Sinopfbd, 2026; 11(1): 158-173 https://doi.org/10.33484/sinopfbd.1808128

Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi
Sinop Uni J Nat Sci
E-ISSN: 2564-7873

https://dergipark.org.tr/tr/pub/sinopfbd

Mevsimsel Değişimlerin ve İklim Değişikliğinin HES Enerji Üretimine Etkileri

Osman Tuğrul BAKİ

How to cite: Baki, O. T. (2026). Mevsimsel değişimlerin ve iklim değişikliğinin HES enerji üretimine etkileri. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11*(1), 158-173. https://doi.org/10.33484/sinopfbd.1808128

Open Access

Araştırma Makalesi

Sorumlu Yazar
Osman Tuğrul BAKİ
tbaki@ktu.edu.tr

Yazarlara ait ORCID
O.T.B: 0000-0001-8694-0543

Geliş Tarihi: 21.10.2025
Kabul Tarihi: 08.02.2026

Özet

Bu çalışma, yıl boyunca hidroelektrik üretimindeki mevsimsel değişiklikleri ve iklim değişikliğinin toplam enerji üretimi üzerindeki olası etkilerini incelemektedir. Türkiye'nin toplam enerji üretimi içinde hidroelektrik üretiminin payı 2011 ile 2024 yılları arasında analiz edilmiş ve özellikle 2019-2024 döneminde önemli aylık değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar, iklim değişkenliğinin ve aşırı hava olaylarının hidrolojik döngü üzerindeki etkisini ortaya koymakta ve su akışındaki düzensizliklerin hidroelektrik üretim için çok önemli olduğunu göstermektedir. Hidroelektrik üretimindeki değişkenliğin mevsimsel değişimlere önemli ölçüde bağlı olduğu iyi bilinmektedir. Örneğin, kar ve buzulların erimesi ve yüksek yağışlar nedeniyle ilkbaharda hidroelektrik potansiyeli ve üretimi artarken, yaz aylarında buharlaşma artışı ve rezervuar seviyelerinin düşmesi nedeniyle her ikisi de azalır. Ayrıca, düzensiz yağışlar ve daha sık görülen kuraklıklar, iklim değişikliğinin hidrolojik denge üzerindeki etkisini daha da şiddetlendirerek hidroelektrik üretimini daha da belirsiz hale getirmektedir. Kurulu güç, yıllık enerji üretimi, yıllara göre aktif hidroelektrik santral (HES) sayısı, yıllık ortalama yağış ve sıcaklık ve aylık enerji üretim miktarları titizlikle değerlendirilmiştir. Buna göre, HES potansiyeli yeniden belirlenmiş, olası iklim değişikliği etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve sonuçlar mevcut durumla karşılaştırılmıştır. Hidrolik enerji kurulu gücü artmasına rağmen toplam enerji içerisindeki payının sınırlı olduğu, yıllık sıcaklık değişimleri ve yağış rejimlerinde meydana gelen değişiklikler ile hidrolik üretimin iklimsel koşullara karşı hassas olduğunu, mevsimsel değişkenlikten dolayı hidrolik üretimin dalgalandığı anlaşılmıştır. Regresyon analizleri ile meteorolojik faktörlerin hidrolik enerji üretimi üzerine etkileri irdelenmiştir. Değerlendirmeler ışığında, enerji üretimindeki dalgalanmaların olası nedenleri belirlenmiş ve buna göre çeşitli öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hidroelektrik santraller, hidrolik enerji, iklim değişikliği, kuraklık, yağış, enerji üretimi

Effects of Seasonal Variations and Climate Change on HEPP Energy Production

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Trabzon, Türkiye

Abstract

This study examines how seasonal variations in hydropower generation throughout the year and possible impacts of climate change affect its share in total energy generation. The share of hydropower generation in Turkey's total energy generation between 2011 and 2024 is analysed and significant monthly variations are observed, especially in the period 2019-2024. These fluctuations reveal the impact of climate variability and extreme Heather events on the hydrological cycle and show that

irregularities in water flow are crucial for hydropower generation. It is well known that variation in hydropower generation is significantly depends on seasonal variations. For example, due to the melting of both snow and glaciers as well as the high precipitation, in the spring the potential and generation of hydropower increases, while both of them decrease in the summer due to increased evaporation and falling reservoir levels. In addition, erratic rainfall and more frequent droughts are exacerbating the impact of climate change on the hydrological balance, making hydropower generation even more uncertain. The data of installed power, annual energy production, the number of active HEPPs by year, annual average rainfall and temperature, and monthly energy production amounts have been meticulously evaluated. Accordingly, the HEPP potential has been redetermined, possible climate change impacts have been comprehensively examined, and the results have been compared with the current situation. Although the installed capacity of hydroelectric power has increased, its share of the total energy market remains limited. It is understood that hydroelectric production is sensitive to climatic conditions, such as annual temperature variations and changes in precipitation patterns, and that it fluctuates due to seasonal variability. Regression analyses have been used to examine the effects of meteorological factors on hydroelectric power production. In the light of the analyzing, the possible reasons for the fluctuations in energy production have been determined and accordingly several recommendations have been presented.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Keywords: Hydroelectric power plants, hydraulic energy, climate change, drought, precipitation, energy production

Giriş

Hidroelektrik enerji, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden faydalanarak elektrik üreten, köklü ve yaygın bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Dünya genelinde enerji talebinin artması ve iklim değişikliği endişeleriyle birlikte, hidroelektrik santrallerin (HES) rolü ve sürdürülebilirliği giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Hidroelektrik, küresel elektrik üretiminin %16'sına ve tüm yenilenebilir elektrik üretiminin %62'sine katkıda bulunan lider yenilenebilir enerji kaynağıdır. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na (IRENA) göre, hidroelektrik hala dünya yenilenebilir üretim kapasitesinin %70'ini oluşturmaktadır [1, 2]. Dünya çapında yayınlanan birçok araştırma bulgusu, iklim değişikliğinin hidroelektrik kaynakları üzerindeki etkilerini ele almaktadır. En iyi bilineni, 1990 yılından bu yana İklim Değişikliği Hükümetler Arası Panel (IPCC) tarafından yürütülen çalışmadır. Bu çalışma, iklim değişikliğinin hidroelektrik ve diğer kullanımlar için su kaynakları da dahil olmak üzere enerji kaynakları üzerindeki etkilerine önemli ölçüde dikkat çekmiştir [3–5]. ABD Enerji Bakanlığı'nın değerlendirmesi, iklim değişikliğinin federal HES'ler üzerindeki potansiyel etkilerine dikkat çekmektedir. Ülke genelindeki kurulu hidroelektrik kapasitenin yaklaşık %50'sini oluşturan bu tesislerin, özellikle uzun süreli kuraklıklar ve hidrolojik oynaklıklar karşısında kırılgan olduğu belirtilmektedir. Bulgular, önümüzdeki çeyrek yüzyılda iklim kaynaklı su kıtlığının birçok bölgede üretim verimliliğini olumsuz yönde etkileyebileceğini ortaya koymaktadır [6]. Nepal'de yürütülen araştırmalar, iklim değişikliğinin özellikle yüksek rakımlı alanlardaki hidroelektrik üretim üzerinde uzun vadeli etkiler doğuracağını ortaya koymaktadır. Artan sıcaklıklar, Himalaya buzullarının erime hızını artırarak başlangıçta akarsu debilerinde yükselmeye, ilerleyen yıllarda ise buzul rezervlerinin azalmasına bağlı olarak ciddi akış düşüşlerine neden olmaktadır. Bu durum, sınır aşan su kaynakları bağlamında bölgesel iş birliği ve entegre havza yönetimi gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır [7, 8]. Gana'da hidroelektrik üretimi, iklim değişikliğine bağlı hidrolojik belirsizliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Volta Havzası'nda gözlenen sıcaklık artışı, yağışlardaki düzensizlik ve kuraklık sıklığı,

2000–2022 yılları arasında üretimde ciddi dalgalanmalara neden olmuştur. Kurak yıllarda belirgin üretim düşüşleri yaşanmış, mevsimsel eğilimler ise yağış rejimiyle doğrudan ilişki göstermiştir. Bu durum, hidroelektriğin iklimsel değişkenlik karşısındaki kırılganlığını ortaya koymakta ve enerji politikalarında iklim adaptasyonunun gerekliliğine işaret etmektedir [9]. Batı Afrika'da hidroelektrik üretimi, iklim değişikliğine bağlı olarak değişen hidrolojik rejim nedeniyle düşüş eğilimindedir. Özellikle yağışlardaki azalma, nehir akımlarında düzensizliklere ve buna bağlı olarak enerji üretim kapasitesinde gerilemelere yol açmaktadır. Bamboi Havzası'nda yürütülen çalışmada, hidrolojik ve iklimsel eğilimler analiz edilmiş; mevcut hidroelektrik üretim kapasitesinde belirgin bir azalma yaşandığı ortaya konmuştur [10, 11]. Ülkemizde elektrik arz üretimleri fosil ve yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Bu kaynaklar kabaca taş kömürü, ithal kömür, asfaltit, linyit, sıvı yakıtlar (fuel oil, motorin, nafta), doğalgaz, sıvılaştırılmış doğal gaz (LNG), yenilenebilir, atık, termik, hidrolik, jeotermal, rüzgâr, güneş gibi enerji kaynakları olarak ifade edilebilir [12]. Enerji talebi, artan nüfus ve sanayi faaliyetleriyle paralel olarak hızla yükselmektedir. Bu durum, sadece yıllar içinde değil, aynı zamanda kısa vadede, örneğin birkaç ay içinde bile belirgin bir şekilde artmaktadır. Ülkemizde olduğu gibi dünya genelinde de enerji büyük ölçüde fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Ancak enerji tüketiminin artışı, çevre kirliliği ve atmosferdeki sera gazı etkilerinin de hızla artmasına yol açmaktadır. Bu sorunlara çözüm olarak, temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Türkiye, elektrik üretiminde zaman içerisinde büyük dönüşümlere tanık olmuştur. 1902 yılında Tarsus'ta 60 kW gücünde su değirmeninden hareket alan bir dinamo ile elektrik üretimi ile tanışmıştır [13]. Türkiye'de elektrik üretiminde kullanılan enerji kaynaklarının dağılımı, zaman içinde önemli değişimler göstermiştir. 1970'ler ve 1980'lerin başlarında, elektrik üretiminde sıvı yakıtlar, hidroelektrik ve yerli kömür (linyit) önemli bir paya sahipken, doğalgaz santrallerinin devreye girmesiyle birlikte sıvı yakıtların payında azalma yaşanmıştır. Türkiye İstatistik Kurumu [14] verilerine göre 1985 yılına kadar büyük ölçüde kömür, sıvı yakıtlar, hidrolik ve yenilenebilir enerji ve atıklar kaynakları ile elektrik üretimi gerçekleştirilirken 1985 yılında doğalgaz kaynağından faydalanılan enerji üretimi de gerçekleştirilmiştir. 2000'li yıllardan itibaren enerji sektöründe meydana gelen yenilikçi teknolojik projelerle yenilenebilir enerji kapasitesinde bir artış söz konusu olmuş ve hidroelektrik, rüzgâr ve güneş enerjisi santralleri artık yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 2000'li yılların başından itibaren, özellikle 2014 sonrası dönemde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının arttığı gözlemlenmiştir. Türkiye, hidroelektrik, rüzgâr, güneş ve jeotermal gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını yaygınlaştırarak enerji arzında çeşitliliği artırmayı hedeflemiştir. 2022 yılı itibarıyla Türkiye'de elektrik üretiminin %14'ü linyitten, %21'i taşkömüründen, %22'si doğalgazdan, %1'i akaryakıttan, %21'i hidroelektrikten ve %22'si diğer yenilenebilir kaynaklardan sağlanmıştır [15–17]. Bu veriler, Türkiye'nin enerji üretiminde fosil yakıtlardan yenilenebilir enerjiye doğru yönelme sürecinde olduğunu göstermektedir. Özellikle hidroelektrik ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının payının artması, Türkiye'nin enerji bağımsızlığını artırma ve karbon salınımını azaltma hedefleri doğrultusunda önemli bir adım olarak değerlendirilebilir. Bu veriler, Türkiye'nin hidroelektrik enerji üretimi konusunda büyük bir avantaja sahip olduğunu ve enerji bağımsızlığı açısından önemli bir yenilenebilir kaynaklara sahip olduğunu açığa çıkarmaktadır. Ancak, iklim değişikliği, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve çevresel etkiler gibi faktörler dikkate alınarak uzun vadeli planlamalar yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları, Türkiye'nin coğrafi ve iklimsel özellikleriyle mükemmel bir uyum içerisindedir. Türkiye, geniş yüzölçümü ve matematik konumu sayesinde güneş ışınımından en verimli şekilde faydalanabilecek bir konumdadır [18]. Ülke, yılın büyük bir zaman diliminde güneşli bir iklime sahip olup, bu da güneş enerjisi üretiminde son derece yüksek bir potansiyel sunmaktadır. Özellikle Orta Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri, güneş enerjisinden maksimum verim alabilecek alanlar olarak öne çıkmaktadır. Rüzgâr Potansiyeli Atlası'na göre Türkiye'nin batı kıyılarının rüzgâr enerjisi açısından son

derece avantajlıdır [19]. Ege Bölgesi, yüksek rüzgâr potansiyeliyle rüzgâr enerjisi üretiminde önemli bir kaynağa sahip olup, özellikle Çanakkale, İzmir ve Aydın illerindeki rüzgâr santralleri büyük bir katkı sağlamaktadır. Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları bakımından en önemli potansiyeli hidrolik enerjidir [20]. Türkiye'nin dağlık yapısı ve coğrafyasının etkisiyle zengin su kaynakları mevcuttur. Bu kaynaklar, yıllardır hidroelektrik enerji üretimi için kullanılmakta ve ülkenin enerji ihtiyacının giderilmesinde etkin rol üstlenmektedir. Türkiye, bu yenilenebilir, temiz, ucuz ve yerli kaynaklara sahip olması nedeniyle önemli enerji potansiyellerine sahiptir. Yukarıda belirtilen yenilenebilir enerji kaynaklarının her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'deki HES'lerin enerji üretimindeki doğa koşullarına bağlı olarak meydana gelen dalgalanmalara odaklanılmıştır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından sağlanan 2011-2024 yılları arasındaki elektrik üretim verileri ve "Türkiye Brüt Elektrik Üretiminin Birincil Enerji Kaynaklarına Göre Aylık Dağılımı" verileri kullanılarak, 2019-2024 yılları arasındaki bir yıl boyunca HES'lerde yaşanan enerji üretimi değişimleri aylık olarak incelenecektir. Bu veriler, HES'lerinin üretimindeki aylık ve mevsimsel dalgalanmaların, yılın farklı dönemlerinde nasıl değiştiğini ve hidroelektrik üretiminin yıllık bazda nasıl etkilendiğini açığa çıkarılacaktır. Bu sayede, Türkiye'deki hidrolik enerji üretimindeki verimliliğin, kuraklık ve yağış gibi iklimsel faktörlerden nasıl etkilendiği daha net bir şekilde ortaya konmuştur. İklim değişikliğinin giderek belirginleşen etkileri, hidroelektrik enerji üretimi için ciddi bir risk oluşturmaktadır. Azalan yağış miktarları, artan buharlaşma oranları ve düzensiz hidrolojik döngüler, su kaynaklarının mevsimsel ve yıllık bazda büyük değişimler göstermesine neden olmaktadır. Özellikle kurak dönemlerde barajlarda yeterli su seviyesinin korunamaması, enerji üretiminin yanı sıra içme ve kullanma suyu temini, sulama faaliyetleri ve sanayi üretimi için gerekli su miktarında ciddi dalgalanmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle, hidroelektrik üretiminin sürdürülebilirliğini sağlamak adına, su kaynaklarının entegre yönetimi, su tasarrufu sağlayan teknolojilerin kullanımı ve iklim değişikliğine dayanıklı enerji stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, TEİAŞ'ın 2011-2024 elektrik üretim verileri kullanılarak, 2019-2024 döneminde HES'lerdeki aylık enerji üretimi dalgalanmaları incelenecektir. Böylece, hidroelektrik üretiminin kuraklık ve yağış gibi iklimsel faktörlerden nasıl etkilendiği ortaya konmuştur. Hidroelektrik enerji, su kaynaklarından elde edilen ve doğrudan hava kirliliğine neden olmayan bir yenilenebilir enerji türüdür. İlk yerleşim alanlarının genellikle ırmak kenarlarında kurulmuş olması, su kaynaklarının tarihsel olarak önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Teknolojik gelişmelerle birlikte hidroelektrik enerji, günümüz toplumları için enerji üretimi ve güvenliği açısından kritik bir yenilenebilir kaynak haline gelmiştir. Su, belirli bir yükseklikten akıp düşerken türbinleri harekete geçirerek potansiyel enerjisini kinetik enerjiye dönüştürür, bu sayede hidroelektrik enerji üretimi sağlanır. Bu nedenle, elektrik üretimi için kullanılan akarsuların akış gücü büyük önem taşır. Akarsulardaki enerjinin kullanım şekli, HES'lerinin elektrik üretim kapasitesini etkileyebilir. Fosil yakıtlardan farklı olarak, hidroelektrik enerji hava kirliliği üzerinde doğrudan olumsuz bir etki yapmaz. Ancak, kurulum ve işletme aşamasında çevresel etkiler nedeniyle eleştiriler ve tartışmalar söz konusudur. Halen bu olumsuz etkilerin en aza indirgenmesine ve giderilmesine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir [21]. Türkiye, yenilenebilir enerji alanında stratejik ve avantajlı bir konuma sahiptir. Ülkemizin en önemli yerli yenilenebilir enerji kaynağı hidroelektrik enerjidir. Bu enerji türü, geniş bir kullanım alanına sahip olması ve büyük enerji rezervleri ile alternatif enerji kaynakları arasında öne çıkmaya devam etmektedir [22]. Çevreye duyarlı, temiz enerji üreten, yenilenebilir, yüksek verimliliğe sahip, yakıt gerektirmeyen, uzun ömürlü ve işletme maliyetleri çok düşük olan; dışa bağımlılıktan uzak yerli bir enerji kaynağıdır. Bu özellikleri sayesinde, diğer enerji türleri arasında HES'ler, çevre dostu olmaları ve düşük risk barındırmaları nedeniyle öne çıkmaktadır [23]. 2025 yılı ocak ayı itibarı ile kurulu gücün %27.6'lık kısmını hidrolik enerji karşılamaktadır. Yine aynı yıla ait verilere göre ülkemizde enerji üretimi gerçekleştiren 765 adet HES bulunmaktadır [24]. 2024 yılı itibarıyla HES'lerinden elde edilen elektrik enerjisinin %76.4'ü

depolamalı HES'lerde, %23.6'sı ise nehir tipi santrallerde üretilmiştir [25]. Türkiye'nin brüt teorik hidroelektrik potansiyeli yıllık 433 milyar kWh, teknik olarak değerlendirilebilen potansiyeli ise 216 milyar kWh'dir. Ekonomik olarak geliştirilebilecek potansiyel ise, 180 milyar kWh/yıl seviyesindedir. Mevcut durumda hayata geçirilen potansiyel ise 160 milyar kWh/yıldır. Küresel çapta değerlendirildiğinde, Türkiye'nin teorik hidroelektrik potansiyeli, dünya genelindeki toplam hidroelektrik potansiyelinin %2'sini, Avrupa'daki toplam potansiyelin ise, %18'ini oluşturmaktadır. Bu potansiyel ile Türkiye, Avrupa ülkeleri arasında en yüksek hidroelektrik potansiyeline sahip ikinci ülke konumunda yer almaktadır [22]. Türkiye'de elektrik arzı fosil ve yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanmakta olup, artan nüfus ve sanayileşmeye paralel olarak enerji talebi hızla artmaktadır. Bu artış, çevresel etkiler ve sera gazı emisyonlarını da beraberinde getirerek temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi zorunlu kılmaktadır [26–29]. Türkiye'de elektrik üretimi 1902 yılında başlamış, zamanla enerji üretiminde fosil yakıtlar, hidroelektrik ve diğer yenilenebilir kaynakların payı önemli ölçüde değişmiştir. Özellikle 2000'li yıllardan sonra yenilenebilir enerji teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte hidroelektrik ve diğer yenilenebilir kaynakların kullanımında belirgin bir artış yaşanmıştır [13, 15, 17, 30–34]. Türkiye'nin coğrafi ve iklimsel özellikleri, yenilenebilir enerji kaynakları açısından yüksek bir potansiyel sunmaktadır. Güneş enerjisi açısından Orta ve Güneydoğu Anadolu, rüzgâr enerjisi açısından ise özellikle Ege Bölgesi öne çıkmaktadır [18, 19]. Bununla birlikte, yarı kurak iklim koşulları nedeniyle yağışların mevsimsel dağılımındaki düzensizlik, su kaynakları ve hidroelektrik enerji üretiminde yıllık ve mevsimsel dalgalanmalara yol açmaktadır. Akdeniz makroklima bölgesinde yer alan Türkiye'de akarsuların rejimi genel olarak düzensizken, Doğu Karadeniz akarsuları daha düzenli rejim göstermektedir [31, 32]. Hidroelektrik enerji üretimi; yağış, sıcaklık ve kar erimeleri gibi meteorolojik koşullara doğrudan bağlıdır ve iklim değişikliği bu üretimin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir [35, 36]. Türkiye'de hidroelektrik enerji, yerli ve çevre dostu bir kaynak olup enerji arz güvenliği açısından önemli bir role sahiptir. 2025 yılı itibarıyla HES'ler, toplam kurulu gücün %27.6'sını oluşturmakta; üretilen enerjinin %76.4'ü depolamalı, %23.6'sı ise nehir tipi santrallerden sağlanmaktadır [20–26]. Türkiye'nin yıllık teorik hidroelektrik potansiyeli 433 milyar kWh olup, bunun önemli bir bölümü teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir durumdadır; bu potansiyel, Türkiye'yi Avrupa'nın önde gelen hidroelektrik ülkelerinden biri konumuna getirmektedir [22]. Türkiye'de akarsuların maksimum, minimum ve yıllık ortalama akım değerleri ile yağış ve sıcaklık gibi meteorolojik parametreler, HES'lerinin enerji üretimini doğrudan etkileyen temel faktörler arasında yer almaktadır. Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde Zap Suyu üzerinde bulunan bir HES'in 2016–2019 yılları arasındaki günlük debi ile bölgesel iklim verileri (yağış ve sıcaklık) kullanılarak akım değişimlerinin ile enerjisi üretimini nasıl etkilediği irdelenmiş, akım verileri ile enerji üretimi arasında güçlü bir ilişki olduğu açığa çıkarılmış; özellikle yüksek debi değerlerinin enerji üretim seviyelerini artırdığı ve bu ilişkinin mevsimsel değişimlerle birlikte anlamlı şekilde değiştiği anlaşılmıştır [37].

Çalışma Alanı ve Kullanılan Veriler

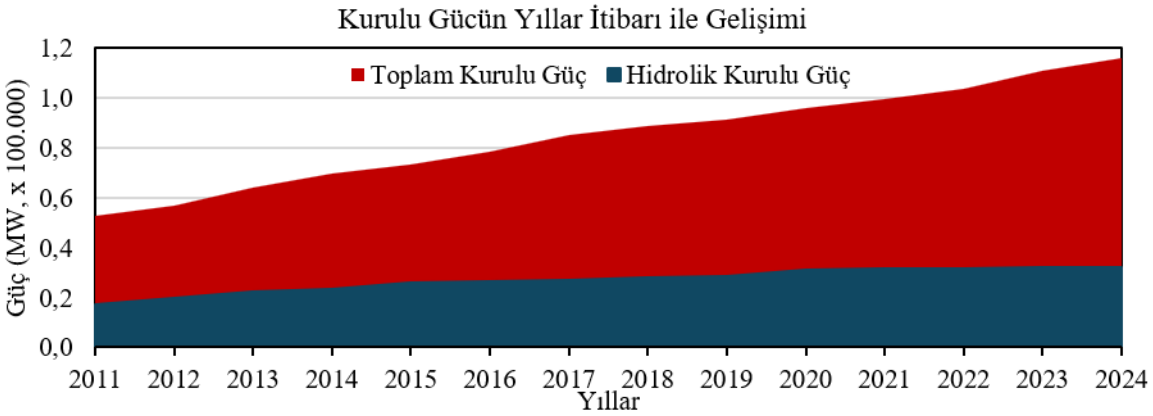
Türkiye'de Enerji Kaynakları ve Hidroelektriğin Yeri

Türkiye, artan nüfus ve ekonomik faaliyetler doğrultusunda enerji ihtiyacı sürekli artan ülkeler arasında yer almaktadır. Bu ihtiyacın karşılanmasında farklı enerji kaynakları kullanılırken, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları çevresel ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunmaktadır. Türkiye coğrafi ve hidrolojik özellikleri bakımından hidrolik enerji üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir. Bu çalışmada Türkiye'deki hidrolik enerjinin durumu genel hatlarıyla ele alınmış, analizlerde kullanılan 2011-2024 yılları arası meteorolojik veriler ile enerji verilerine ait istatistiksel bilgiler Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. *Çalışmada kullanılan verilere ait temel istatistiki göstergeler*

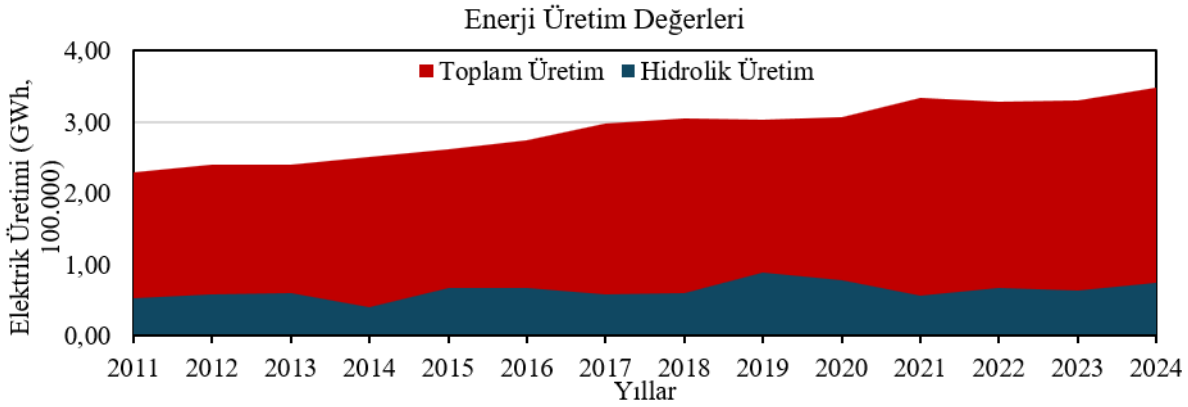
	Toplam Yağış (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Hidrolik Enerji (GWh)	Toplam Üretilen Enerji (GWh)
Standart Sapma	32.70	8.20	11385.16	38332.45
Minimum	9.54	-2.19	40644.70	229395.10
Ortalama	54.55	12.31	63665.60	289502.64
Maksimum	161.75	25.47	88822.78	348905.87

TEİAŞ [38] verilerine göre Ülkemizde 2011-2024 yılları arasında hizmet üretim gerçekleştiren toplam kurulu güçte istikrarlı bir artış yaşandığı görülmektedir (Şekil 1). Bu süreçte, Türkiye'nin enerji üretim kapasitesinin genişlediği ve yeni enerji tesislerinin devreye alındığı anlaşılmaktadır. 2011 yılında yaklaşık 52911.10 MW olan toplam kurulu güç, 2024 yılı itibarıyla yaklaşık 116000.00 MW'a ulaşmıştır. Bu da yaklaşık %120'lik bir artış anlamına gelmektedir. Hidrolik enerji kaynaklı dayalı tesislerin kurulu gücü de benzer şekilde artış göstermiştir. 2011 yılında yaklaşık 17000.00 MW olan hidrolik kurulu güç, 2024 yılında 32203.00 MW'a yükselerek yaklaşık iki katına çıkmıştır. Ancak, hidrolik enerjinin toplam kurulu güç içindeki payı 2011 yılında %32 iken, 2024 yılında %28'e gerilemiştir.



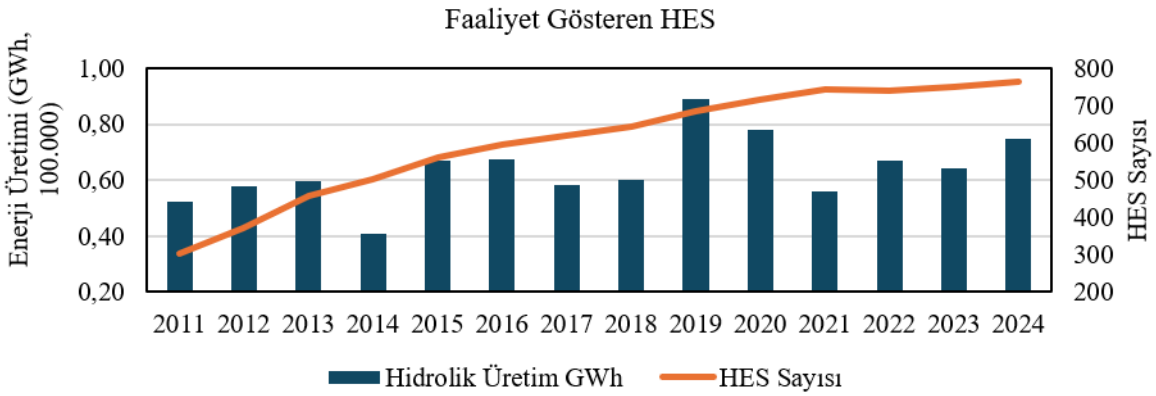
Şekil 1. *Yıllara göre kurulu güç değerleri [38]*

Bu durum, hidrolik enerjide kapasite artışı olmasına rağmen, toplam enerji üretimindeki diğer kaynakların (güneş, rüzgâr, termik santraller vb.) daha hızlı büyümesi nedeniyle HES'lerin göreceli payının azalmasına neden olmuştur. Bu eğilim, Türkiye'nin enerji üretiminde daha fazla çeşitlilik sağlama ve yenilenebilir enerji kaynaklarını artırma stratejisine paralel olarak ilerlediğini göstermektedir. Şekil 2'de yıllara göre enerji üretim değerleri sunulmaktadır. Toplam enerji üretim değerleri, 2011 yılından 2024 yılına kadar, istikrarlı bir artış trendi sergilemiştir. 2011 yılında 229395.10 GWh olarak gerçekleşen toplam enerji üretimi, 2024 yılında 348905.87 GWh seviyesine ulaşarak yaklaşık %52 oranında bir artış kaydetmiştir. Bu sürekli artış, enerji talebindeki büyüme, yeni enerji kaynaklarının devreye alınması ve üretim kapasitesinin genişlemesi ile açıklanabilir. Buna karşın, hidrolik enerji üretimi yıllar içinde dalgalı bir seyir izlemiştir. 2011-2013 yılları arasında üretimde artış eğilimi görülürken, 2014 yılında keskin bir düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş, o yılki su rezervlerinin azalması veya kuraklık gibi doğal faktörlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. 2015 ve 2016 yıllarında üretim tekrar yükselişe geçmiş, 2019 yılında ise, 88822.78 GWh ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır.



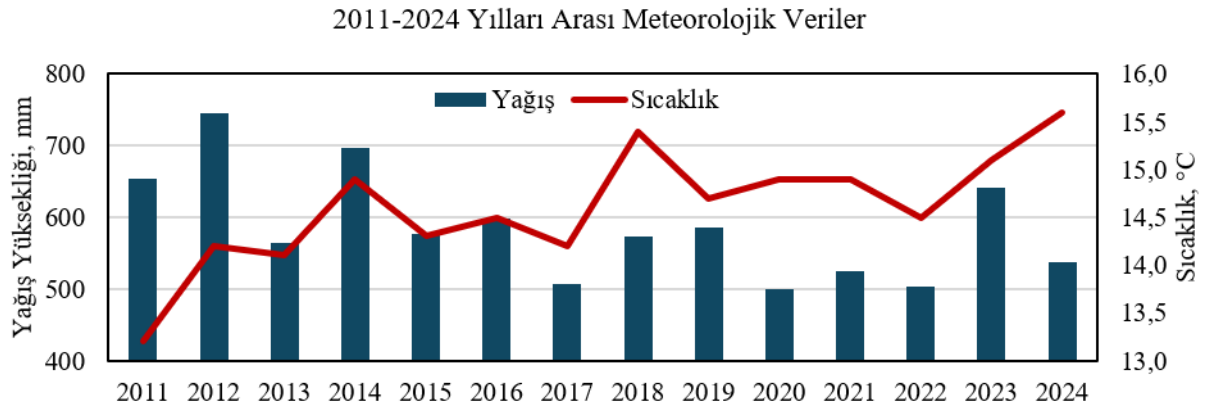
Şekil 2. *Yıllara göre enerji üretim değerleri [38]*

Ancak bu zirve sonrasında, hidrolik üretimde tekrar düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. 2020 yılında üretim 78094.37 GWh'e, 2021 yılında ise, 55926.81 GWh'e kadar gerilemiştir. Bu düşüş, su seviyelerindeki azalma, artan sıcaklıklar ve değişen hidrolojik koşullar ile ilişkili olabilir. 2022 yılından itibaren ise hidrolik enerji üretimi yeniden artış eğilimine girmiş, 2024 yılı itibarıyla daha istikrarlı bir seviyeye ulaşmıştır. Ülkemizde faaliyet gösteren HES'lerin sayısı ve yıllık enerji üretim değerleri sunulmuştur. 2011 yılında 303 adet olan HES sayısı 2024 yılı itibarı ile 765'e ulaşmıştır. 2016 yılına kadar HES sayısında önemli bir artış gözlenirken 2017 yılı sonrasıyla HES artış hızında yavaşlama görülmektedir. (Şekil 3).



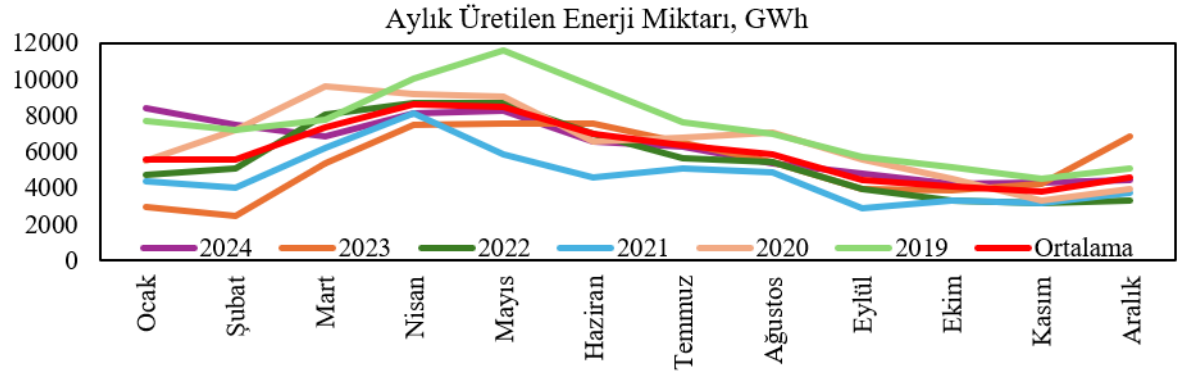
Şekil 3. *Yıllara göre HES sayısı değişimi [38, 39]*

HES sayısının artmasıyla birlikte yeni tesislerin üretimi artırıcı bir etki yapması beklenirken, 2019 sonrasındaki dönemde HES sayısında artış olmasına rağmen, üretilen enerji miktarı 2019 yılındaki seviyeyi aşamamıştır. Tesis sayısının artmasıyla üretim miktarının yükselmesi beklenirken, 2020 ve 2021 yıllarında enerji üretimindeki artış hızı giderek azalmış, 2022 ve 2023 yıllarında ise benzer seviyelerde bir üretim gerçekleşmiştir. Ancak 2024 yılı itibariyle enerji üretimi, 2023 yılından daha yüksek bir seviyeye ulaşmıştır. Şekil 4'te ortalama iklim verileri sunulmuştur. Enerji üretimi üzerindeki potansiyel etkilerin belirlenebilmesi amacıyla, yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak iklim koşullarının enerji üretimi üzerindeki olası etkileri incelenmiştir.



Şekil 4. *2011-2024 yılları arası Türkiye'nin ortalama iklim verileri*

2011-2024 yıllarına ait yıllık ortalama sıcaklık verileri incelendiğinde, sıcaklıkların en yüksek olduğu yıl 2024 olarak, ortalama sıcaklığın en düşük olduğu yıl ise 2011 yılı olarak belirlenmiştir. Tabloda sunulan sıcaklık verileri ile 2011 yılından 2024 yılına kadar sıcaklıkların artış yönünde bir eğilimde olduğu söylenebilir. 2014 ve 2018 yıllarında sıcaklık ortalamalarının 15.0°C'nin üzerinde seyretmesi ile bu yıllarda sıcaklığın etkisiyle daha fazla buharlaşma meydana geldiği söylenebilir. Genel olarak yağışlı geçen periyotlarda enerji üretiminin arttığı göze çarpmaktadır, ancak bu doğrudan geçerli bir ilişki değildir. 2014 yılında yağışların yüksek olması enerji üretiminin de yüksek olacağı izlenimini yaratmaktadır. Ancak 2014 yılında gözlem süresi boyunca en düşük enerji üretimi gerçekleştiği anlaşılmıştır. Yıllık bazda sıcaklık ve yağış verileri ile hidrolik enerji üretimi arasındaki ilişki genel eğilimleri ortaya koymak açısından önemli olsa da bu veriler, enerji üretimindeki kısa vadeli değişimleri anlamak için yetersiz kalmaktadır. HES'lerin üretim kapasitesi, mevsimsel akış değişimlerine doğrudan bağlı olduğundan, yıllık ortalamalar bazı kritik dalgalanmaları maskeleyebilir. Bu amaçla, 2019-2024 yılların arası aylık hidrolik enerji üretim verileri detaylı olarak sunulmuştur. Aylık bazda gerçekleştirilen bu analizler, yıllık toplam değerlerin gizleyebileceği kısa vadeli değişimlerin ortaya çıkarılmasına yardımcı olacaktır (Şekil 5).



Şekil 5. *Aylık HES enerji üretim miktarları*

Aylık üretim değerleri incelendiğinde, hidrolik enerji üretiminin belirli mevsimsel eğilimler gösterdiği anlaşılmaktadır. Özellikle ilkbahar aylarında, yani mart, nisan ve mayıs döneminde enerji üretiminin arttığı; yaz sonu ve sonbahar aylarında ise düşüş eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu dalgalanmalar, büyük ölçüde yağış rejimi ve sıcaklık değişimleriyle ilişkilidir. İlkbahar aylarında kar erimesi ve artan yağış miktarları su akışını artırarak enerji üretimini desteklerken, yaz aylarında yüksek sıcaklıkların neden olduğu buharlaşma kayıpları ve azalan akış miktarları enerji üretimini olumsuz etkilemektedir. Özellikle temmuz, ağustos ve eylül aylarında üretimin ortalama değerlere kıyasla düşük olması, bu

dönemde su kaynaklarının kısıtlı olmasının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, 2019 yılında yıllık bazda en yüksek hidrolik enerji üretimi gerçekleşmiş olup, bu yılın nisan ve mayıs aylarında üretim zirveye ulaşmıştır. 2024 yılı verilerine bakıldığında ise, ocak ayında oldukça yüksek bir üretim olduğu, ancak sonraki aylarda düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu durum, su rezervuarlarının yönetimi, iklim koşulları ve talep değişimlerinin üretim üzerindeki etkisini gözler önüne sermektedir. Genel olarak, aylık veriler hidrolik enerji üretimindeki dalgalanmaların sadece yıllık bazda değil, mevsimsel ve hatta aylık ölçeklerde de dikkatle incelenmesi gerektiğini göstermektedir. Uzun vadeli enerji planlamaları yapılırken, mevsimsel değişimler göz önünde bulundurulmalı ve su yönetim politikaları bu doğrultuda şekillendirilmelidir.

Tartışma

2013 yılında toplam kurulu güç içerisinde %35 olan hidrolik kurulu gücün payı, 2024 yılı itibarıyla yaklaşık %28'e gerilemiştir (Tablo 2). Bu durum, hidrolik enerjinin toplam enerji üretim kapasitesindeki ağırlığının azaldığını açıkça göstermektedir. Her ne kadar hidrolik enerjiye dayalı tesislerin sayısında ve kurulu güçlerinde bir artış yaşanmış olsa da, toplam üretim değerlerindeki dalgalanmalar ve hidrolik enerjinin toplam enerji üretimi içindeki payındaki azalma dikkat çekicidir.

Tablo 2. *Kurulu güç ve enerji üretim verileri*

Yıl	Hidrolik KG (MW)	Toplam KG (MW)	Hidrolik KG Payı (%)	HES sayısı	Tesis Başına Düşen Enerji (GWh)	Yıllık Enerji Üretimi (GWh)
2011	17137.00	52911.10	0.32	303	172.73	52338.60
2012	19609.00	57059.40	0.34	370	156.39	57865.00
2013	22289.00	64007.50	0.35	458	129.74	59420.50
2014	23643.00	69519.80	0.34	503	80.80	40644.70
2015	25868.00	73146.70	0.35	562	119.48	67145.80
2016	26681.00	78497.40	0.34	596	112.80	67230.90
2017	27273.00	85200.00	0.32	620	93.90	58218.50
2018	28291.00	88550.80	0.32	644	93.07	59938.40
2019	28503.00	91267.00	0.31	683	130.05	88822.78
2020	30984.00	95890.60	0.32	714	109.38	78094.37
2021	31493.00	99819.60	0.32	743	75.27	55926.81
2022	31572.00	103809.30	0.30	740	90.27	66802.50
2023	31962.00	110914.00	0.29	750	85.34	64002.45
2024	32203.00	116000.00	0.28	764	97.87	74867.06

* KG : Kurulu Güç

Bu gerilemenin; sisteme nispeten düşük verimli HES'lerin dahil edilmesi iklim değişikliği ve yağış rejimlerindeki düzensizliklerin üretim üzerindeki etkileri ile güneş ve rüzgâr gibi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının hızla yaygınlaşarak enerji arzında daha fazla pay alması gibi etmenlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Özellikle son yıllarda güneş ve rüzgâr enerjisi yatırımlarındaki artış yenilenebilir enerji portföyünü çeşitlendirmiş ve bu durum hidrolik enerjinin göreceli payını sınırlamış görünmektedir. Hidrolik enerjinin toplam kapasitesi artış göstermesine rağmen diğer enerji kaynaklarının daha hızlı büyümesi nedeniyle kurulu güç içerisindeki payı azalma eğilimindedir. Bu eğilim Türkiye'nin enerji arz güvenliğini artırmak için farklı enerji kaynaklarını sisteme entegre ettiğini ve yenilenebilir enerji çeşitliliğine yöneldiğini göstermektedir. Tablo 2'de sunulan HES sayısı ile tesis başına üretilen enerji miktarındaki değişimler hidrolik enerji üretimin yalnızca iklim koşullarına değil

aynı zamanda tesis yapısına ve kapasitesine de duyarlı olduğunu ortaya koymaktadır. 2011 yılında tesis başına düşen ortalama enerji üretimi 170.73 GWh iken bu değer 2024 yılı itibarıyla 97.87 GWh'e gerilemiştir. HES sayısındaki artışa karşın tesis başına üretimde gözlenen bu düşüş sisteme dahil edilen yeni santrallerin daha düşük üretim kapasitelerine sahip olabileceğine işaret etmektedir. Nitekim üretimin en yüksek olduğu 2019 yılında dahi tesis başına üretilen enerji miktarının 2011 seviyesinin altında kalması bu durumu desteklemektedir. 2011–2024 dönemi boyunca hidrolik enerji üretiminde gözlenen dalgalanmaların yağış miktarındaki değişimler su seviyeleri ve kuraklık koşulları ile ilişkili olabileceği değerlendirilmektedir. Tablo 3'te sunulan meteorolojik veriler doğrultusunda 2014 yılında görece yüksek miktarına rağmen enerji üretiminin belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum önceki yılın düşük yağış koşullarının etkisi ve 2014 yılı yüksek sıcaklarının sebep olduğu buharlaşmanın artması ve su yönetimine ilişkin kısıtların söz konusu olması ile açıklanabilir. 2014 yılı çalışma dönemi içerisinde hidrolik enerji üretiminin en düşük seviyede gerçekleştiği yıl olmuştur. Buna karşılık 2019 yılı çalışma dönemi içerisinde hidrolik enerji üretiminin en yüksek seviyede gerçekleştiği yıl olmuştur. Yağış miktarları 2018 yılı ile benzer seviyede olmasına rağmen 2019 yılı ortalama sıcaklıklarının daha düşük olmasıyla buharlaşma kayıpları azalmış ve baraj rezervuarlarında su rezervlerinin daha verimli kullanılmasına olanak tanımıştır. Bu durum uygun iklim koşulları ile birlikte daha etkin su yönetimi stratejilerinin hidrolik enerji üretimi artırmada belirleyici olabileceğini göstermektedir.

Tablo 3. *Meteorolojik veriler*

Yıl	Toplam Yağış (mm)	Ortalama Sıcaklık (°C)	Toplam Hidrolik Enerji (GWh)
2011	654.70	13.20	52338.60
2012	745.00	14.20	57865.00
2013	564.00	14.10	59420.50
2014	697.30	14.90	40644.70
2015	577.00	14.30	67145.80
2016	598.00	14.50	67230.90
2017	506.60	14.20	58218.50
2018	574.00	15.40	59938.40
2019	585.10	14.70	88822.78
2020	500.00	14.90	78094.37
2021	524.80	14.90	55926.81
2022	503.80	14.50	66802.50
2023	641.50	15.10	64002.45
2024	537.20	15.60	74867.06

2011 yılında tesis başı üretilen ortalama enerji miktarı 172.73 GWh iken bu değer 2024 yılı itibarı ile 97.87 GWh'e gerilemiştir. HES sayısının artması ile meydana gelen bu düşüşler enerji üretimindeki düşüşün yalnızca iklim etkisiyle değil aynı zamanda kurulan yeni tesislerin üretim kapasitelerinin düşük olmasından dolayı kaynaklandığını gösteriyor. Enerji üretiminin pik değere ulaştığı 2019 yılında bile tesis başına üretilen enerji miktarının 2011 yılı verilerinden düşük olması aynı şekilde enerji üretiminin minimum olduğu 2014 yılındaki üretim değerinin yine ikinci minimum olarak göze çarpan 2021 yılı verilerinden yüksek olması bu durumu desteklemektedir. HES sayısı 2011 ile 2014 yılları arasında sürekli artarken bu dönemde üretilen toplam enerji miktarında 2014'te belirgin bir düşüş yaşanmıştır. 2015'te HES sayısı 562'ye ulaşmış ve bu artışla paralel olarak enerji üretiminde de bir yükselme gözlemlenmiştir. Ancak 2016 yılında HES sayısı artmasına rağmen enerji üretimi neredeyse sabit kalmıştır. 2017 ve 2018 yıllarında ise HES sayısındaki artışa rağmen beklenen enerji üretimi artışı

gerçekleşmemiştir. 2019 yılı enerji üretiminde önemli bir artışa sahne olmuş ve üretilen enerji gözlem yılları arasındaki en yüksek değere ulaşmıştır. 2021 yılına kadar toplam enerji üretiminde bir düşüş yaşanırken 2022'de tekrar bir artış görülmüş ancak 2023'te yeniden bir düşüş yaşanmıştır. 2024 yılı ise enerji üretiminde tekrar bir artış ile sonuçlanmıştır. Tablo 4'te yer alan verilen 2011–2024 döneminde Türkiye'de toplam enerji üretiminin genel olarak artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Aynı dönemde hidrolik enerji üretimi yıllara bağlı olarak dalgalı bir seyir izlemiş bazı yıllarda belirgin düşüşler ve artışlar yaşanmıştır. Hidrolik enerjinin toplam enerji üretimi içindeki payı incelendiğinde bu oranın yaklaşık %16 ile %29 arasında değiştiği ve en yüksek payın 2019 yılında en düşük payın ise 2014 yılında gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Buna karşılık HES sayısının yıllar itibarıyla istikrarlı bir artış gösterdiği ancak bu artışın üretim miktarına her yıl aynı ölçüde yansımadığı görülmektedir. Bu durum hidroelektrik üretimin yalnızca kurulu tesis sayısına değil aynı zamanda iklimsel ve hidrolik koşullar gibi farklı parametrelere de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4. *Enerji üretim verileri*

Yıl	Hidrolik Enerji Üretimi (GWh)	Toplam Enerji Üretimi (GWh)	Hidrolik Enerji Payı (%)	HES sayısı
2011	52338.60	229395.10	0.23	303
2012	57865.00	239496.80	0.24	370
2013	59420.50	240154.00	0.25	458
2014	40644.70	251962.80	0.16	503
2015	67145.80	261783.30	0.26	562
2016	67230.90	274407.70	0.25	596
2017	58218.50	297277.50	0.20	620
2018	59938.40	304801.90	0.20	644
2019	88822.78	303897.56	0.29	683
2020	78094.37	306703.09	0.25	714
2021	55926.81	334723.11	0.17	743
2022	66802.50	328379.34	0.20	740
2023	64002.45	331148.90	0.19	750
2024	74867.06	348905.87	0.21	764

Aylık bazda incelenen hidrolik enerji üretim verileri yıllık toplam değerlerin enerji üretimi üzerindeki değişkenliği tam olarak yansıtamadığını ortaya koymaktadır. Özellikle hidrolik enerji üretiminin doğrudan yağış ve sıcaklık değişimleriyle bağlantılı olduğu düşünülse de bu ilişkinin her zaman doğrusal olmadığı görülmektedir. İlkbahar aylarında kar erimesi ve artan akış sayesinde enerji üretimi zirveye ulaşırken yaz ve sonbahar aylarında buharlaşma ve azalan su girdileri nedeniyle üretimde düşüşler yaşanmaktadır. Ancak bazı yıllarda yağışın fazla olmasına rağmen üretimin beklenen seviyeye ulaşmadığı ya da düşük yağışlı dönemlerde bile üretimin yüksek seyrettiği gözlemlenmektedir. Bu durum HES'lerinde baraj yönetimi su depolama kapasitesi ve enerji talebinin üretim üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. 2019 yılında nisan ve mayıs aylarında üretim en yüksek seviyelere ulaşırken benzer yağış koşullarına sahip 2018 yılında üretim görece daha düşük kalmıştır (Şekil 5). Bu farklılık su kaynaklarının yıllar içinde değişen iklimsel ve operasyonel faktörlerden nasıl etkilendiğini göstermektedir. 2024 yılı verileri incelendiğinde ise ocak ayında yüksek üretim gerçekleşmiş ancak sonraki aylarda düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. Bu durum yalnızca yağış miktarının değil aynı zamanda su yönetimi stratejilerinin ve iklim değişikliğinin etkilerinin de enerji üretiminde belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla hidrolik enerji üretiminde sadece yıllık değişimler yerine aylık ve mevsimsel bazda analizler yapmak daha sağlıklı öngörülerde bulunmayı mümkün kılmaktadır.

Bu kapsamda su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için iklim değişikliğinin neden olduğu uzun vadeli eğilimler ve kısa vadeli değişkenler dikkate alınarak enerji planlamalarının yapılması gerekmektedir. Hidrolik enerji üretimi ile meteorolojik parametreler arasındaki hem doğrusal hem de doğrusal olmayan ilişkileri saptamak amacıyla Pearson Spearman ve Kendall korelasyon analizleri yapılmıştır. Yapılan bu korelasyon analizleri yağış ve sıcaklık değişimlerinin hidrolik enerji üretimi üzerindeki etkilerinin kantitatif (sayısal) ve niteliksel olarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Verilerin standardizasyonunu sağlamak amacıyla yıllık toplam üretim miktarları o yıl faaliyette olan HES sayısına bölünmüş ve birim tesis bazlı üretim verileri üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5. *Tesis başına düşen üretim miktarı ile yıllık ortalama yağış ve sıcaklık arasındaki istatistiksel ilişkiler*

Parametre	Pearson Korelasyon r (p)	Spearman Korelasyon r (p)	Kendall-Tau Korelasyon r (p)
Yağış	0.445 (0.111)	0.323 (0.259)	0.231 (0.279)
Sıcaklık	-0.733 (0.002)	-0.644 (0.013)	-0.475 (0.020)

Sıcaklık hidrolik enerji üretimi üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 5). Pearson korelasyonu $r = -0.733$ $(p = 0.002)$ Spearman $r = -0.644$ $(p = 0.013)$ ve Kendall Tau $r = -0.475$ $(p = 0.020)$ değerleri sıcaklık arttıkça üretim miktarında düşüş eğilimi olduğunu göstermektedir. Öte yandan yağışın üretim üzerindeki etkisi tek başına istatistiksel anlamlılık göstermediği gözlenmektedir (Pearson $r = 0.445,\ p = 0.111$; Spearman $r = 0.323, p = 0.259$; Kendall $r = 0.231\ p = 0.279$). Bu bulgular hidrolik enerji üretiminde sıcaklığın daha güçlü bir belirleyici olduğunu ve yağışın tek başına etkisinin sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Aylık bazdaki incelemeler; üretimin zirve yaptığı dönemlerin yüksek yağış verileriyle örtüştüğünü düşük üretim periyotlarında ise yüksek sıcaklık ve düşük yağışın belirgin bir korelasyon sergilediğini göstermektedir. Elde edilen bulgular meteorolojik parametrelerin enerji üretimi üzerinde belirleyici bir role sahip olduğunu ve bu değişkenlerin enerji planlama ile yönetim stratejilerinde temel bir veri seti olarak kullanılmasının kritik önem arz ettiğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte mevcut modelin açıklayıcılık düzeyini ve tahmin başarısını daha ileri bir seviyeye taşımak için; havza karakteristikleri (eğim bakı bitki örtüsü) ve diğer spesifik hidrolojik faktörlerin (yağışın akışa geçme süresi buharlaşma yeraltı suyu beslenimi vb.) de analiz süreçlerine dahil edilmesi gerekmektedir. Bu durum hidrolik enerji üretiminin meteorolojik değişkenlerin yanı sıra kompleks havza dinamiklerinden de etkilendiğine işaret etmektedir Elde edilen sonuçlar meteorolojik parametrelerin enerji üretimi üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ancak planlama ve yönetim stratejilerinde göz önünde bulundurulmasının önemli olabileceğini açıkça göstermektedir.

Sonuç ve Öneriler

Türkiye'nin hidrolik enerji üretimi iklimsel değişkenler su kaynaklarının mevsimsel akış düzenleri ve enerji talebi gibi birçok faktörden etkilenmektedir. 2011-2024 yılları arasında yıllık ve aylık bazda incelenen veriler hidrolik enerji üretiminde dalgalanmaların belirgin olduğunu göstermektedir. Özellikle hidrolik enerji kurulu gücünün yıllar içinde artmasına rağmen toplam enerji üretimi içindeki payının azaldığı görülmektedir. Bunun temel nedenleri arasında düşük verimli HES'lerin sisteme dahil olması diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının üretimdeki payının artması ve iklim değişikliği kaynaklı yağış rejimlerindeki değişimler bulunmaktadır. İklim değişikliğinin etkisiyle sıcaklık artışlarının ve buharlaşma oranlarının yükseldiği yağışların düzensizleştiği ve ekstrem hava olaylarının su kaynakları üzerindeki etkilerinin arttığı gözlemlenmektedir. Özellikle yıllık bazda ele alınan verilerin enerji

üretimindeki dalgalanmaları tam olarak açıklamakta yetersiz kaldığı anlaşılmaktadır. Aylık bazda yapılan analizler hidrolik enerji üretiminin mevsimsel değişkenlikten büyük ölçüde etkilendiğini ve su yönetim stratejilerinin belirleyici rol oynadığını ortaya koymaktadır. Regresyon analizi sonuçlarına göre de sıcaklık verilerinin hidrolik enerji üretimini etkilediği anlaşılmıştır. Hidrolik enerji üretimi ve bu üretimin geleceği üzerine birkaç önemli nokta öne çıkmaktadır. İlk olarak hidrolik enerji üretimindeki dalgalanmalara enerji talebi ve verimlilik gibi faktörlerin etkisi daha ayrıntılı şekilde ele alınmalıdır. Özellikle enerji talebinin mevsimsel ve bölgesel farklılıkları hidrolik enerji üretimindeki dalgalanmaları doğrudan etkileyebilmektedir. Ayrıca düşük verimli tesislerin üretim kapasitesinin artırılması için yapılan yatırımların verimli bir enerji üretimi sağlamak adına daha etkin hale getirilmesi gerekmektedir. İklim değişikliğinin uzun vadeli etkileri hidrolik enerjinin gelecekteki rolünü etkileyecek önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. Bu doğrultuda su yönetimi ve depolama kapasitesinin arttırılması uzun vadeli enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla hidrolik enerjisinin entegrasyonu enerji çeşitliliği ve sürdürülebilir enerji üretimi için önemli fırsatlar sunmaktadır. Bu kaynakların birbirini tamamlayıcı etkilerinin nasıl optimize edileceği üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Son olarak hidrolik enerji üretimindeki mevsimsel değişkenliklerin daha sağlıklı öngörüler için aylık ve mevsimsel bazda analiz edilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu analizler su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve iklim değişikliğinin etkilerine karşı daha sağlam enerji planlamalarının yapılmasına olanak tanıyacaktır. Hidrolik enerji üretiminin iklimsel ve operasyonel faktörlerden nasıl etkilendiği Türkiye'nin enerji stratejisinin geleceği açısından daha ayrıntılı şekilde tartışılmalıdır. Türkiye'nin hidrolik enerji potansiyeli enerji bağımsızlığı açısından büyük bir avantaj sağlasa da değişen iklim koşulları ve artan enerji talebi doğrultusunda daha esnek sürdürülebilir ve entegre bir enerji yönetim modeline geçiş zorunluluk haline gelmiştir.

İklim değişikliğine uyum stratejileri: Hidrolik enerji üretimi yağış rejimlerine bağlı olduğu için su kaynakları üzerindeki uzun vadeli değişimler dikkate alınarak iklim değişikliğine uyum stratejileri geliştirilmelidir. Örneğin 10-20 yıllık periyotlarla su kaybını minimize edecek yeni nesil baraj inşa projeleri yerel iklim koşullarına göre optimize edilmelidir.

Mevsimsel ve bölgesel planlamalar: Yıllık enerji üretim tahminlerinin yanı sıra her bir baraj için mevsimsel su seviyeleri ve bölgesel yağış verileri analiz edilerek her ayın başında net üretim tahminleri yapılmalıdır. Ayrıca enerji üretiminin azalması durumunda bölgesel bazda enerji transfer hatları güçlendirilerek enerjinin ihtiyaç duyulan bölgelere yönlendirilmesi sağlanabilir.

Su yönetimi ve depolama kapasitesi: Su depolama ve yönetim stratejileri geliştirilerek kurak dönemlerde enerji üretimini sürdürülebilir kılacak önlemler alınmalıdır. Örneğin çoklu barajlar arasında suyun dengeli paylaşılmasını sağlayacak bir su transfer ağı kurulabilir. Ayrıca suyun buharlaşma kayıplarını azaltacak yüzey kaplama teknolojileri de devreye alınabilir.

Çok kaynaklı yenilenebilir enerji entegrasyonu: Hidroelektrik santrallerinin üretim dalgalanmalarını dengelemek için güneş ve rüzgâr enerjisi gibi diğer yenilenebilir kaynaklarla birlikte entegre enerji yönetim sistemleri oluşturulmalıdır. Örneğin bataryalarla desteklenen hibrit sistemler yüksek rüzgâr veya güneş enerjisi üretimi dönemlerinde su kullanımını azaltarak enerji depolayabilir.

Tarım politikalarının planlanması: su kaynaklarını daha verimli kullanmayı hedefleyen az su tüketen tarım yöntemlerinin teşvik edilmesi enerji üretimi ve tarım arasındaki dengeyi sağlayabilir. Tarımda kullanılan suyun miktarını azaltacak projeler desteklenerek su kaynaklarının sürdürülebilir şekilde kullanılmasına katkı sağlanabilir. Ayrıca az su tüketen ürünlerin yetiştirilmesi teşvik edilebilir.

Verimliliğin artırılması: Mevcut HES'lerde modernizasyon çalışmaları yapılarak verimlilik artırılmalı düşük verimli tesislerin sistem üzerindeki etkileri minimize edilmelidir. Eski jeneratörlerin yenileriyle değiştirilmesi dijital kontrol sistemleriyle izleme yapılması ve enerji üretim kayıplarını minimize etmek için yerel bakımların düzenli hale getirilmesi gibi adımları içerebilir.

Ekstrem hava olaylarına karşı önlemler: Sel ve kuraklık gibi ekstrem hava olaylarının etkilerini minimize etmek için gelişmiş meteorolojik tahmin sistemleri kullanılmalıdır. Bu sistemler barajlardaki su seviyelerinin tahminini daha doğru yaparak aşırı yağış ya da kuraklık durumlarında hızlı müdahale planlarının devreye girmesini sağlayabilir. Ayrıca erken uyarı mekanizmalarıyla vatandaşlara ve enerji santrallerine hızlı bilgi verilmesi olası zararın azaltılmasına yardımcı olabilir.

Beyanlar

Teşekkür: Yazar çalışmada kullanılan verilerin erişimine imkan sağlayan Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'ne ve veri tabanı yöneticilerine teşekkür etmektedir.

Fon/Finansman bilgileri: Bu çalışma herhangi bir kurum ve/veya kuruluş tarafından desteklenmemektedir.

Etik Kurul Onayı ve İzinler: Çalışma etik kurul izni veya herhangi bir özel izin gerektirmemektedir.

Çıkar çatışmaları/Çatışan çıkarlar: Herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Yazar(lar)ın Katkısı: Yazar makalenin son taslağı okumuş ve onaylamıştır.

Yapay Zekâ Kullanımı: Bu makalenin yazım sürecinde dil düzeltmeleri ve okunabilirliğin artırılması süreçlerinde DeepL Translate ve Gemini araçlarından destek alınmıştır. Yazar, yapay zeka tarafından sağlanan içeriği detaylıca inceleyerek son halini verdiğini ve çalışmanın tüm sorumluluğunu üstlendiğini beyan eder.

Kaynaklar

[1] Lee, D., Ng, J. Y., Galelli S., & Block P. (2022). Unfolding the relationship between seasonal forecast skill and value in hydropower production: A global analysis. *Hydrology and Earth System Sciences 26*(9), 2431–2448. https://doi.org/10.5194/hess-26-2431-2022

[2] UN Climate Change. (2018). *How hydropower can help climate action*. https://unfccc.int/news/how-hydropower-can-help-climate-action

[3] Shu, J., Qu, J. J., Motha, R., Xu, J., C., & Dong, D. F. (2018). Impacts of climate change on hydropower development and sustainability: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 163*(1), Article 012126. https://doi.org/10.1088/1755-1315/163/1/012126

[4] Kumar, A., Schei, T., Ahenkorah, A., Caceres Rodriguez, R., Devernay, J.-M., Freitas, M., Hall, D., Killingtveit, Å., & Liu, Z. (2011). Hydropower. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., & von Stechow, C. (Eds.), *IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation* (pp. 437–496). Cambridge University Press.

[5] Liu, B., Lund, J., Liu, L., Liao, S., Li, G., & Cheng C. (2020). Climate change impacts on hydropower in Yunnan China. *Water 12*(1), Article 197. https://doi.org/10.3390/w12010197

[6] United States Department of Energy. (2023). *Effects of climate change on federal hydropower*. https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-05/effects-of-climate-change-on-hydropower_2023-12.pdf

[7] Agrawala, S., Raksakulthai, V., van Aalst, M., Larsen, P., Smith, J., & Reynolds, J. (2003). *Development and climate change in Nepal: Focus on water resources and hydropower* (pp. 14-28). OECD Publishing.

[8] Gautam, B. R., Li, F., & Ru G. (2014). Climate change risk for hydropower schemes in Himalayan Region. *Environmental Science & Technology,* 48(14), 7702–7703. https://doi.org/10.1021/es502719t

[9] Adu-Poku, A., Siabi, E. K., Otchere, N. O., Effah, F. B., Awafo, E. A., Kemausuor, F., & Yazdanie, M. (2024). Impact of drought on hydropower generation in the Volta River basin and future projections under different climate and development pathways. *Energy and Climate Change 5,* Article 100169. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100169

[10] Boadi, S. A., & Owusu, K. (2019). Impact of climate change and variability on hydropower in Ghana. *African Geographical Review*, *38*(1) 19-31. https://doi.org/10.1080/19376812.2017.1284598

[11] Yira, Y., Mutsindikwa, T. C., Bossa, A. Y., Hounkpè, J., & Salack, S. (2021). Assessing climate change impact on the hydropower potential of the Bamboi catchment (Black Volta, West Africa). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences 384,* 349–354. https://doi.org/10.5194/piahs-384-349-2021

[12] Süme, V. (2018). Micro Water Structures as a Renewable Energy Source; A Case Study in Maçka, Trabzon, Turkey. *Gümüshane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 8*(2), 261-271. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.400800

[13] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi. (2012). *Enerji raporu.* Poyraz Ofset.

[14] Türkiye İstatistik Kurumu. (2025). *Enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ve payları.* https://data.tuik.gov.tr/Search/Search?text=Enerji%20kaynaklar%C4%B1na%20g%C3%B6re%20elektrik%20enerjisi%20%C3%BCretimi%20ve%20paylar%C4%B1

[15] Şavkar, E. (2024). Yenilenebilir enerji zemininde hidroelektrik enerji ve Türkiye potansiyeli. *Oğuzhan Sosyal Bilimler Dergisi 6*(1) 51–58. https://doi.org/10.55580/oguzhan.1484562

[16] Süme, V., Mete, B., & Özener, A. Y. (2017). Yukari Çoruh Havzasındaki su yapılarının enerji potansiyeli ve çevresel etkileşimi. *Türk Hidrolik Dergisi 1*(1), 7–12.

[17] Süme, V. (2025). A novel green and renewable energy approach; Watermills in Eastern Black Sea Region. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering 49*(1), 997–1008. https://doi.org/10.1007/s40996-024-01578-4

[18] Toklu, E., Güney, M. S., Işık, M., Comaklı, O., & Kaygusuz, K. (2010). Energy production consumption policies and recent developments in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 14*(4), 1172–1186. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.12.006

[19] Güler, Ö. (2009). Wind energy status in electrical energy production of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 13*(2) 473–478. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.03.015

[20] Mutlu, Y. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi 4*(2), 33–54. https://doi.org/10.1501/Csaum_0000000064

[21] Aydın, F. (2019). *Yenilenebilir enerji kaynaklarının Türkiye'de kullanımı ve sürdürülebilirliği* [Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.

[22] Devlet Su İşleri. (2024). *Yıllık faaliyet raporu*. https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetGaleriFile/425/DosyaGaleri/594/dsi_2024_yili_faaliyet_raporu.pdf

[23] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025a). *Hidrolik*. https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-hidrolik

[24] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2025b). *Elektrik*. https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik

[25] Devlet Su İşleri. (2025a). *2024 yılında enerjimizin %215'İ HES'lerden*. https://dsi.gov.tr/haber/detay/14826.

[26] Toprak, Z. F. (2023). Türkiye HES potansiyeli ve iklim değişikliği etkileri iklim değişikliği çerçevesinde su kaynaklarının mevcut durumu ve geleceği. *Türkiye Bilimler Akademisi*. https://doi.org/10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch13

[27] Alashan, S., Şen, Z., & Toprak, Z. F. (2016). Hydroelectric Energy Potential of Turkey: A Refined Calculation Method. *Arabian Journal for Science and Engineering 41*(4), 1511–1520. https://doi.org/10.1007/s13369-015-1982-5

[28] Toprak, Z. F. (2022). *Yenilenebilir enerji kaynağı olarak hidrolik enerji. Farklı yaklaşımlarla enerji kaynakları* (ss. 383–397). Orient Yayınları.

[29] Süme, V., & Türüt, R. (2018). Aşağı Çoruh'ta bulunan barajların hidroelektrik potansiyeli ve çevresel etkileri. *Turkish Journal of Hydraulic 2,* 12–18.

[30] Gökdemir, M., Kömürcü, M. I., & Evcimen, T. U. (2012). Türkiye'de hidroelektrik enerji ve HES uygulamalarına genel bakış. *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi 471*(57), 2011–2012.

[31] Süme, V., & Fırat, S. S. (2020a). Hidroelektrik santraller ve Trabzon ilinde bulunan hidroelektrik santrallerin şehir ve Doğu Karadeniz havzası için önemi. *Türk Hidrolik Dergisi 4*(1), 11–24.

[32] Süme, V., & Fırat, S. S. (2020b). Hidroelektrik santraller ve Rize ilinde bulunan hidroelektrik santrallerin şehir ve Doğu Karadeniz havzası için önemi. *Türk Hidrolik Dergisi 4*(2), 8–23.

[33] Türkiye İstatistik Kurumu. (2023). *Nüfus ve demografi.* https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=nufus-ve-demografi-109&dil=1

[34] McKinsey & Company. (2022). *Global energy perspective 2022*. https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2022

[35] Akpınar, E. (2005). Nehir tipi santrallerin Türkiye'nin hidroelektrik üretimindeki yeri. *Erzincan Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi 7*(2), 1–25. https://doi.org/10.33484/sinopfbd.1666588

[36] Kaplan, F. A. (2023). İklim değişikliğinin hidroelektrik santraller üzerindeki etkisi ve HES GES hibrit modeli. *DSİ Teknik Bülteni 1*(141), 8–13.

[37] Karakoyun, Y. (2024). Determination of effective parameters for hydropower plants' energy generation: A case study. *Applied Sciences 14*(5), Article 2069. https://doi.org/10.3390/app14052069

[38] Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (2025). *Aylık elektrik üretim tüketim raporları*. https://www.teias.gov.tr/ aylik-elektrik-uretim-tuketim-raporlari.

[39] Devlet Su İşleri. (2025b). *Faaliyet raporları*. https://www.dsi.gov.tr/sayfa/detay/759