politika belgelerine yansıtılması gibi çok sayıda yapısal adım atılmıştır. Bununla birlikte, bu politikaların doğrudan ya da dolaylı olarak istihdam ve Ar-Ge yatırımları üzerindeki etkileri çoğu zaman yeterince görünür kılınamamış; politika değerlendirme süreçlerinde bu göstergelere ikincil öncelik tanınmıştır. Özellikle enerji sektörünün imalat sanayi ve bilgi ve iletişim teknolojileri (BİT) gibi diğer yüksek etkili sektörlerle karşılaştırmalı olarak incelendiği çalışmaların eksikliği, bu alanda önemli bir bilgi boşluğuna işaret etmektedir.

Türkiye ekonomisinin yapısal dönüşümünde imalat sanayi geleneksel olarak üretim ve ihracatın omurgasını oluştururken, BİT sektörü son yıllarda dijitalleşme ve yenilikçilik kapasitesi açısından stratejik önem kazanmıştır. Bu sektörlerin istihdam yapıları ve Ar-Ge yatırım düzeyleri, sadece sektörel gelişmeleri değil aynı zamanda ekonominin toplam faktör verimliliği, beşeri sermaye kalitesi ve teknolojik hazırlık düzeyi gibi daha üst düzey göstergeleri de etkilemektedir. Enerji sektörü ise bu iki sektörle yakın ilişkide bir işlev görerek, üretim süreçlerine hem girdi sağlaması hem de çevresel etkileri ile uzun vadeli sürdürülebilirlik politikalarının merkezinde yer alması bakımından özgün bir konumda bulunmaktadır. Dolayısıyla enerji sektörünün istihdam

ve Ar-Ge performansının, imalat ve BİT sektörleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi, yalnızca sektörün iç dinamiklerini anlamakla kalmayıp, aynı zamanda Türkiye ekonomisinin genel rekabetçilik düzeyi ve bilgi temelli dönüşüm kapasitesi hakkında da fikir vermektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye’de 2009–2023 dönemi için enerji sektöründeki istihdamın, karlılığın ve Ar-Ge harcamalarının seyrini betimsel analiz yöntemleriyle incelemek ve bu göstergeleri imalat sanayi ile BİT sektörüyle karşılaştırmalı biçimde değerlendirmektir. Böylelikle çalışmanın iki düzeyli katkı sağlaması hedeflenmektedir: birincisi, enerji sektörünün kendi içindeki yapısal dönüşümünü görünür kılmak; ikincisi ise sektörel önceliklendirme, kaynak tahsisi ve stratejik planlama açısından politika yapıcılara karşılaştırmalı bir değerlendirme zemini sunmak. İstihdam ve Ar-Ge göstergeleri üzerinden yapılacak deskriptif analizler, yalnızca enerji sektörünün mevcut yapısını değil; aynı zamanda diğer stratejik sektörlerle olan benzerlik ve farklılıkları da ortaya koyarak, sektörel gelişim dinamiklerine yönelik daha hedefli politika önerilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Böylelikle çalışmanın sonuçları, Türkiye’nin enerji stratejilerinin insan kaynağı ve bilgi ekonomisi perspektifiyle yeniden yapılandırılması yönünde önemli bir zemin oluşturacaktır.

Çalışma 4 kısımdan oluşmaktadır. Çalışmanın yapılmasına dair motivasyonun sunulduğu giriş kısmını konuyu daha önce ele almış çalışmaların özetinin sunulacağı literatür kısmı takip edecektir. Ardından bu çalışmanın dayandığı veri setinden faydalanılarak betimsel analizlere yer verilecek; nihayetinde çeşitli değerlendirme ve politika çıkarımlarının da bulunduğu sonuç kısmı ile çalışma sonlandırılacaktır.

Literatür

Enerji sektörünün istihdam yaratma kapasitesi ve Ar-Ge faaliyetleriyle ilişkisi hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için giderek daha önemli bir araştırma konusu hâline gelmektedir. Türkiye özelinde yapılan çalışmalarda genellikle yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinde istihdam ve Ar-Ge harcamalarının rolü analiz edilmektedir.

Tatlı (2023), Türkiye verilerini kullanarak enerji tüketimi, Ar-Ge harcamaları ve beşerî sermayenin ekonomik büyüme üzerindeki etkilerini panel veri yöntemiyle incelemiş ve Ar-Ge ile enerji tüketimi arasında pozitif ve anlamlı ilişkiler tespit etmiştir. Benzer şekilde, Hüseyinli (2023), Türkiye’de 1998–2021 verileri kullanarak yenilenebilir enerji tüketimi ve Ar-Ge harcamaları arasındaki ilişkiyi Granger nedensellik yöntemiyle analiz etmiştir. Sonuçlar, yenilenebilir enerji tüketiminin Ar-Ge harcamalarına tek yönlü pozitif etki yaptığını göstermektedir.

Karaca, Ulutaş ve Eşgünoğlu (2017) Türkiye’de elektrik üretim kapasitesinde yenilenebilir enerjinin payının %100 olması durumunda gerekecek ilave yenilenebilir enerji yatırımlarının istihdamda yaratacağı etkiyi tahmin etmiştir. COPRAS yönteminin uygulandığı çalışma sonuçlarına göre söz konusu senaryoda 576.664 kişiye doğrudan, 322.851 kişiye dolaylı, 223.030 kişiye de uyarılmış olmak üzere toplam 1.132.545 kişilik istihdam yaratılmış olacaktır.

Uluslararası literatürde enerji Ar-Ge harcamaları, inovasyon ve sosyal etkiler üzerine

pek çok çalışma mevcuttur. Popp (2002), ABD verileriyle enerji fiyatlarındaki artışın Ar-Ge faaliyetlerini teşvik ettiğini gösterirken, Johnstone, Haščić ve Popp (2010), OECD ülkelerinde yenilenebilir enerji politikalarının patent sayılarındaki artışla pozitif ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Lee, Chang ve Lee (2022), OECD panel verileri ile Ar-Ge yatırımlarının toplam faktör verimliliğine olumlu katkı sunduğunu bulmuştur.

Cui, Zhang ve Zheng (2018), Çin'in karbon emisyonlarını azaltmak için uyguladığı karbon fiyatlama politikalarının uygulandığı pilot bölgelerde karbon fiyatlamalarının düşük karbon açığa çıkaran ürün inovasyonlarını artırdığını ampirik olarak test etmişlerdir. Garrett-Peltier (2017), ABD'de girdi-çıktı modeliyle yaptığı analizde, enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji projelerinin fosil yakıt sektörüne kıyasla daha fazla istihdam yarattığını bulmuştur.

Çin'de yapılan bir çalışmada, Chen (2019), girdi-çıktı analizi yardımıyla güneş, rüzgâr ve biyoenerji özelindeki yenilenebilir enerji yatırımlarının fosil yakıtlara yapılan yatırımlara nazaran istihdamı 2 kat daha fazla artırdığını tespit etmiştir. Birleşik Krallık'ta yapılan bir çalışmada Arvanitopoulos ve Agnolucci (2020), yenilenebilir enerji üretiminin 1 GW artmasının 3,5 adet yeni iş yarattığını, yenilenebilir enerjinin nükleer enerjiye nazaran 6 kat daha fazla iş imkânı yarattığını ortaya koymaktadır.

Lehr, Lutz ve Edler (2012), Almanya'da yenilenebilir enerji politikalarının ekonomik etkilerini analiz ederek, net istihdam artışının pozitif olduğunu raporlamışlardır. ABD'de Wei, Patadia ve Kammen (2010), enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji sektörlerinin istihdam potansiyelini kıyaslamış ve güneş enerjisi yatırımlarının en yüksek istihdam yaratma kapasitesine sahip olduğunu saptamıştır. Pestel (2019), yeşil enerji politikalarının istihdam üzerindeki etkilerini değerlendirirken, bazı sektörlerde net kayıplar, bazılarında ise kazanımlar olduğunu vurgulamıştır.

Apergis ve Payne (2010), OECD ülkeleri için gerçekleştirdikleri panel veri analizinde, yenilenebilir enerji tüketimi ile ekonomik büyüme arasında çift yönlü nedensellik olduğunu göstermiştir. MENA bölgesi için Charfeddine ve Kahia (2019), finansal gelişmişlik ve yenilenebilir enerji tüketiminin ekonomik büyüme ve karbon salımı üzerindeki etkilerini analiz etmiş, pozitif ilişkilere ulaşmıştır. Türkiye özelinde CO-BENEFITS (2016) raporu, her bir MW kıyı civarı rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi kurulumunun sırasıyla 8.6 ve 17.9 tam zamanlı eşdeğer istihdam yarattığını ortaya koymuştur.

Kılınç ve Şahbaz (2021) ise Ar-Ge ile inovasyonun yenilenebilir enerji üretimi üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Panel veri analiziyle yapılan çalışma sonuçlarına göre enerji temelli uzun dönem Ar-Ge harcamaları ve patent başvurularında yaşanacak %1 artışın yenilenebilir enerji üretimini yaklaşık %0.23 ve %0.42 artırdığı tespit edilmiştir.

Fu, Zhang, Maani ve Ven (2025), Çin'de yeşil finansmanın istihdam rasyolarına etkisini incelediği çalışma sonuçlarında 2012-2021 yılları arasında yeşil finansmandaki artışın istihdamı da önemli derecede artırdığını tespit etmiştir.

Algül ve Kaya (2021), fosil temelli elektrik sektörü karşısında yenilenebilir temelli elektrik sektörü istihdam yaratma kapasiteleri bağlamında girdi-çıktı yöntemiyle

araştırılmıştır. Tahmin sonuçları, yenilenebilir kaynaklı elektrik sektörünün istihdam yaratma kapasitesinin fosil kaynaklı elektrik sektörüne nazaran daha etkili olduğunu göstermektedir.

Türkiye'nin yenilenebilir enerji potansiyelini değerlendiren Tutar ve Atas (2022) çalışması, hidroelektrik, biyokütle, güneş ve rüzgâr gibi kaynakları teknolojik olgunluk ve potansiyele göre sıralamış; sonuçta güneş enerjisinin Türkiye için en uygun kaynak olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca Türkiye'nin potansiyelini Ar-Ge ve sürdürülebilir enerji açısından değerlendiren Çakmak (2024), yenilenebilir enerjideki hızlı büyümeye dikkat çekmiş; 2010-2024 arasında rüzgâr kapasitesi yedi kat, güneş kapasitesi ise elli kat artmıştır. Bu büyümenin dolaylı olarak Ar-Ge ve istihdamla yakın ilişkide olduğu vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak, ulusal ve uluslararası literatürde enerji sektörünün hem Ar-Ge harcamaları hem de istihdam dinamikleri açısından belirleyici bir rol üstlendiği görülmektedir. Özellikle yenilenebilir enerji yatırımlarıyla birlikte istihdamda ve inovasyonda artışlar olduğu; ancak bu etkilerin ülkeye, uygulanan politikaya ve sektörün yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

Enerji Sektöründe Ar-Ge ve İstihdam Dinamiklerinin Diğer Sektörlerle Karşılaştırılması

Enerji sektöründe Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) ile istihdamın diğer sektörlerle karşılaştırılması, iş gücü dinamikleri, teknolojik dönüşüm ve yenilikçilik bağlamında dikkat çekici farklılıklar sunmaktadır. Bu sektör, özellikle yenilenebilir enerjiye geçiş süreciyle birlikte önemli bir dönüşüm yaşamakta ve bu dönüşüm istihdam açısından da yeni fırsatlar yaratmaktadır. Literatürde, yenilenebilir enerji sistemlerine geçişin 2050 yılına kadar küresel düzeyde net 24,3 milyon yeni iş imkânı yaratabileceği öngörülmektedir (Jacobson et al., 2017). Buna karşın, fosil yakıt odaklı geleneksel enerji sektörlerinde ise istihdam kayıpları yaşanması beklenmekte; bu durum enerji sektörünün kendi içindeki farklı yapıları da öne çıkarmaktadır (Černý et al., 2022; Oteng et al., 2024).

Bu bağlamda enerji sektöründe Ar-Ge yatırımları yalnızca teknolojik inovasyonu değil, aynı zamanda istihdam yaratımını da tetiklemekte ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle uyumlu bir gelişim modeli sunmaktadır. Nitekim Ram ve arkadaşları (2020), enerji dönüşümünün ekonomik kalkınmayla iç içe geçmiş yapısının, Ar-Ge yatırımlarının iş yaratımı üzerindeki etkisini belirgin şekilde artırdığını ortaya koymaktadır. Ancak geleneksel enerji sektörlerinde işini kaybeden çalışanların, diğer sektörlerdeki iş kayıplarına kıyasla daha yüksek gelir kaybı yaşadığı da bilinmektedir; bu da teknolojik ilerleme ile iş gücü istikrarı arasındaki gerilime işaret etmektedir (Barreto et al., 2024).

Diğer yandan, hizmet ve imalat sektörleri de farklı istihdam ve Ar-Ge dinamiklerine sahiptir. Özellikle hizmet sektörü, otomasyonun imalat sektöründeki istihdamı düşürmesine rağmen görece bir direnç sergilemiş; ancak bu büyüme çoğu zaman istihdamsız gerçekleşmiştir (Butkus et al., 2023). İmalat sektöründe ise Ar-Ge yatırımlarındaki yetersizlikler verimlilik kayıplarına yol açmakta; buna karşın BİT sektöründe

Ar-Ge'nin teknoloji yatırımlarını ve ölçeklenebilir inovasyonları daha doğrudan beslediği görülmektedir (Li, 2024; Khalifa, 2022).

Bu bağlamda Ar-Ge yatırımları açısından imalat ve BİT sektörleriyle enerji sektörünün karşılaştırmalı analizi, sektörel yatırım tercihleri ve istihdam politikalarının yeniden değerlendirilmesini gerektirmektedir. Her iki sektörde de Ar-Ge dış kaynak kullanımı ve iş birliği stratejileri ön planda olsa da, Ar-Ge'nin üretim süreçlerine entegrasyonu farklı sonuçlar doğurmaktadır. Üretimde bu entegrasyon çoğu zaman operasyonel verimlilik sağlarken; BİT sektöründe Ar-Ge, doğrudan inovasyon çıktıları ve teknoloji transferi ile ilişkilendirilmektedir (Wang et al., 2023; Brettel et al., 2011).

Ancak mevcut literatür incelendiğinde, enerji sektörünün Ar-Ge istihdamı üzerine yapılan çalışmaların genellikle bu sektöre odaklandığı, imalat ve BİT gibi yüksek teknoloji sektörleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği örneklerin sınırlı olduğu görülmektedir. Oysa sektörel yatırım kararlarını şekillendirmede bu tür karşılaştırmalar büyük önem arz etmektedir. Bu eksikliği gidermek amacıyla hazırlanan mevcut çalışma, enerji sektörünü imalat ve BİT sektörleriyle birlikte zamana bağlı bir analizle ele almakta ve uzun vadeli eğilimleri ortaya koymaktadır.

2009–2023 dönemi esas alınarak yapılan zaman serisi analizleri, yalnızca istihdam miktarındaki değişimleri değil, aynı zamanda bu değişimlerin arkasında yatan dinamikleri de ortaya çıkarmayı amaçlamaktadır. Özellikle dijitalleşme, yapay zekâ kullanımı ve yeni firma yapılanmaları gibi faktörlerin Ar-Ge istihdamındaki artışın yapısını nasıl etkilediği, bu çalışmanın önemli odak noktalarından birini oluşturmaktadır.

Bu bağlamda Ar-Ge istihdamındaki artışın yalnızca niceliksel değil, niteliksel olarak da değerlendirilmesi önemlidir. Veriler, Ar-Ge'nin veri bilimi, yapay zekâ, enerji depolama gibi alanlara kaydığını ve firmaların yüksek nitelikli iş gücüne yönelik taleplerinin arttığını göstermektedir (Chun et al., 2015; Han et al., 2017). Ancak bu artışın sürdürülebilirliği, sektörel yapılar ve inovasyon talebiyle doğrudan ilişkilidir. Ar-Ge'nin firma içindeki farklı birimlerle entegre edilmesi, hem istihdamın korunmasına hem de verimliliğin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Yeh & Chang, 2019).

Enerji sektöründe ise Ar-Ge yatırımları giderek açık inovasyon ve ortaklık modellerine dayanmaya başlamıştır. Özellikle enerji piyasalarının serbestleşmesi sonrası kamu hizmeti sunan kuruluşlarla özel sektör arasında gelişen iş birlikleri, yenilenebilir çözümlerin yaygınlaşmasını ve istihdam olanaklarını artırmaktadır (Costa-Campi & García-Quevedo, 2017, 2019). Bununla birlikte, Avrupa enerji sektörüne ilişkin bazı analizler Ar-Ge yatırımlarının sektörün sürdürülebilirlik ihtiyaçlarını karşılamakta yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır (Guzowska et al., 2021).

Stratejik teknoloji yatırımlarının, yalnızca Ar-Ge istihdamını artırmakla kalmayıp, sektörün genel iş gücü yapısını dönüştürmede etkili olduğu görülmektedir. Bu durum, enerji sektörünün iklim değişikliği, dijitalleşme ve sürdürülebilir kalkınma hedefleriyle şekillenen yeni gereksinimlere nasıl yanıt verdiğini anlamak açısından kritik bir rol oynamaktadır.

Sonuç olarak, enerji sektöründe Ar-Ge istihdamının gelişimi, hem sektörel dönüşümün hem de genel ekonomik yapının yeniden şekillendiği bir süreçte işaret etmekte-

dir. Enerji sektörünü diğer sektörlerle karşılaştırmalı olarak ele almak, Ar-Ge yatırımlarının yalnızca teknolojik değil, aynı zamanda istihdam ve sosyal etkiler açısından nasıl yönlendirileceğine dair daha bütüncül bir anlayış sunmaktadır. Bu çerçevede, enerji Ar-Ge'si yalnızca yeniliği değil, istihdamın kalitesini ve sürdürülebilirliğini de şekillendiren stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir.

Ar-Ge İstihdamında Uzun Dönemli Eğilimler ve Kalitatif Boyutlar

Enerji sektöründe Ar-Ge istihdamına yönelik uzun dönemli eğilimler, yalnızca teknolojik gelişmelerin değil, aynı zamanda iklim değişikliğiyle mücadele çerçevesinde artan politika baskılarının ve sürdürülebilirlik hedeflerinin etkisiyle şekillenmektedir. Sektörün düşük karbon ekonomisine geçiş sürecinde Ar-Ge faaliyetlerinin önemi artarken, Avrupa'daki enerji hizmet sağlayıcıları arasında yapılan araştırmalar bu yatırımların hâlâ belirgin ölçüde verimsizlik ve dengesizlik barındırdığını göstermektedir (Guzowska et al., 2021). Her ne kadar inovatif teknolojilerin çevresel performans üzerinde olumlu etkileri olduğu kabul edilse de, mevcut Ar-Ge yatırımlarının sektörün sürdürülebilir kalkınma hedeflerini karşılamada yetersiz kaldığı vurgulanmaktadır (Inglesi-Lotz, 2017).

Bu çerçevede enerji piyasalarının serbestleşmesi, Ar-Ge faaliyetlerinde hem kamu hem özel sektör aktörleri arasında iş birliğine dayalı yeni girişimleri teşvik etmiştir. Yenilenebilir enerji çözümlerine yönelim, yalnızca teknolojik gelişimi değil aynı zamanda istihdamı da etkilemekte; bu süreçte Ar-Ge'nin istihdam yaratıcı etkisi daha görünür hale gelmektedir (Costa-Campi & García-Quevedo, 2017; Erdoğan, 2013). Bu gelişmeler, Ar-Ge'nin yalnızca bilimsel çıktı üretmekten öte, ekonomik değer yaratma ve iş gücü piyasasını dönüştürme kapasitesine de sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, Ar-Ge faaliyetlerinin sektörel düzeydeki istihdam artışına etkisi, yalnızca yatırımların miktarıyla değil, aynı zamanda bu yatırımların nasıl yapılandırıldığıyla da ilişkilidir. Literatürde, firma düzeyinde Ar-Ge faaliyetlerinin istihdam artışıyla pozitif yönde ilişkili olduğu saptanmış; bu da stratejik teknoloji yatırımlarının yalnızca kısa vadeli değil, uzun vadeli istihdam politikaları açısından da önem taşıdığını göstermiştir (Fukao et al., 2017). Özellikle açık inovasyon ve iş birliğine dayalı modellerin yaygınlaşması, firmaların yenilikçilik kapasiteleriyle birlikte istihdam yaratma potansiyellerini de artırmaktadır.

Bu eğilimleri daha iyi anlamak adına Ar-Ge istihdamındaki artışın yalnızca niceliksel değil, niteliksel boyutları da dikkate alınmalıdır. Özellikle son dönemde veri bilimi, yapay zekâ ve enerji depolama gibi alanlarda yaşanan hızlı teknolojik gelişmeler, Ar-Ge iş gücünün uzmanlık alanlarına göre yeniden yapılandığını göstermektedir. Bu alanlarda yoğunlaşan istihdam artışı, sektörel ihtiyaçların farklılaştığını ve firmaların daha yüksek nitelikli iş gücüne yöneldiğini göstermektedir (Chun et al., 2015; Han et al., 2017).

Bununla birlikte, bu istihdam artışlarının kalıcı bir dönüşüme mi işaret ettiği, yoksa geçici piyasa baskılarının sonucu mu olduğu literatürde tartışmalı bir konudur. Bazı araştırmalar, yüksek teknoloji sektörlerinde Ar-Ge istihdamının sürdürülebilirliğini, kurumsal yapılar ve işlevsel entegrasyon derecesine bağlamaktadır (Yeh & Chang, 2019). Firmaların Ar-Ge birimlerini iç süreçlere entegre etme biçimi, yalnızca ino-

vasyonun etkinliğini değil, istihdamın sürekliliğini de belirlemektedir. Öte yandan, özellikle enerji gibi politikalara duyarlı sektörlerde, finansman ve düzenleyici değişiklikler bu yatırımlarda istikrarsızlık yaratmakta ve istihdamda dalgalanmalara yol açmaktadır (Erdoğan, 2013).

Bu tartışmalar ışığında, Ar-Ge istihdamında gözlemlenen artışın değerlendirilmesinde, yapısal dönüşüm dinamiklerinin yanında firma ölçeği, esneklik kapasitesi ve iş birliği ağları da dikkate alınmalıdır. KOBİ'lerin Ar-Ge verimliliği, sınırlı kaynaklarına rağmen çevik yapıları sayesinde zaman zaman büyük firmalara kıyasla daha yüksek olabilmekte; bu durum, özellikle açık inovasyon stratejileriyle desteklendiğinde etkili sonuçlar doğurmaktadır (Chung & Kim, 2023; Xu & Jaewoo, 2018).

Bütün bu değerlendirmeler, yalnızca istihdam rakamlarına değil, bu istihdamın niteliğine ve sürdürülebilirliğine odaklanan bir analiz ihtiyacını da ortaya koymaktadır. Rekabetin yoğunlaştığı ve teknoloji yatırımlarının hızlandığı bir ortamda, Ar-Ge istihdamının ne derece kalıcı olduğu, hangi becerilere odaklandığı ve ne tür organizasyonel modellerle desteklendiği belirleyici olacaktır. Bu noktada, piyasa baskılarının ötesine geçebilen ve stratejik esneklik barındıran Ar-Ge politikaları, istihdam artışını geçici olmaktan çıkarak yapısal bir dönüşümün parçası hâline getirebilir (Park, 2014; Jang et al., 2016).

Son olarak, Ar-Ge verilerinin ölçülme biçimi ve kullanılan kaynaklardaki farklılıklar, enerji sektöründeki eğilimleri anlamada karşılaşılan yöntemsel bir zorluğu temsil etmektedir. Literatürde genellikle ihmal edilen bu yöntemsel mesele, TÜİK ve TCMB gibi ulusal veri kaynakları arasında karşılaştırmalar yapıldığında daha belirgin hâle gelmektedir. Mevcut çalışma, bu bağlamda yalnızca sektörel analizle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda Ar-Ge göstergelerinin güvenilirliğine dair metodolojik bir sorgulama da sunmaktadır. Bu yönüyle, politika yapıcılar ve araştırmacılar için daha sağlıklı veri yorumları geliştirmeye olanak tanımaktadır.

Bulgular

Tablo 1

Yıllara göre toplam çalışan sayısı

Yıllar	Toplam Özel Sektör	İmalat	Enerji	Bilgi İletişim
2009	7 659 993	2 446 743	66 718	138 218
2010	8 591 367	2 715 407	66 714	149 091
2011	9 640 456	2 985 032	69 914	163 503
2012	10 447 094	3 214 487	75 533	167 572
2013	11 120 539	3 405 145	86 562	173 164
2014	11 786 208	3 578 497	93 132	181 046
2015	12 202 940	3 618 819	98 581	191 465
2016	11 925 584	3 569 546	102 159	194 274
2017	12 955 489	3 777 970	118 041	204 962

2018	12 135 362	3 713 170	111 827	201 704
2019	12 206 943	3 829 244	113 634	212 530
2020	12 826 306	4 158 179	114 481	227 543
2021	13 909 106	4 434 765	122 017	259 651
2022	14 921 803	4 734 881	133 077	287 969
2023	15 244 039	4 694 654	137 837	289 599

Kaynak: TÜİK Ücretli Çalışan İstatistikleri, Şubat 2025

(Veriler aylık düzeyde paylaşılmaktadır. Her yılın Aralık ayı o yılı temsil etmesi için seçilmiştir.)

Tablo 1 Türkiye’de 2009 ile 2023 yılları arasındaki genel, özel sektör, imalat, enerji (elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme) ve bilgi iletişim sektörlerindeki istihdam değişimini göstermektedir. Bu veriler, TÜİK Ücretli Çalışan İstatistikleri’nden (Şubat 2025) alınmıştır ve her yılın Aralık ayı verilerini temsil etmektedir.

Genel toplam çalışan sayısı 2009’da 7,659,993 iken, 2023’te 15,244,039’a yükselerek yaklaşık iki katına çıkmıştır. Bu, zaman içinde genel istihdamda önemli bir artışı göstermektedir. En düşük çalışan sayısı 2009’da, en yüksek ise 2023’te kaydedilmiştir.

İmalat sektöründeki çalışan sayısı da genel toplamla paralel bir artış göstermiştir. 2009’da 2,446,743 olan bu sayı, 2023’te 4,694,654’e ulaşmıştır. 2015’ten 2016’ya ve 2017’den 2018’e doğru hafif düşüşler yaşanmış olsa da, genel eğilim artış yönündedir.

Enerji sektöründe çalışan sayısı 2009’da 66,718 iken, 2023’te 137,837’ye çıkarak neredeyse iki kat artmıştır. Bu sektörde 2009’dan 2010’a ve 2017’den 2018’e doğru düşüşler gözlemlenmiştir, ancak genel olarak artış eğilimi mevcuttur. Literatürde, özellikle yenilenebilir enerjiye geçiş sürecinin enerji sektöründe yeni istihdam fırsatları yarattığı belirtilmektedir.

Bilgi ve İletişim sektöründe çalışan sayısı 2009’da 138,218 iken, 2023’te 289,599’a yükselmiştir. Bu sektör, 2017’den 2018’e doğru hafif bir düşüşler yaşamasına rağmen, genel olarak istikrarlı bir büyüme göstermiştir. Bu da dijitalleşme ve yenilikçilik kapasitesi açısından stratejik öneminin arttığını göstermektedir.

Genel olarak, Tablo 1 incelendiğinde, 2009-2023 dönemi boyunca Türkiye’deki tüm sektörlerde ve özellikle özel sektörde, imalat, enerjide ve bilgi iletişimde toplam çalışan sayısında kayda değer bir artış olduğu görülmektedir. Bu artışlar, Türkiye ekonomisinin büyüme hedefleri ve sürdürülebilir kalkınma politikaları çerçevesinde enerji sektörü gibi stratejik alanların istihdam üretme kapasitesinin önemini vurgulamaktadır.

Tablo 2

Yıllara göre Ar-Ge çalışan sayısı

Yıllar	Toplam Özel Sektör	İmalat	Enerji	Bilgi İletişim
2010	45 922	24 588	177	13 169
2011	55 023	28 781	260	15 769
2012	61 378	31 334	230	18 906

2013	69 018	33 425	232	22 768
2014	73 737	34 948	311	24 593
2015	77 551	36 070	268	26 478
2016	83 873	40 287	302	29 270
2017	101 404	49 870	258	34 241
2018	118 867	56 516	353	39 924
2019	129 798	62 012	376	43 697
2020	144 674	67 711	473	49 961
2021	166 914	75 509	571	61 716
2022	190 123	83 205	649	74 068
2023	206 929	89 148	767	82 147

Kaynak: TÜİK <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr>

Tablo 2'ye göre, Türkiye'de 2010-2023 dönemi boyunca Ar-Ge çalışan sayısı genel olarak önemli bir artış göstermiştir. Toplam Ar-Ge çalışanı sayısı 2010'da 45.922 iken 2023'te 206.929'a yükselerek yaklaşık dört buçuk katına çıkmıştır, bu da ülkenin Ar-Ge'ye verdiği önemin ve yatırımların arttığını göstermektedir. Bu artış eğilimi, imalat sektöründe de gözlemlenmekte olup, imalat sektörü Ar-Ge çalışan sayısı 2010'da 24.588'den 2023'te 89.148'e yükselmiştir. Söz konusu artış hızı özel sektör genelindeki artış hızının bir az altında kalmıştır. Bu durumun özellikle Bilgi ve İletişim sektöründeki performansın çok yüksek olmasından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Enerji sektörü, 2010'daki 177 Ar-Ge çalışanından 2023'te 767'ye çıkarak sürekli bir büyüme sergilemiş, bu da enerji sektörünün teknolojik yeniliklere daha fazla (imalat sektöründeki artış hızının üzerinde bir hızla) yöneldiğini göstermektedir. Bilgi ve İletişim sektörü Ar-Ge çalışan sayısında, 2010'da 13.169'dan 2023'te 82.147'ye ulaşarak büyük bir artış kaydetmiştir. 6 Katın üzerinde bir artışın yaşandığı görülmektedir. Genel olarak, Ar-Ge istihdamındaki bu artışlar, Türkiye'nin genel anlamda Ar-Ge yoğunlaşmasını artırdığını göstermekle birlikte teknolojik kapasite oluşumu ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından stratejik bir işlev gören enerji sektörünün de dönüşümünü yansıtmaktadır.

4 yıllık dönemsel artışlara bakıldığında özellikle 2019-2023 döneminde %104'lük bir artış oranıyla enerji sektörünün diğer sektörleri geride bıraktığı görülmüştür (Tablo 4). Bu hızlı artış, enerji sektörünün son yıllarda veri analitiği ve yapay zeka gibi yeni teknolojilere yönelmesiyle ilişkilendirilmekte ve sektörün dijitalleşme ve yeşil dönüşüm gereksinimlerine yanıt verdiğini düşündürmektedir. Ancak, bu yüksek artış oranına rağmen, enerji sektörünün toplam çalışanları içindeki Ar-Ge çalışan oranı 2023'te %0.56 ile Türkiye ticari sektör ortalamasının (%1.36) ve imalat sektörü ortalamasının (%1.96) oldukça altında kalmaya devam etmektedir (Tablo 3).

Tablo 3

Toplam çalışanlar içindeki Ar-Ge çalışanlarının oranı

Yıllar	Toplam Özel Sektör	İmalat	Enerji	Bilgi İletişim
2010	0,53%	0,91%	0,27%	8,8%
2011	0,57%	0,96%	0,37%	9,6%
2012	0,59%	0,97%	0,30%	11,3%
2013	0,62%	0,98%	0,27%	13,1%
2014	0,63%	0,98%	0,33%	13,6%
2015	0,64%	1,00%	0,27%	13,8%
2016	0,70%	1,13%	0,30%	15,1%
2017	0,78%	1,32%	0,22%	16,7%
2018	0,98%	1,52%	0,32%	19,8%
2019	1,06%	1,62%	0,33%	20,6%
2020	1,13%	1,63%	0,41%	22,0%
2021	1,20%	1,70%	0,47%	23,8%
2022	1,27%	1,76%	0,49%	25,7%
2023	1,36%	1,90%	0,56%	28,4%

Kaynak: Tablo 2'deki değerlerin Tablo 1'e bölünmesiyle elde edilmiştir.

Tablo 3, 2010-2023 dönemi için toplam çalışanlar içindeki Ar-Ge çalışanlarının oranlarını sektör bazında detaylı bir şekilde sunmaktadır. Bu oranlar, Türkiye'nin genel Ar-Ge yoğunluğunu ve sektörel farklılıkları gözler önüne sermektedir:

Toplam çalışanlar içindeki Ar-Ge çalışanlarının oranı 2010'da %0,53 iken, istikrarlı bir artışla 2023'te %1,36'ya yükselmiştir. İmalat sektöründe ise bu oran 2010'da %0,91'den başlayarak 2023'te %1,90'a ulaşmış ve genel ortalamanın üzerinde bir Ar-Ge yoğunluğunu sürdürmüştür. Bu durum, Ar-Ge faaliyetlerinin hem özel sektörün genelinde hem de imalat sektöründe giderek daha fazla önem kazandığını göstermektedir.

Enerji sektöründe Ar-Ge çalışanlarının oranı 2010'da %0,27 iken 2023'te %0,56'ya yükselmiştir. Bu oran, incelenen sektörler arasında 2023 itibarıyla en düşük seviyedir. Enerji sektörünün 2023 yılındaki Ar-Ge personel oranının (%0,56) hala Türkiye ticari sektör ortalamasının (%1,36) ve imalat sektörü ortalamasının (%1,96) oldukça altındadır. Oranların 13 yıl içindeki artış hızına bakıldığında da enerji sektörünün Ar-Ge'ye yoğunlaşma hızının diğer sektörlerin gerisinde olduğu anlaşılmaktadır.

Bilgi ve İletişim sektöründe Ar-Ge çalışanlarının toplam çalışanlar içindeki oranı 2010'da %8,8 iken, 2023'te %28,4'e çıkarak dikkat çekici bir artış göstermiştir. Bu sektörün Ar-Ge çalışmalarını hem niceliksel bazda artırdığı hem de Ar-Ge'ye giderek daha fazla yoğunlaştığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4

Ar-Ge çalışanlarının 4 yıllık artış oranlarının karşılaştırılması

Yıllar	Toplam	İmalat	Enerji	Bilgi İletişim
2011-2015	40,9%	25,3%	3,1%	67,9%
2015-2019	67,4%	71,9%	40,3%	65,0%
2019-2023	59,4%	43,8%	104,0%	88,0%
2011-2015	40,9%	25,3%	3,1%	67,9%

Sektörlerin artış seyrini dönemselleştirmek ve bu dönemlerin dinamiklerini anlayabilmek için 4 yıllık periyotlar bazındaki artışlar da karşılaştırılmıştır. Tablo 4, Türkiye’de Ar-Ge çalışan sayılarındaki 4 yıllık artış oranlarını sektörler bazında karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Bu tabloya göre, enerji sektörünün Ar-Ge istihdamı gelişiminde zaman içinde önemli farklılıklar gözlemlenmektedir. 2019 yılına kadar olan dönemde enerji sektörünün toplam çalışan sayısı içindeki Ar-Ge çalışanlarının oranı %0,27-%0,33 arasında seyretmiş ve diğer sektörlerin gelişim hızının gerisinde kalmıştır (Tablo3). 2011-2015 döneminde tüm ticari sektörler %41, imalat sektörü %25 ve bilgi ve iletişim sektörü %68 gibi büyük artışlar kaydederken, enerji sektörü sadece %3’lük bir artış göstermiştir. Benzer şekilde, 2015 ile 2019 kıyaslandığında da enerji sektörü diğer sektörlerin gerisinde kalmıştır. Ancak, 2020 yılından itibaren tabloda farklı bir durum ortaya çıkmıştır. 2023 yılında, 2019’a kıyasla enerji sektöründeki Ar-Ge çalışanlarındaki artış oranı %100’ün üzerine çıkarak diğer sektörlerdeki artış oranını geride bırakmıştır. Bu hızlı artışın, özellikle son yıllarda veri analitiği ve veriye dayalı yapay zeka teknolojilerinin gelişimiyle elektrik üretim sektörünün Ar-Ge çalışmalarını yapabilecekleri sınırlarını çok genişletmesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, sektörde Ar-Ge çalışmalarının farklı nace koduna sahip yeni firmalara kaydırıldığı da gözlemlenebilmektedir. Bu sebeple artışın daha yüksek olup olmadığı bu faktörler gözetilerek araştırılmalıdır.

Tüm bu ivmelenmeye rağmen, enerji sektörünün Ar-Ge personelinin toplam çalışanlar içindeki oranı (%0,56) hala Türkiye ticari sektör ortalamasının (%1,36) ve imalat sektörü ortalamasının (%1,96) oldukça altındadır. Genel olarak, 2010 yılından itibaren toplam gelişime bakıldığında da enerji sektörünün Türkiye ticari ortalamasının altında bir gelişim yaşadığı belirtilmiştir.

Tablo 5

Ar-Ge giderleri (1.000 TL, Gelir Tablosu, GT)

Sektör	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enerji	17,690.6	15,869.0	13,976.1	29,194.7	21,700.2	33,473.6	50,599.9	53,510.0
İmalat	1,075,707.2	1,207,306.5	1,479,432.4	1,773,410.3	2,145,280.7	2,299,236.9	2,542,061.5	3,019,342.1
Yazılım	295,788.7	354,837.4	419,040.4	528,627.7	693,406.7	805,534.8	1,001,275.8	1,367,533.2
Tüm Özel Sektör	2,248,741.8	2,353,533.9	3,304,835.1	3,590,199.7	4,035,547.4	4,840,632.8	5,560,641.2	6,040,279.1
Sektör	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Enerji	70,229.3	62,326.4	70,248.1	45,573.4	66,569.7	182,267.2	259,792.7	
İmalat	3,526,102.4	4,587,840.5	5,824,415.5	6,698,487.2	9,380,608.8	19,757,598.8	28,946,260.1	
Yazılım	1,670,124.0	2,272,145.2	2,988,927.1	3,934,894.4	6,182,928.4	12,321,614.3	24,347,842.7	
Tüm Özel Sektör	7,818,074.5	10,554,216.5	15,863,899.4	17,539,196.5	27,003,494.6	62,220,304.3	77,047,667.7	

Kaynak: Merkez Bankası Sektör Bilançoları 2023 (<https://www3.tcmb.gov.tr/sektor/#/tr>)

Tablo 5, Merkez Bankasının gelir tablolarından alınan Ar-Ge giderlerini sunmaktadır. Enerji sektörünün Ar-Ge giderleri 2009'daki 17.690.600 TL'den 2023'te 259.792.700'e yükselmiştir. Enerji sektörü için Ar-Ge giderleri 2009'da 17.690.600'den, 2015'te 50.599.900'a, 2019'da 70.248,1 birime yükselmiş ve 2023'te 259.792,7 birime ulaşmıştır. İmalat sektörü Ar-Ge giderleri 2009'da 1.075.707.200 TL'den, 2023'te 28.946.260.100 TL'ye ulaşmıştır. Yazılım sektörü Ar-Ge giderleri 2009'da 295.788.700 TL'den 2023'te 24.347.842.700 TL'ye ulaşmıştır. Tüm sektörlerin Ar-Ge giderleri 2009'da 2.248.741.800 TL'den, 2023'te 77.047.667.700 TL'ye ulaşmıştır.

Tablo 6

Ar-Ge harcaması (TÜİK)

Sektör	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enerji	13,728	7,845	11,721	24,616	30,638	31,793	45,888	51,307
İmalat		2,035,381.1	2,569,482.0	3,124,160.0	3,610,675.0	4,541,149.9	6,643,800.8	8,486,814.5
Yazılım		1,109,009.0	1,137,010.1	1,478,267.3	1,770,208.4	2,315,632.0	3,126,275.2	4,329,827.5
Tüm Özel Sektör		3,942,908.4	4,817,272.5	5,891,214.7	7,031,519.0	8,760,019.8	11,207,003.4	14,580,948.5

Sektör	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Enerji	42,851	51,019	62,987	80,327	157,735	357,710	766,534
İmalat	10,776,276.9	14,934,108.8	19,426,553.6	22,091,880.8	35,612,660.0	72,311,260.6	139,469,000.0
Yazılım	5,247,370.4	6,903,873.1	8,297,924.6	11,031,678.3	18,297,420.5	33,438,647.6	72,076,190.3
Tüm Özel Sektör	18,415,556.2	25,326,867.5	31,940,686.5	38,505,513.0	62,400,170.0	122,027,928.2	245,966,161.2

Kaynak: TÜİK (<https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr>)

Tablo 6, TÜİK anket verilerine göre araştırma ve geliştirme (Ar-Ge) harcamalarını 2009'dan 2023'e kadar olan dönem için sektörler bazında sunmaktadır. Enerji sektörü Ar-Ge harcamaları 2009'da 13.728.000 TL'den, 2023'te 766.534.000 TL'ye ulaşmıştır. İmalat sektörü Ar-Ge harcamaları 2010'da 2.035.381.100 TL'den, 2023'te 139.469.000.000 TL'ye ulaşmıştır. Yazılım sektörü Ar-Ge harcamaları 2010'da 1.109.009.000 TL'den, 2023'te 72.076.190.300 TL'ye ulaşmıştır. Tüm sektörlerin Ar-Ge harcamaları 2009'da 3.942.908.400 TL'den 2023'te 245.966.161.200 TL'ye ulaşmıştır.

Tablo 7

Ar-Ge G. (GT) / Net Satış

Sektör	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enerji	0.023%	0.019%	0.014%	0.024%	0.014%	0.019%	0.026%	0.028%
İmalat	0.234%	0.222%	0.204%	0.225%	0.245%	0.228%	0.225%	0.244%
Yazılım	5.571%	5.712%	5.210%	5.577%	5.526%	5.375%	5.310%	6.233%
Tüm Özel Sektör	0.148%	0.130%	0.142%	0.135%	0.135%	0.140%	0.143%	0.142%

Sektör	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Enerji	0.032%	0.022%	0.020%	0.011%	0.011%	0.008%	0.012%
İmalat	0.220%	0.217%	0.242%	0.234%	0.189%	0.191%	0.216%
Yazılım	5.914%	6.381%	6.685%	6.409%	6.899%	6.627%	7.521%
Tüm Özel Sektör	0.145%	0.155%	0.201%	0.189%	0.183%	0.189%	0.163%

Kaynak: Merkez Bankası Sektör Bilançoları 2023 (<https://www3.tcmb.gov.tr/sector/#/tr>) ve Hesaplama

Tablo 7, Gelir Tablosu'ndan (GT) alınan Ar-Ge giderlerinin yine Gelir Tablosundaki net satışlar içindeki payını yüzde olarak 2009-2023 dönemi için sektörler bazında sunmaktadır. Enerji sektörü için Ar-Ge giderlerinin net satışa oranı 2009'da %0,023 iken, 2015'te %0,026, 2019'da %0,020 olmuş ve 2023'te %0,012'ye düşmüştür. İmalat sektörü için oran 2009'da %0,234 iken, 2015'te %0,225, 2019'da %0,242 olmuş ve 2023'te %0,216'ya düşmüştür. Yazılım sektörü için oran 2009'da %5,571 iken, 2015'te %5,310, 2019'da %6,685 olmuş ve 2023'te %7,521'e yükselmiştir. Tüm sektörler (Toplam) için oran 2009'da %0,148 iken, 2015'te %0,143, 2019'da %0,201 olmuş ve 2023'te %0,163 olmuştur.

Tablo 8

Ar-Ge H. (TÜİK)/Net Satış

Sektör	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enerji	0.018%	0.009%	0.012%	0.020%	0.020%	0.018%	0.024%	0.026%
İmalat		0.373%	0.355%	0.397%	0.413%	0.450%	0.589%	0.687%
Yazılım		17.852%	14.137%	15.596%	14.107%	15.453%	16.580%	19.734%
Tüm Özel Sektör		0.218%	0.207%	0.222%	0.236%	0.253%	0.289%	0.343%
Sektör	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Enerji	0.020%	0.018%	0.018%	0.019%	0.025%	0.016%	0.036%	
İmalat	0.674%	0.706%	0.807%	0.772%	0.718%	0.699%	1.041%	
Yazılım	18.582%	19.390%	18.560%	17.969%	20.415%	17.984%	22.263%	
Tüm Özel Sektör	0.340%	0.372%	0.406%	0.414%	0.424%	0.371%	0.521%	

Kaynak: TÜİK (<https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?locale=tr>), Merkez Bankası Sektör Bilançoları 2023 (<https://www3.tcmb.gov.tr/sector/#/tr>) ve Hesaplama

Tablo 8, TÜİK'in anket verilerine göre Ar-Ge harcamalarının Merkez Bankasının sektör bilançolarındaki net satışlar içindeki payını yüzde olarak 2009-2023 dönemi için sektörler bazında sunmaktadır. Enerji sektörü için Ar-Ge harcamalarının net satışa oranı 2009'da %0,018 iken, 2015'te %0,024, 2019'da %0,018 olmuş ve 2023'te %0,036'ya yükselmiştir. İmalat sektörü için oran 2010'da %0,373 iken, 2015'te %0,687, 2019'da %0,772 olmuş ve 2023'te %1,041'e yükselmiştir. Yazılım sektörü için oran 2010'da %17,852 iken, 2015'te %19,734, 2019'da %17,969 olmuş ve 2023'te %22,263'e yükselmiştir. Tüm sektörler (Toplam) için oran 2010'da %0,218 iken, 2015'te %0,343, 2019'da %0,414 olmuş ve 2023'te %0,521'e yükselmiştir.

Tablo 9

Ar-Ge G. (GT) / Faaliyet Gideri

Sektör	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enerji	0.396%	0.318%	0.233%	0.444%	0.352%	0.470%	0.598%	0.565%
İmalat	2.258%	2.240%	2.312%	2.470%	2.636%	2.471%	2.414%	2.550%
Yazılım	19.374%	20.103%	19.969%	20.440%	21.375%	20.841%	20.876%	24.543%
Tüm Özel Sektör	1.376%	1.265%	1.471%	1.415%	1.407%	1.467%	1.477%	1.425%

Sektör	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Enerji	0.663%	0.549%	0.506%	0.297%	0.257%	0.340%	0.328%
İmalat	2.573%	2.697%	2.888%	2.916%	2.752%	2.810%	2.691%
Yazılım	24.895%	27.194%	26.968%	29.867%	24.604%	24.872%	24.878%
Tüm Özel Sektör	1.591%	1.763%	2.240%	2.273%	2.383%	2.669%	1.992%

Kaynak: Merkez Bankası Sektör Bilançoları 2023 (<https://www3.tcmb.gov.tr/sektor/#/tr>) ve Hesaplama

Tablo 9, Gelir Tablosu'ndan (GT) alınan Ar-Ge giderlerinin faaliyet giderleri içindeki payını yüzde olarak 2009-2023 dönemi için sektörler bazında sunmaktadır. Enerji sektörü için Ar-Ge giderlerinin faaliyet giderine oranı 2009'da %0,396 iken, 2015'te %0,598, 2019'da %0,506 olmuş ve 2023'te %0,328'e düşmüştür. İmalat sektörü için oran 2009'da %2,258 iken, 2015'te %2,414, 2019'da %2,888 olmuş ve 2023'te %2,691 olmuştur. Yazılım sektörü için oran 2009'da %19,374 iken, 2015'te %20,876, 2019'da %26,968 olmuş ve 2023'te %24,878'e yükselmiştir. Tüm sektörler (Toplam) için oran: 2009'da %1,376 iken, 2015'te %1,477, 2019'da %2,240 olmuş ve 2023'te %1,992'ye yükselmiştir.

Tablo 10

Kar /net Satış

Sektör	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Enerji	4.368%	8.008%	0.513%	5.505%	-3.596%	-1.533%	-2.651%	-0.103%
İmalat	3.933%	4.575%	2.938%	4.321%	3.425%	4.736%	4.232%	4.461%
Yazılım	8.239%	9.637%	3.205%	10.985%	8.341%	7.516%	9.419%	5.895%
Tüm Özel Sektör	4.361%	4.490%	1.929%	4.077%	2.692%	3.087%	3.034%	2.267%

Sektör	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Enerji	0.532%	-8.106%	5.762%	1.610%	-14.148%	2.651%	0.728%
İmalat	6.303%	5.545%	5.703%	7.723%	9.186%	9.151%	8.778%
Yazılım	12.974%	14.726%	15.132%	18.245%	22.255%	18.245%	17.248%
Tüm Özel Sektör	3.760%	2.028%	3.945%	3.356%	3.042%	5.696%	4.900%

Kaynak: Merkez Bankası Sektör Bilançoları 2023 (<https://www3.tcmb.gov.tr/sektor/#/tr>) ve Hesaplama

Tablo 10, net satışlar üzerinden karlılık oranlarını yüzde olarak 2009-2023 dönemi için sektörler bazında sunmaktadır. Enerji sektörü için karlılık oranı 2009'da %4,368 iken, 2015'te -%2,651 (zarar), 2019'da %5,762 olmuş ve 2023'te %0,728'e düşmüştür. Belirlenen 15 yıllık dönemde 2013, 2014, 2015, 2016, 2018 ve 2021 yıllarında zarar (negatif karlılık) edilmiştir. İmalat sektörü için oran 2009'da %3,933 iken, 2015'te %4,232, 2019'da %5,703 olmuş ve 2023'te %8,778'e yükselmiştir. Yazılım sektörü için oran 2009'da %8,239 iken, 2015'te %9,419, 2019'da %15,132 olmuş ve 2023'te %17,248'e yükselmiştir. Tüm sektörler (Toplam) için oran 2009'da %4,361 iken, 2015'te %3,034, 2019'da %3,945 olmuş ve 2023'te %4,900'e yükselmiştir.

Tartışma ve Sonuç

Türkiye'deki enerji, imalat ve yazılım sektörlerinin 2009-2023 dönemindeki Ar-Ge harcamaları, bu harcamaların net satışlar ve faaliyet giderleri içindeki payları ile kârlılık oranları, sektörler arası önemli yapısal farklılıkları ve dinamikleri ortaya koymaktadır. Enerji sektörü, Türkiye ekonomisi için stratejik bir öneme sahip olup dijitalleşme ve yeşil dönüşüm süreçlerinin etkisiyle Ar-Ge ve istihdam yapısında belirgin değişimler yaşamaktadır.

Hem Gelir Tablosu (GT) verilerine (Tablo 5) hem de TÜİK anket verilerine (Tablo 6) göre tüm sektörlerde Ar-Ge harcamalarında 2009'dan 2023'e kadar önemli artışlar gözlemlenmektedir. Enerji sektörünün Ar-Ge giderleri 2009'da 18 milyon TL'den 2023'te 259 milyon TL'ye yükselmiştir. Ancak enerji sektöründeki Ar-Ge giderleri artışlarının genellikle diğer sektörlerin (imalat, yazılım ve genel ticari sektörler) altında kaldığı görülmektedir. Örneğin, 2019-2015 döneminde enerji sektörü %38,8 artarken imalat %129,1, yazılım %198,5 ve toplam sektör %185,3 artış kaydetmiştir. TÜİK verilerine göre enerji sektörü Ar-Ge harcamaları 2009'da 13.728 birimden 2023'te 766.534 birime ulaşarak önemli bir artış göstermiştir. Özellikle son 4 yıllık dönemde (2019-2023), enerji sektöründeki gelişimin diğer sektörlerin oldukça ilerisinde olduğu ve bunun Ar-Ge iş gücü verisiyle de örtüştüğü söylenebilir. Bu hızlı artışın, veri analitiği ve yapay zeka teknolojilerinin enerji sektöründeki Ar-Ge çalışmalarının sınırlarını genişletmesiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Hem Gelir Tablosu (GT) hem de TÜİK verilerinde (Tablo 7 ve 8), enerji sektörünün net satışlar içindeki Ar-Ge payı oldukça düşüktür. Benzer şekilde, faaliyet giderleri içindeki Ar-Ge giderleri oranı da düşük seyretmekte ve son yılların performansının önceki yılların altında kaldığı gözlemlenmektedir (Tablo 9). 2023 verileri hariç, enerji sektörünün bu oranlarda genel ticari sektörün yükseliş trendine benzer bir trend göstermediği vurgulanabilir.

Türkiye'de özel sektördeki toplam Ar-Ge çalışanı sayısı 2010'da 45.922 iken 2023'te 206.929'a yükselerek yaklaşık dört buçuk katına çıkmıştır. 2019 yılına kadar olan dönemde enerji sektörünün toplam çalışan sayısı içindeki Ar-Ge çalışanlarının oranı düşük seyretmiş ve diğer sektörlerin gerisinde kalmıştır. Örneğin, 2011-2015 döneminde enerji sektörü sadece %3'lük bir artış gösterirken diğer ticari sektörler %41, imalat %25 ve bilgi ve iletişim sektörü %68 artmıştır. Ancak, 2020 yılından itibaren tabloda farklı bir durum ortaya çıkmıştır: 2023 yılında, 2019'a kıyasla enerji sektöründeki Ar-Ge çalışanlarındaki artış oranı %100'ün üzerine çıkarak diğer sektörlerdeki artış oranını geride bırakmıştır. Bu hızlı artış, özellikle veri analitiği ve yapay zeka teknolojilerinin

gelişimiyle ilişkilendirilmektedir. Enerji sektörünün toplam çalışanlar içindeki Ar-Ge çalışanlarının oranının (%0,56) hâlâ Türkiye ticari sektör ve imalat sektörü ortalamasının (sırasıyla %1,36 ve %1,96) oldukça altında olduğu belirtilebilir.

Enerji sektörünün karlılığında ciddi bir istikrarsızlık söz konusudur. Tablo 10 incelendiğinde 2009-2023 döneminde 6 yılda zarar (negatif karlılık) görüldüğü anlaşılmaktadır (2013, 2014, 2015, 2016, 2018 ve 2021). Enerji sektöründeki firmaların karlılık arttığında Ar-Ge'ye daha fazla kaynak aktardığına dair anlamlı bir ilişkinin verilerle doğrulanmadığı belirtilmiştir.

Veriler birlikte incelendiğinde, enerji sektörüne ilişkin verilerde bir tutarsızlık göze çarpmaktadır. Bu tutarsızlık, Merkez Bankası'nın gelir tablosu verileri ile TÜİK'in Ar-Ge faaliyetleri anket verileri arasındaki Ar-Ge harcamaları konusunda gözlemlenmektedir. TÜİK verilerinde Ar-Ge çalışan sayısı ile Ar-Ge harcamaları arasındaki trend karşılaştırıldığında iç tutarlılık söz konusudur ancak bu trend Merkez Bankası sektör Bilançolarındaki Ar-Ge harcamalarının değişimiyle karşılaştırıldığında önemli farklılıklar söz konusudur. Bu durumun, muhasebe mevzuatı ile anket beyanları arasındaki farklardan veya şirketlerin anket sorularına yanlış cevap vermesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir ve detaylı inceleme gerekmektedir. Buna karşılık, yazılım sektöründe bu iki veri seti arasında bir tutarlılık olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, enerji sektörünün Ar-Ge ve istihdam performansı, teknolojik kapasite oluşumu ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından kritik öneme sahiptir. Türkiye'de son yıllarda Ar-Ge alanında önemli bir kapasite gelişimi olduğu ve sektörlerin Ar-Ge'ye daha fazla yoğunlaştığı anlaşılmaktadır. Enerji sektörünün genel olarak bu gelişimin gerisinde kaldığı ancak son 4 yılda yeni bir atılım yaptığı görülmektedir. Bu atılımın devam edip etmeyeceği ve hangi yönde devam edeceği dikkatle takip edilmelidir. Bununla birlikte mevcut veri tutarlılıkları ve sektörün dinamikleri üzerine daha derinlemesine analizler yapılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Türkiye'nin enerji stratejilerinin insan kaynağı ve bilgi ekonomisi perspektifiyle yeniden yapılandırılması için bu tür analizler kritik bir zemin sunmaktadır.

Kaynakça/References

- Algül, Y., & Kaya, V. (2021). Comparison of employment impacts of renewable and fossil energy based electricity sectors: The case of Turkey. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 24(2), 421-439. <https://doi.org/10.29249/selcuksbmyd.969425>
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010). Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries. *Energy Policy*, 38(1), 656-660. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.09.002>
- Arvanitopoulos, T., & Agnolucci, P. (2020). The long-term effect of renewable electricity on employment in the United Kingdom. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110322>
- Barasa, L., Vermeulen, P., Knobens, J., Kinyanjui, B., & Kimuyu, P. (2019). Innovation inputs and efficiency: Manufacturing firms in sub-Saharan Africa. *European Journal of Innovation Management*, 22(1), 59-83. <https://doi.org/10.1108/EJIM-11-2017-0176>

- Barreto, C., Fluchtmann, J., Hijzen, A., Lombardi, S., Bennett, P., Bertheau, A., ... & Vejlin, R. (2024). The 'clean energy transition' and the cost of job displacement in energy-intensive industries. RBA Research Discussion Paper. <https://doi.org/10.47688/rdp2024-09>
- Bölük, G. (2013). Renewable energy: Policy issues and economic implications in Turkey. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 3(2), 153-167.
- Brettel, M., Heinemann, F., Engelen, A., & Neubauer, S. (2011). Cross-functional integration of R&D, marketing, and manufacturing in radical and incremental product innovations and its effects on project effectiveness and efficiency. *Journal of Product Innovation Management*, 28(2), 251-269. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2011.00795.x>
- Butkus, M., Dargenytė-Kacilevičienė, L., Matuzevičiūtė, K., Ruplienė, D., & Šeputienė, J. (2022). Do gender and age matter in employment–sectoral growth relationship over the recession and expansion. *Ekonomika*, 101(2), 38–51. <https://doi.org/10.15388/ekon.2022.101.2.3>
- Butkus, M., Dargenytė-Kacilevičienė, L., Matuzevičiūtė, K., Šeputienė, J., & Ruplienė, D. (2023). Age- and gender-specific output-employment relationship across economic sectors. *Ekonomický Časopis*, 71(1), 3–22. <https://doi.org/10.31577/ekoncas.2023.01.01>
- Černý, M., Brückner, M., Weinzettel, J., Wiebe, K., Kimmich, C., Kerschner, C., ... & Hubacek, K. (2022). Employment effects of the renewable energy transition in the electricity sector: An input-output approach. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4013339>
- Charfeddine, L., & Kahia, M. (2019). Impact of renewable energy consumption and financial development on CO₂ emissions and economic growth in the MENA region: A panel VAR approach. *Renewable Energy*, 139, 198–213. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.010>
- Chen, Y. (2019). Renewable energy investment and employment in China. *International Review of Applied Economics*, 33(3), 314-334. <https://doi.org/10.1080/02692171.2018.1513458>
- Chun, D., Chung, Y., & Bang, S. (2015). Impact of firm size and industry type on R&D efficiency throughout innovation and commercialisation stages: Evidence from Korean manufacturing firms. *Technology Analysis & Strategic Management*, 27(8), 895–909. <https://doi.org/10.1080/09537325.2015.1024645>
- Chung, H., & Kim, K. (2023). Can open innovation improve technological outcomes for digital transformation? Structural approach to strategic decisions of Korean ICT SMEs. *Managerial and Decision Economics*, 44(8), 4404–4421. <https://doi.org/10.1002/mde.3958>
- COBENEFITS. (2016). Co-benefits of climate action: Assessing Turkey's climate pledge. New Climate Institute. <https://cdn-tema.mncdn.com/Uploads/Cms/cobenefitsturkeyen.PDF>

- Costa-Campi, M., & García-Quevedo, J. (2017). Why do manufacturing industries invest in energy R&D? SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3091605>
- Costa-Campi, M., & García-Quevedo, J. (2019). Drivers of energy R&D in manufacturing industries. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 8(2). <https://doi.org/10.5547/2160-5890.8.2.mcos>
- Costa-Campi, M., García-Quevedo, J., & Trujillo-Baute, E. (2015). Challenges for R&D and innovation in energy. *Energy Policy*, 83, 193–196. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.04.012>
- Cui, J., Zhang, J., & Zheng, Y. (2018). Carbon pricing induces innovation: Evidence from China's regional carbon market pilots. In *AEA Papers and Proceedings* (108, pp. 453–457). 2014 American Economic Association. <https://doi.org/10.1257/pandp.20181027>
- Çakmak, Z. (2024). An overview of Türkiye's renewable energy outlook. *Mühendis ve Makina*, (717), 558–597. <https://doi.org/10.29249/selcuksbmyd.969425>
- Erdoğan, E. (2013). Implications of liberalization policies on government support to R&D: Lessons from electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 17, 110–118. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.030>
- Fu, B., Zhang, Y., Maani, S., & Wen, L. (2025). Green finance and job creation: Analyzing employment effects in China's manufacturing industry within green finance innovation and reform pilot zones. *Energy Economics*, 141, 108090. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.108090>
- Fukao, K., Ikeuchi, K., Kim, Y., & Kwon, H. (2017). Innovation and employment growth in Japan: Analysis based on microdata from the Basic Survey of Japanese Business Structure and Activities. *Japanese Economic Review*, 68(2), 200–216. <https://doi.org/10.1111/jere.12146>
- Garrett-Peltier, H. (2017). Green versus brown: Comparing the employment impacts of energy efficiency, renewable energy, and fossil fuels using an input-output model. *Economic Modelling*, 61, 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2016.11.012>
- Guzowska, M., Kryk, B., Michalak, D., & Szyja, P. (2021). R&D spending in the energy sector and achieving the goal of climate neutrality. *Energies*, 14(23), 7875. <https://doi.org/10.3390/en14237875>
- Hall, B., Lotti, F., & Mairesse, J. (2013). Evidence on the impact of R&D and ICT investments on innovation and productivity in Italian firms. *Economics of Innovation and New Technology*, 22(3), 300–328. <https://doi.org/10.1080/10438599.2012.708134>
- Han, C., Thomas, S., Yang, M., Ieromonachou, P., & Zhang, H. (2017). Evaluating R&D investment efficiency in China's high-tech industry. *The Journal of High Technology Management Research*, 28(1), 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.hitech.2017.04.007>

- Huseynli, B. (2023). Research and development expenditures and renewable energy: An empirical analysis in Türkiye. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 13(6), 179-184. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14601>
- Inglesi-Lotz, R. (2017). Social rate of return to R&D on various energy technologies: Where should we invest more? A study of G7 countries. *Energy Policy*, 101, 521-525. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.043>
- Islam, M., & Fatema, F. (2020). Innovations and firm-level efficiency: A comparative analysis between China and India. *European Journal of Innovation Management*, 24(2), 589-612. <https://doi.org/10.1108/EJIM-10-2019-0306>
- Jacobson, M., Delucchi, M., Bauer, Z., Goodman, S., Chapman, W., Cameron, M., ... & Yachanin, A. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *Joule*, 1(1), 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.07.005>
- Jang, H., Lee, S., & Suh, E. (2016). A comparative analysis of the change in R&D efficiency: A case of R&D leaders in the technology industry. *Technology Analysis & Strategic Management*, 28(8), 886-900. <https://doi.org/10.1080/09537325.2016.1180354>
- Jonhstone, N., Haščič, I., & Popp, D. (2010). Renewable energy policies and technological innovation: Evidence based on patent counts. *Environmental and Resource Economics*, 45(1), 133-155. <https://doi.org/10.1007/s10640-009-9309-1>
- Kang, M., Um, K., Shu, W., Park, K., Colclough, S., & Park, Y. (2021). Integrating manufacturing and R&D functions for better quality and product development performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 33(1), 191-212. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2021-0060>
- Karaca, C., Ulutaş, A., & Eşgünoğlu, M. (2017). Türkiye’de optimal yenilenebilir enerji kaynağının COPRAS yöntemiyle tespiti ve yenilenebilir enerji yatırımlarının istihdam artırıcı etkisi. *Maliye Dergisi*, 172, 111-132.
- Kaur, M., & Singh, L. (2016). R&D expenditure and economic growth: An empirical analysis. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*, 15(3), 195-213. https://doi.org/10.1386/tmsd.15.3.195_1
- Keese, M., & Marcolin, L. (2023). Labour and social policies for the green transition. *OECD Green Growth Papers*. <https://doi.org/10.1787/028ffbeb-en>
- Khalifa, A. (2022). Impact of research and development (R&D) and information and communication technology (ICT) on innovation and productivity: Evidence from Tunisian manufacturing firms. *Economics of Transition and Institutional Change*, 31(2), 341-361. <https://doi.org/10.1111/ecot.12340>
- Kılınç, E. C., & Şahbaz, N. (2021). Ar-Ge ve inovasyonun yenilenebilir enerji üretimi üzerindeki etkisi: Panel veri analizi. *Alanya Akademik Bakış*, 5(2), 1087-1105. <https://doi.org/10.29023/alanyaakademik.867232>

- Lee, C. C., Chang, C. P., & Lee, C. C. (2022). Energy R&D, clean energy transitions, and productivity: Evidence from OECD panel data. *Energy Economics*, 104, 105653. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105653>
- Lehr, U., Lutz, C., & Edler, D. (2012). Green jobs? Economic impacts of renewable energy in Germany. *Energy Policy*, 47, 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.04.076>
- Li, Y. (2024). Empirical determinants of research and development (R&D) investment in Chinese manufacturing companies. *International Journal of Social and Administrative Sciences Research (IJSASR)*, 4(2), 417–424. <https://doi.org/10.60027/ijssar.2024.3983>
- Oteng, C., Iledare, O., Peprah, J., & Gamette, P. (2024). Towards just energy transition: Renewable energy transition dynamics and sectorial employment in Ghana. *Sustainability*, 16(9), 3761. <https://doi.org/10.3390/su16093761>
- Park, S. (2014). Analyzing the efficiency of small and medium-sized enterprises of a national technology innovation research and development program. *SpringerPlus*, 3, Article 403. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-403>
- Pestel, N. (2019). Employment effects of green energy policies: Does a Switch in energy policy toward more renewable sources create or destroy jobs in an industrial country?. *Forschungsinstitut zur Zukunft der Arbeit GmbH (IZA)*. <https://doi.org/10.15185/izawol.76.v2>
- Popp, D. (2002). Induced innovation and energy prices. *American Economic Review*, 92(1), 160–180. <https://doi.org/10.1257/000282802760015658>
- Ram, M., Aghahosseini, A., & Breyer, C. (2020). Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050. *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119682. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.06.008>
- Shen, K., Yan, M., & Tzeng, G. (2017). Exploring R&D influences on financial performance for business sustainability considering dual profitability objectives. *Sustainability*, 9(11), 1964. <https://doi.org/10.3390/su9111964>
- Tatlı, H. (2023). Türkiye’de enerji tüketimi, Ar-Ge harcamaları ve beşeri sermayenin ekonomik büyüme üzerine etkileri. *Kafkas Üniversitesi İİBF Dergisi*, 14(27), 715–742. <https://doi.org/10.36543/kauibfd.2023.031>
- Tutar, H., & Atas, M. (2022). A review on Turkey’s renewable energy potential and its usage problems. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(4), 1–9. <https://doi.org/10.32479/ijee.12876>
- Wang, X., Lee, H., Park, K., & Lee, G. (2023). The strategic role of R&D outsourcing practices and partners in the relationship between product modularization and new product development efficiency. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(1), 185–202. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2023-0098>

- Wei, M., Patadia, S., & Kammen, D. M. (2010). Putting renewables and energy efficiency to work: How many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, 38(2), 919–931. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.044>
- Xu, J., & Jaewoo, S. (2018). Characteristics of corporate R&D investment in emerging markets: Evidence from manufacturing industry in China and South Korea. *Sustainability*, 10(9), 3002. <https://doi.org/10.3390/su10093002>
- Yeh, L., & Chang, D. (2019). Using categorical DEA to assess the effect of subsidy policies and technological learning on R&D efficiency of IT industry. *Technological and Economic Development of Economy*, 26(2), 311–330. <https://doi.org/10.3846/tede.2019.11411>