



Hidroelektrik Santrallerinin Elektrik Dağıtım Şebekesine Etkisinin İncelenmesi

Investigation the Effect of Hydroelectric Power Plants on the Electricity Distribution Network

Serhan KAYA¹, Ulaş EMİNOĞLU²

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye
• serhankaya08@hotmail.com • ORCID > 0009-0004-4302-0578

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Samsun Üniversitesi, Samsun, Türkiye
• ulas.eminoglu@samsun.edu.tr • ORCID > 0000-0002-1908-5951

Makale Bilgisi/Article Information

Makale Türü/Article Types: Araştırma Makalesi/Research Article

Geliş Tarihi/Received: 28 Ağustos/August 2025

Kabul Tarihi/Accepted: 10 Ekim/October 2025

Yıl/Year: 2025 | **Cilt-Volume:** 5 | **Sayı-Issue:** 2 | **Sayfa/Pages:** 93-106

Atıf/Cite as: Kaya, S., Eminoğlu, U. "Hidroelektrik Santrallerinin Elektrik Dağıtım Şebekesine Etkisinin İncelenmesi "
Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi 5(2), Eylül 2025: 93-106.

Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Ulaş EMİNOĞLU

HİDROELEKTRİK SANTRALLERİNİN ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Dünyada kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların rezervlerinin hızla tükenmesi, ulaşım da yaşanan sıkıntılar ve çevreye olan zararları insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Hidroelektrik enerji yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın olanıdır. Ülkemiz zengin bir hidroelektrik enerji potansiyeline sahip olup bu potansiyelini değerlendirme konusunda da son derece kararlıdır. Yapılan tesisler artan enerji ihtiyacımızın bir kısmını karşılamış, ekonomimize de önemli katkılar sağlamıştır. Ancak çok sayıda hidroelektrik santralının mevcut enerji şebekemize dâhil olması beraberinde bazı teknik sorunların da ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Özellikle doğrudan elektrik dağıtım şebekesine bağlantısı yapılan elektrik üretim tesisleri bulundukları bölgede ki güç kalitesinin bozulmasına, gerilim ve frekans değerlerindeki ani değişimlere sebep olmaktadır. Bu çalışmanın amacı, hidroelektrik santrallerinin elektrik dağıtım şebekesine entegrasyonu ile ilgili yaşanan zorluklar ve bu konuda yapılan çalışmaları değerlendirmek, doğrudan elektrik dağıtım şebekesine bağlantısı yapılan hidroelektrik santrallerinin şebekeye sağladığı faydaları, sebep olduğu sorunları ve bu sorunların çözümüne yönelik önerileri detaylı bir şekilde incelemektir. Yapılan analizlerin gelecekte şebeke işletmecilerine ve araştırmacılara fayda sağlayacağı öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Kalitesi, Hidroelektrik Enerji, Şebeke Entegrasyonu ve Yenilenebilir Enerji.



INVESTIGATION THE EFFECT OF HYDROELECTRIC POWER PLANTS ON THE ELECTRICITY DISTRIBUTION NETWORK

ABSTRACT

The rapid depletion of fossil fuel reserves such as coal, oil, and natural gas worldwide, transportation difficulties, and environmental damage are driving people toward renewable energy sources. Hydroelectric energy is the most common renewable energy source. Our country possesses a rich hydroelectric energy potential and is determined to utilize it. These facilities have met some of our growing energy needs and made significant contributions to our economy. However, the integration of numerous hydroelectric power plants into our existing energy grid also creates some technical problems. Electricity generation facilities directly con-

nected to the electricity distribution grid, in particular, deteriorate power quality in their regions and cause sudden changes in voltage and frequency. The purpose of this study is to evaluate the challenges encountered in integrating hydroelectric power plants into the electricity distribution grid and the studies conducted on this issue. It is also to examine in detail the benefits that hydroelectric power plants directly connected to the electricity distribution grid provide, the problems they cause, and the proposed solutions to these problems. It is anticipated that the analyses will benefit grid operators and researchers in the future.

Keywords: Energy Quality, Hydroelectric Energy, Grid Integration and Renewable Energy.



Öne Çıkanlar

- Şebekeye entegrasyonda dağıtık üretim tesisleri için bağlana bilirlik kapasitesi hesaplanmalı ve buna uygun olarak altyapı yatırımları yapılmalıdır.
- Dağıtım şebekesi bir SCADA üzerinden takip edilmeli gerekiyorsa müdahale edilmelidir. Şebekelerin sorunsuz çalışabilmesi ve sürekliliği için yapay zekâ tabanlı algoritmalarından yararlanılmalıdır.
- Dağıtım sistemi içerisindeki dağıtık üretim tesislerinin reaktif güç çıkışının kontrolü yoluyla da bağlantı noktası gerilimi kontrolü en etkili yöntemlerden biridir.

1. GİRİŞ

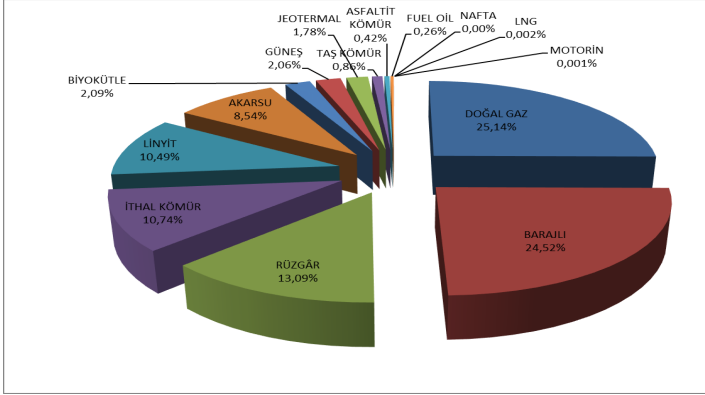
Dünyada sanayi ve teknolojinin hızla gelişmesi ve buna bağlı olarak enerji ihtiyacındaki artış, enerji kaynaklarına ulaşımında yaşanan sorunlar ülkeleri ellerindeki enerji potansiyelini kullanmaya ve yenilebilir enerji kaynaklarına yönelmeye itmiştir. Ülkemize enerji kaynakları açısından bakıldığında zengin bir yenilebilir enerji potansiyeline sahiptir. Son dönemlerde rüzgâr, güneş, hidro, jeotermal, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgi ve yatırım hızla artmaktadır. Bulunduğumuz coğrafyanın özelliklerini ve iklimini de düşündüğümüzde hiç kuşkusuz en çok tercih edilenlerden biriside hidro enerjidir [19].

Son yıllarda sayıları hızla artan rüzgâr ve güneş enerji santrallerinin elektrik şebekesine entegrasyonu tüm dünyada önemli bir sorun haline gelmiştir. Rüzgâr ve güneş santrallerinin düzensiz üretim yapısının hidrolik tesisler aracılığı ile giderilebileceği ve bu sayede rüzgâr ve güneş enerjisinden daha etkin bir şekilde faydalanılabileceği öngörülmektedir. Güneş, rüzgâr ve hidroelektrik tesislerin hib-

rit kullanımı ile elektrik şebekesi daha kararlı olacağı düşünülmektedir. Rüzgâr ve güneş enerjisi kullanılarak suyun pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerinde depolanması sağlanacak ve potansiyel enerji formunda depolanan bu güç kontrollü bir şekilde kullanılabilir. Bu durum hidrolik enerjinin önemini daha da artırmıştır [17]. Günümüzde hidroelektrik santralleri kurulu gücüne ve teknik özelliklerine de bağlı olarak en güvenilir enerji kaynağı olarak kabul edilmektedir [26]. Hidroelektrik santraller genel olarak üç farklı şekilde tesis edilebilir; barajlı, akarsu tipi ve pompaj depolamalı. Hidroelektrik, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde enerji verimliliği ve üretim miktarı olarak dünyada birinci sırada ve küresel potansiyelin yaklaşık olarak %30'luk bir kısmı değerlendirilmiş olmasına rağmen küresel elektrik üretiminin yaklaşık %17'sini karşılamaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin yaygınlaşması ile elektrik üretimindeki payı azalsa da önemini korumaya devam etmektedir [18]. Hidroelektrik santrallerin iki özelliği Avrupa enerji piyasası için çok kıymetlidir. Bunlar; esneklik ve enerjiyi depolayabilme özellikleridir. Bu faydayı diğer enerji kaynakları veya farklı teknolojilerle karşılamak mümkün değildir. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları yaygınlaşsa bile arz talep dengesinin sağlanabilmesi için hidrolik kaynakları en verimli şekilde kullanmak gerekmektedir. Litvanya ve İtalya gibi ülkelerde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artmasına bağlı olarak enerji fiyatları çok düşmekte, bazen negatif fiyatlar oluşmaktadır. Bu gibi durumlar pek çok Avrupa ülkesinde yaşanmaktadır ve çözüm olarak pompaj depolamalı hidroelektrik santraller önerilmektedir. Bu yönüyle bakıldığında rezervuar alanı olmayan küçük hidroelektrik santraller de diğer yenilenebilir enerji kaynaklarından farksızdır [12].

Norveç, İsveç, Danimarka, Birleşik Krallık ve Almanya için 2050 yılı elektrik iletim ve dağıtımını kapsayan bir modelleme ve optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada kuzey Avrupa'da elektriğin birim fiyatının bölgeler arasında yüksek değişkenlik göstermemesi için rüzgârın ve güneşin yüksek olduğu dönemlerde üretilen enerji iletim hatları ile diğer bölgelere; düşük olduğu dönemlerde ise hidroelektrik santrallerinde depolanan, üretilen enerjinin bu bölgelere iletilerek arz-talep dengesinin ve fiyat istikrarının sağlanmasına katkı sağlayacağı belirtilmiştir [11]. Ekonomide öngörülemeyen durumlar dikkate alınmazsa, Türkiye'de elektrik tüketimi her yıl yaklaşık olarak %8 oranında artmaktadır. Artan bu talebi karşılamak ve enerji dışı bağımlılığın artmaması için ülkemiz yeni enerji projelerine yatırım yapmak zorundadır. Bu amaçla bütün alternatif enerji kaynakları değerlendirilmelidir [2]. Türkiye'de toplam elektrik üretiminin kaynak bazında dağılımına baktığımızda, 2024 yılında; %35,35 kömür, %21,57 hidroelektrik, %18,7 doğal gaz, %10,55 rüzgâr, %7,46 güneş, %3,24 jeotermal, %2,93 biokütle ve diğerler enerji kaynakları olarak görülmektedir. Lisanslı hidrolik kaynaklardan sağlanan elektrik üretiminin, %74,1'i depolamalı HES'lerde, %25,84'ü ise akarsu tipi santrallerde üretilmektedir [5]. 2009 yılında yayımlanan "Arz Güvenliği Strateji Belgesi" ile elektrik üretimi ve dağıtımı ile ilgili özelleştirme işlemleri hızlanmıştır. Ayrıca 2023 yılına kadar teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilecek hidroelektrik

potansiyelimizin tamamının elektrik enerjisi üretiminde kullanılması kararlaştırılmıştı [1]. 2023 yılında elektrik üretimin kaynak bazında dağılımına baktığımızda; %19,33 hidroelektrik, %20,97 doğal gaz, %10,3 rüzgâr, %6,67 güneş, %3,35 jeotermal ve diğerler enerji kaynakları olarak görülmektedir [4]. Son yıllarda resmi kurumlarca yayımlanan raporlar ve istatistiksel veriler incelendiğinde net bir şekilde görülmektedir ki hidrolik kaynaklar yenilenebilir enerji kaynakları arasında en yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum Şekil.1'de görsel olarak verilmektedir.



Şekil 1. 2024 Yılı Sonu İtibarıyla Lisanslı Kurulu Gücün Kaynaklara Göre Dağılımı [6].

Yaklaşık son on beş yılda özel sektöründe sürece dâhil olması ile birlikte yüzlerce küçük ve orta ölçekli elektrik üretim tesisi yapılmış ve bu tesislerin genellikle mevcut elektrik dağıtım şebekesine doğrudan bağlantısı yapılmıştır. Yapılan tesislerin büyük bir kısmını hidroelektrik santralleri oluşturmaktadır ve bu tesisler yapılırken, kuruldukları bölgedeki enerji ihtiyacından daha çok akarsuların enerji potansiyelleri dikkate alınmıştır. Bu durum bazı bölgelerde; özellikle sanayinin gelişmediği kırsal alanlarda arz talep dengesinin bozulmasına ve buna bağlı olarak elektrik dağıtım hatlarında enerji kayıplarının yaşanmasına ve güç kalitesi sorunlarının ortaya çıkmasına sebep olmuştur [16]. Enerji kalitesi en basit ifadeyle; gerilim, akım, frekans, harmonikler, reaktif güç, fliker gibi elektriksel parametrelerin bir otorite tarafından belirtilen limitler dahilinde olup olmaması durumudur [22]. Özellikle frekans ve gerilim kararlılığı enerji kalitesi açısından son derece önemlidir. Frekans kararlılığı sistemdeki herhangi bir bozulma sebebi ile üretim ve yük arasında bir fark oluştuğunda sistemin frekansını belli limitler içerisinde tutabilme yeteneğidir. Gerilim kararlılığı ise gerilim değerinin sürekli belli limitler içerisinde kalabilmesi durumudur [25].

Enerji kalitesinin sağlanması dağıtım şirketleri için birinci öncelik olmalıdır aksi takdirde büyük maddi kayıplar kaçınılmaz olur. Tüm bu durumların önüne

geçebilmek, güç sistemlerinin kesintisiz, kaliteli, güvenilir ve sağlıklı çalışmasını sağlayabilmek için ülkemizde ve dünyada bu konuda pek çok çalışma yapılmıştır. Ülkemizde, elektrik dağıtım şebekelerinde enerji kalitesinin sağlanabilmesi için EPDK tarafından yayınlanmış mevzuat hükümleri bulunmaktadır. Elektrik dağıtım şebekesine doğrudan bağlantısı yapılan dağıtık üretim tesisleri ile ilgili yapılan bazı bilimsel çalışmalar literatürde mevcuttur. Yalçınöz ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada güç sistemlerinde gerilim kararlılığı konusunda yapay sinir ağları kullanılmış, üretilen aktif ve reaktif güç verileri tek katmanlı ve iki katmanlı yapay sinir ağı modellerinde MATLAB programı kullanılarak benzetim gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada yük akışı ve sistem kararlılığı açısından gerçeğe yakın sonuçlar alınmıştır [8]. Dağıtık üretim tesislerinin güç sistemine etkileri incelenmiş, çeşitli arıza durumları için sistem gözlemlenmiştir. Tuttokmağı ve Kaygusuz tarafından yapılan çalışmada arıza süresi kısa olduğunda dağıtık sistemlerin bir süre salınımdan sonra dengeye geldiği fakat arıza süresi uzatıldığında jeneratörlerin devre dışı kaldığı ve güç sistemin çöktüğü gözlemlenmiştir. Yapılan test çalışmalarının sonucunda dağıtık üretim tesisinin konumunun, içerdiği teknolojinin ve bir takım yapısal özelliklerinin sistem kararlılığı üzerinde olumlu veya olumsuz etkileri olabileceği anlaşılmıştır [15].

Türkiye dâhil dünya genelinde birçok ülkede elektrik şebekesine yönelik düzenlenmiş mevzuatlar incelenmiş ve şebeke için en önemli parametrelerin frekans kontrolü, reaktif güç kontrolü, arıza sonrası sisteme katkı ve güç kalitesi olduğu tespit edilmiştir [24]. Doğrudan elektrik dağıtım şebekesine bağlantısı yapılmış küçük hidroelektrik santralleri dağıtık elektrik üretim tesisi olarak kabul edilmektedir. Dağıtık üretim tesisleri arz talep dengesinin korunması, iletim hatlarında oluşan enerji kayıplarının azaltılması, enerji çeşitliliğinin artırılması ve katılımcı piyasanın oluşmasına katkı sağladığı için faydalıdır [14]. Kullanılan geleneksel güç sistemleri, merkezi üretim altyapısına sahiptir ve iletimden dağıtıma doğru tek yönlü güç akışına göre tasarlanmışlardır. Dağıtım seviyesinden şebekeye bağlantısı yapılan elektrik üretim tesisleri ise mevcut güç sistemlerinin altyapısına aykırı bir durum oluşturmakta ve üretilen fazla enerji dağıtımdan iletime doğru yük akışı oluşturmaktadır. Bu durum çeşitli sorunlara neden olabilmektedir [21]. Dağıtık üretim tesislerinin enterkonnekte sisteme entegrasyonu doğru planlınırsa; üretim çeşitliliği artacak, iletim mesafe azalacak ve buna bağlı olarak hat kayıpları azalacaktır. Hat ve transformatörlerde aşırı yüklenme problemi ortadan kalkacak, bu sayede sistem yeterliliği sağlanacak, sürdürülebilir bir güç kalitesi sağlanabilecektir [21].

Frekans kararlılığı bir sistem arızası olduğunda veya üretim ve tüketim dengesizliği olduğunda güç sisteminin sabit bir frekansta kalabilme yeteneğidir. Bu olayın gerçekleşme sebebi üretim miktarı veya yüklerdeki ani değişimler olabileceği gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonundan da kaynaklanabilir. Gerilim kararlılığı ise sistemin sürekli olarak belirlenen sınır değerler arasında kalabilmesi durumudur. Gerilim kararsızlığının meydana gelmesinin

farklı sebepleri olabilir fakat genellikle reaktif güç talebinin sistem tarafından karşılanamaması sonucu oluşmaktadır. Üretim tesislerinin tüketim merkezlerine olan uzaklığı, jeneratör arızaları, hat kesintileri, yük karakteristikleri, kontrol ve koruma sistemleri arasındaki koordinasyon eksikliği gibi durumlarda gerilim kararlılığını bozabilir [25].

Yapılan literatür araştırmalarından da anlaşıldığı üzere elektrik üretim tesislerinin dağıtım şebekesine doğrudan bağlantı yapılmasının avantajları olduğu gibi pek çok olumsuz sonuçları da bulunmaktadır. Çalışmada bu konu detaylı olarak incelenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Büyük rezervuar alanlarına sahip olmayan hidroelektrik santrallerinde elektrik üretim miktarı yapıları gereği değişkendir. Mevsimsel etkiler veya yaşanan bir takım doğa olayları sonucunda talep edilenin üzerinde üretim yapıp güç kalitesini bozabilir veya talep edilen üretimi karşılayamayıp gerilim ve frekans düşümlerine sebep olabilmektedirler. Bu durumların oluşmasında tesisin konumu, kullanılan jeneratörler ve ikaz sistemleri son derece etkilidir [16].

Bir elektrik üretim tesisi yapılırken bağlantısı yapılacak olan şebekenin teknik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmeli, üretim tesisinin mevcut şebekeye bağlanabilirliği ile ilgili gerekli hesaplamalar yapılmalı, mümkünse dağıtım şebekesi ve üretim tesisinin birlikte kontrol edilebildiği bir SCADA sistemi tasarlanmalıdır. Oluşabilecek en kötü senaryo düşünülerek gerekli planlamalar yapılmalı ve kullanılacak teçhizat buna göre seçilmelidir. Ancak yapılan tüm hesaplamalara, planlamalara rağmen yine de enerji kalitesini olumsuz yönde etkileyen durumlar yaşanabilmektedir. Şebekede oluşan bu sorunların çözümü için enerji depolamalı sistemlerin kurulması önerilmektedir. Burada şebekeye bağlı büyük bataryaların kullanılabilmesi ve üretim tesislerindeki ani güç değişimlerinden şebekenin daha az etkileneceği ayrıca yükteki ani değişimlerinde şebekeye etkisinin azalacağı önerilmektedir. Bu depolama tesislerinin dezavantajı ise sürekli takip edilmesi gerektiği aksi takdirde yangınlara veya maddi hasarlara yol açabileceği bilinmektedir. Bu konu ile ilgili çalışmalar devam etmektedir [20]. Elektrik şebeke yönetmeliği dağıtım şebekesi işletmecileri ve üretim tesisleri için bazı sınırlamalar getirmektedir. Yönetmeliğinin amacı enerji kalitesinin korunması, kesintisiz, sürdürülebilir bir elektrik dağıtım ve iletim şebekesinin oluşmasını sağlamaktır [3]. Bu sınırlamalardan bir kısmı aşağıda sıralanmıştır.

- Orta gerilimden sadece üretim tesislerinin bağlı olduğu 400/33 kV merkezlerde 33 kV gerilim seviyesinde kısa devre arıza akımı 25 kA ile sınırlandırılmakta diğer durumlarda 33 kV gerilim seviyesinde kısa devre arıza akımları 16 kA ile sınırlandırılmaktadır [3].

- Sistem frekansının kararsız işletme koşullarında 52,5 Hz'e çıkabileceği veya 47,5 Hz'e düşebileceği göz önünde bulundurularak, toplam kurulu gücü 1 MW ve üzerinde olan üretim tesisleri ve/veya TEİAŞ teçhizatının aşağıdaki tabloda belirtilen minimum süre kadar iletim şebekesine bağlı kalarak çalışacak şekilde tasarlanması zorunludur [3].
- Dağıtım hatlarında gerilim değerinin $\pm\%10$ gerilim sınırını aşmaması gerektiği belirtilmektedir [3].

Tablo 1. Elektrik üretim tesisleri çalışma frekans aralıkları [3].

Frekans Aralığı (Hz)	Minimum Çalışma Süresi
51.5 - 52.5	10 dakika
50.5 - 51.5	1 saat
49.0 - 50.5	Sürekli
48.5 - 49.0	1 saat
48.0 - 48.5	20 dakika
47.5 - 48.0	10 dakika

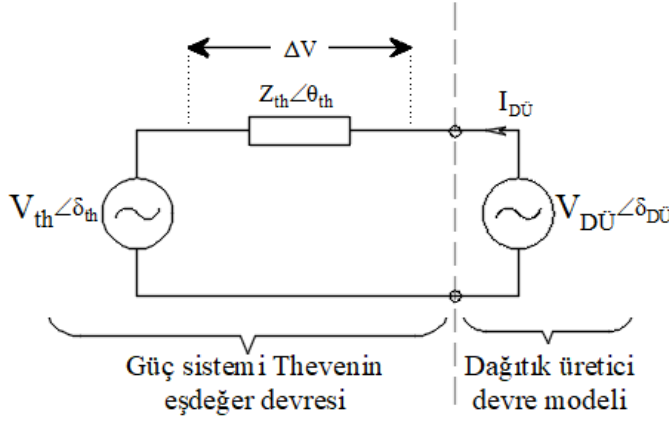
2025 yılında TEİAŞ tarafından elektrik depolama tesislerinin/ünitelerinin yapımı ve işletilmesine yönelik belirli kriterler getirilmiştir. Yapılan çalışmaların sistem güvenliği ve enerji kalitesi açısından faydalı olacağı açıktır. Getirilen kriterlerin bir kısmı aşağıda sıralanmıştır.

- Kurulu gücü seviyesinde aktif güç miktarı ile sistemden enerji çektiği durumdan, kurulu gücü seviyesinde sisteme enerji aktarır durumuna iki saniye içerisinde geçebilecek, sistemden enerji çekmediği durumda ise bir saniye içerisinde kurulu gücü kadar enerji sağlayacak nitelikte olmalıdır [9].
- Elektrik depolamalı tesisleri şebeke bağlantı noktalarında %3'ten daha fazla gerilim dalgalanmasına sebep olmayacak şekilde tasarlanmalıdır [9].
- Frekans 50.2 Hz değerini geçtiğinde şebekeden çektiği aktif enerji değerini artırmalı, 49.8 Hz değerinin altına indiğinde şebekeye aktif enerji verebilmeli ve bu tepkiyi en geç iki saniye içerisinde gerçekleştirebilmelidir. Ayrıca gerektiğinde tesis kurulu gücüne de bağlı olarak şebekeye reaktif güç desteği de sağlayabilmelidir [9].
- Elektrik depolama tesisleri, kurulacak olan bir SCADA sistemi aracılığıyla mevcut durumdaki aktif güç, reaktif güç aktarım/talep miktarları ve kapasiteleri anlık olarak yetkili birimler ile paylaşacaktır [7].

Elektrik depolama tesislerinin yaygınlaşması şebeke güvenliğine fayda sağlamaktadır. Fakat taşıdığı riskler, kurulum maliyetleri ve kapasite sorunları bu konuda farklı arayışları da beraberinde getirmektedir. Bu seçeneklerden biride pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerdir. Bu sayede elektriği farklı formda depolayabilir ve gerektiğinde kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda Avrupa ülkelerinin elektrik şebekelerine daha fazla yenilenebilir enerji kaynağı entegre edebilmeleri ve küresel ısınmanın önüne geçebilmek için hidrolik kaynakları daha verimli kullanmaları gerektiği belirtilmiştir. Güvenilir, istikrarlı bir enerji politikasının gereği olarak özellikle pompaj depolamalı hidroelektrik santrallerin yapımına öncelik verilmesi gerektiği ifade edilmiştir. Farklı ülkelerin birlikte kullanıldığı akarsular için iş birliği yapılarak bu kaynaklardan daha fazla verim elde edilmesi, elektrik şebekelerinin birleştirilerek mevsimsel etkilerin en aza indirgenmesi ve Avrupa ülkelerinin finansman kaynağı oluşturarak hidrolik enerjiye yatırım yapmaları önerilmiştir [23].

Küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santrallerin elektrik dağıtım şebekesine bağlantısı ile ilgili yapılacak hesaplamalarda Şekil 2’de verilen Thevenin eşdeğer devre ile modellenenilmektedir. Bir güç sisteminin Dağıtık Üretim (DÜ) bağlantı noktasına göre Thevenin eşdeğer devre modeli Şekil 2’de verilmiştir. Oluşturulan devre modelinde Z_{th} , bağlantı noktasına ait Thevenin eşdeğer empedansını ve θ_{th} ise bu empedansa ait faz açısını ifade etmektedir. Bağlantı noktasına göre Thevenin eşdeğer devre gerilimi V_{th} , dağıtık üreticinin gerilimi ise $V_{DÜ}$ gösterilmiştir. Bu gerilimlere ait faz açıları sırasıyla δ_{th} ve δ_{DG} ile verilmiştir. Akım $I_{DÜ}$ dağıtık üreticiden sisteme sağlanan akıma karşılık gelmektedir ve ΔV ise bu akımın Z_{th} üzerinde oluşturduğu gerilimi ifade etmektedir. Oluşturulan sistem modeli esas alınarak, verilen parametreler üzerinden sisteme bağlı dağıtık üreticinin gücü tanımlanabilmektedir [13].

Tablo 2 ve 3’de belirtilen tarih ve saatlerde Irmak Hidroelektrik Santraline ait elektrik üretim değerleri ve tesiste kaydedilen gerilim değerleri görülmektedir. Tablo 2; mart ayı ve Tablo 3 ise ağustos ayına ait bazı üretim ve gerilim değerlerini göstermektedir. Mart ve ağustos aylarında üretim değerleri tablolarda birbirine yakın olmasına rağmen kaydedilen gerilim değerleri farklılık göstermektedir. Mart ayında belirtilen gerilim değerleri normalden daha yüksek iken, ağustos ayında bu değerlerin daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebi üretim ve tüketim değerlerindeki değişimlerdir. Bu değerler bazen $\pm 10\%$ gerilim sınırını da aşarak enerji kalitesinin bozulmasına sebep olmakta ve dağıtım şebekesine bağlı elektronik cihazların bozulmasına sebep olabilmektedir. Bu durum makalenin devamında örneklendirilmiştir.



Şekil 2. Bir güç sistemine ait Thevenin eşdeğer devre modeli [13].

Tablo 2. Mart ayı Irmak HES üretim değerleri [10].

Tarih	Saat	Toplam (MWh)	OG Hat Voltajı (kV)	AG Tek Faz Gerilimi (V)
5.03.2023	02:00	4.61	32.81	241
5.03.2023	04:00	4.61	33.06	243
5.03.2023	07:00	1.79	33.27	244
5.03.2023	10:00	4.66	32.87	241
5.03.2023	19:00	4.80	31.86	234
5.03.2023	20:00	4.79	31.93	234
5.03.2023	23:00	4.79	32.29	237

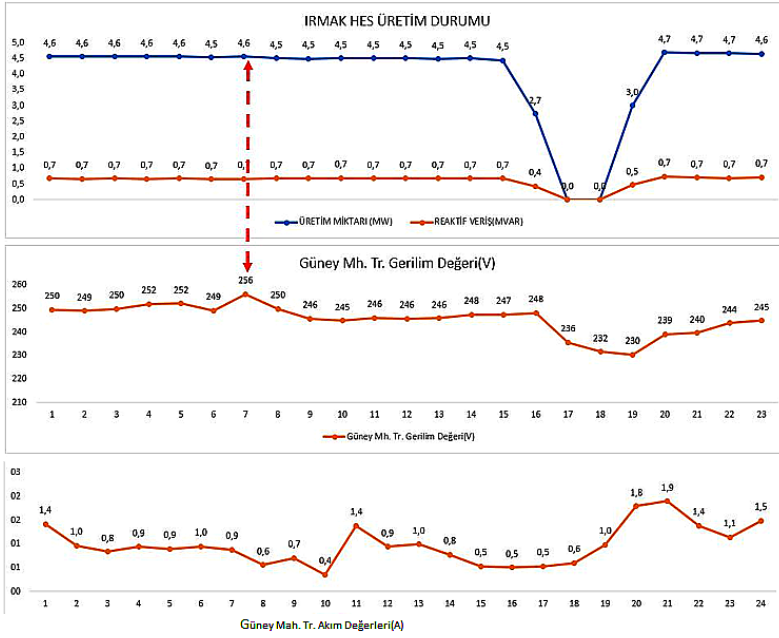
Tablo 3. Ağustos ayı Irmak HES üretim değerleri [10].

Tarih	Saat	Toplam (MWh)	OG Hat Voltajı (kV)	AG Tek Faz Gerilimi (V)
6.08.2023	00:00	4.57	31.09	228
6.08.2023	04:00	4.56	31.62	232
6.08.2023	12:00	4.56	30.70	225
6.08.2023	13:00	4.53	30.74	226
6.08.2023	18:00	4.50	30.57	224
6.08.2023	21:00	4.50	30.36	223

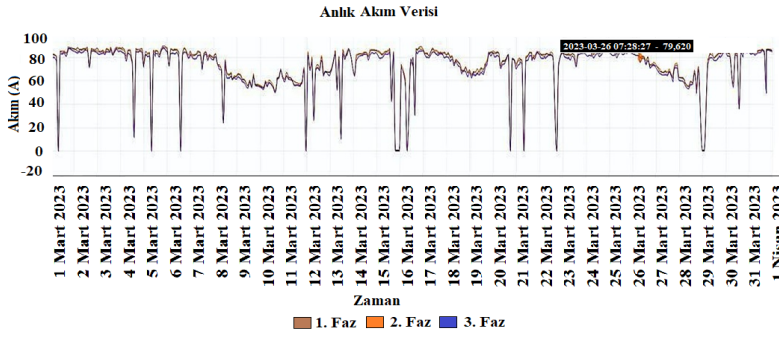
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında Ordu, Çatalpınar ilçesinde bulunan elektrik dağıtım şebekesine Güney KÖK üzerinden bağlantısı yapılmış Irmak HES tesisine ait gerçək veriler incelenmektedir. Burada amaç çalışmada verilen bilgilerin doğruluğunu gözlemlemek ve benzer durumda olan elektrik üretim tesisleri için çözüm önerileri sunmaktır. Görüldüğü üzere üretim tesisi üretim konumunda iken aşırı ikaz konumunda çalışarak şebekeye reaktif güç aktarmaktadır. Şebekeye vermiş olduğu yaklaşık 0,7 MVAR reaktif güç ve bölgede enerji tüketim miktarının az olması nedeniyle üretim tesisinin bağlı olduğu dağıtım merkezinin çıkışında bulunan dağıtım transformatörlerinde gerilim yükselmesi gerçekleşmektedir. Burada üretim ve tüketim miktarının değişken olması nedeniyle dağıtım transformatörlerinde kademeli değişim önceki dönemlerde denenmiş olup verimli sonuçlar alınamamıştır. Gerilim yükselmesi nedeni ile dağıtım şebekesinin ± 10 gerilim sınırları aşılarak kalite standartları sağlanamamakta olup, üretim tesisinin bağlı olduğu dağıtım merkezi üzerinden enerji verilen nihai tüketicilerde gerilim yükselmesine bağlı cihaz hasarı riski oluşmaktadır.

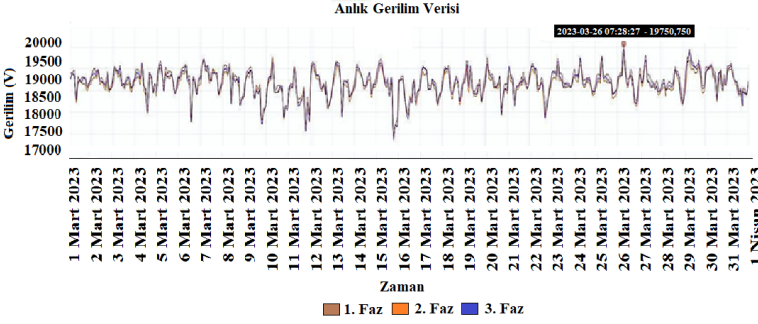
Şekil 3’de 22 Mart 2023 tarihine ait üretim tesisinde gerçekleşen üretim miktarları ve aynı baraya bağlantılı dağıtım transformatörünün tek fazına ait gerilim-akım değerleri görülmektedir. Akım değerleri 100/5’lik OG akım trafosunun sekonder ucundan alınmış olup tesisin 4.5 MW’ta çalıştığı ve sisteme yaklaşık 80 amper verdiği durumda transformatörden çekilen akım değeri yaklaşık (10-40) amper değerindedir. Bu durumda dağıtım barasına verilen fazla enerjiye bağlı olarak, yük akışı dağıtımdan iletme doğru gerçekleşmekte ve enerji kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır. Dağıtım şebekesinin gerilim değeri üretim tesisinin üretim miktarına bağlı olarak sürekli dalgalanmaktadır. Irmak HES tesisinin üretim anında bölgede meydana getirdiği gerilim yükselmesinin önüne geçmek için reaktör tesisi kurulabilir fakat bu durumda üretim tesisinin üretim yapmadığı durumlarda bölgede gerilim düşümü meydana gelecektir. Ayrıca kurulacak reaktör tesisi dağıtım şebekesinin teknik kayıplarının artmasına neden olacaktır. Özetle burada yapılabilecek en ekonomik çözüm; aşırı ikaz konumundan (pozitif $\cos(\varphi)$) düşük ikaz konumuna (negatif $\cos(\varphi)$) geçilerek tesisin, dağıtım şebekesinin güvenliğine zarar vermesinin engellenmesi olacaktır. Şekil 4 ve Şekil 5’te ilgili üretim tesisinin ölçü hücresinden alınan 2023 yılı Mart ayı boyunca değişen akım ve gerilim (faz gerilimi) değerleri görülmektedir. Görüldüğü üzere üretim tesisinin sisteme verdiği enerji miktarı değiştiğinde gerilim değerleri de değişkenlik göstermektedir. Dağıtım tesisine verilen enerji miktarı arttıkça gerilim yükselmekte azaldığında ise düşmektedir. Bu durum dağıtım sisteminde enerji kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3. 22 Mart 2023 Tarihli Çatalpınar Güney KÖK, Güney Mahallesi çıkışı akım-gerilim değerleri [4].



Şekil 4. Çatalpınar Güney KÖK (Güney Mahallesi) Mart-2023 aylık akım değerleri [4].



Şekil 5. Çatalpınar Güney KÖK (Güney Mahallesi) Mart-2023 aylık gerilim değerleri [4].

4. SONUÇLAR

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santrallerinin doğrudan elektrik dağıtım şebekesine bağlanmasının bazı olumsuz sonuçları olduğu görülmektedir. Bunlar enerji kalitesi sorunları, enerji kayıpları, üretim tesislerinde ve abonelerde görülen maddi hasarlar olarak özetlenebilir. Bu sorunların çözümüne yönelik şönt kapasitörler, reaktörler ve gerilim regülatörleri kullanılmaktadır. Fakat bu durum ek maliyetlere sebebiyet vermektedir. Ayrıca dağıtım şebekelerinde güç akışının çift yönlü olması sebebiyle bu yöntemler tek başına yeterli olmamaktadır. Diğer taraftan yükte kademe değiştirme özelliğine sahip transformatörler ile kademe değişikliği yapılarak gerilimin seviyesinin müsaade edilen sınırlar içerisinde tutulmasına çalışılmakta fakat bu yöntem de zaman zaman yetersiz kalmaktadır. Çünkü dağıtım şebekesinin özelliğine bağlı olarak aynı anda gerilim seviyesinin düşük ve gerilim seviyesinin yüksek olduğu fiderler olabilmektedir. Bazı bölgelerde tüketimin az olduğu dönemlerde sisteme verilen aktif güç sınırlandırılmaya çalışılmakta, bu durumda üretim tesislerinde ciddi üretim kayıplarına sebep olmaktadır. Sonuç olarak;

- Orta ve küçük ölçekli hidroelektrik santralleri kurulurken bölgede oluşabilecek en kötü senaryo düşünülerek planlama yapılmalıdır. Dağıtık üretim tesisleri için bağlana bilirlik kapasitesi hesaplanmalı ve buna uygun olarak altyapı yatırımları yapılmalıdır.
- Dağıtım şebekesi bir SCADA üzerinden takip edilmeli gerekiyorsa müdahale edilmelidir.
- Dağıtım şebekelerinin sorunsuz çalışabilmesi ve sürekliliği için yapay zekâ tabanlı algoritmalarından yararlanılmalıdır. Bu şekilde en kısa sürede en doğru kararın verilmesi sağlanabilir.

- Özellikle dağıtık üretim tesislerinin yoğun olduğu bölgelerde gerekiyorsa yeni trafo merkezleri inşa edilmelidir.
- Depolamalı santrallerin yapılması da dağıtım şebekesinin sürekliliği ve enerji kalitesi açısından fayda sağlayacaktır.

Ayrıca dağıtım sistemi içerisindeki dağıtık üretim tesislerinin reaktif güç çıkışının kontrolü yoluyla da bağlantı noktası gerilimi kontrol edilebilmektedir. Bu tür sistemler için en ekonomik ve etkili çözümün bu olduğu görülmektedir. Kontrol işleminde bulanık mantık veya yapay zekâ uygulamalarından faydalanılması da verimli sonuçlar verecektir.

Yazar Katkı Oranları

Çalışmanın Tasarlanması (Design of Study): SK(%50), UE(%50)

Veri Toplanması (Data Acquisition): SK(%50), UE(%50)

Veri Analizi (Data Analysis): SK(%50), UE(%50)

Makalenin Yazımı (Writing Up): SK(%50), UE(%50)

Makale Gönderimi ve Revizyonu (Submission and Revision): SK(%50), UE(%50)

KAYNAKLAR

- [1] Anon., "Elektrik Enerji Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi," T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, 2009.
- [2] Anon., "DSİ Genel Müdürlüğü 2017 Faaliyet Raporu: Hidrolik Enerji," Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2017.
- [3] Anon., "Elektrik Şebeke Yönetmeliği," Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Ankara, 2017.
- [4] Anon., "Yeşilirmak Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi (YEDAŞ)," [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.yedas.com/>, Erişim: 22 Ekim 2025.
- [5] Anon., "Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2023 Yılı İstatistikleri," Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Ankara, 2024.
- [6] Anon., "Elektrik Piyasası 2024 Yılı Piyasa Gelişim Raporu," Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK), Ankara, 2025.
- [7] Anon., "Elektrik Depolama Tesislerinin Şebeke Bağlantı ve Uyumluluk Kriterleri," Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Ankara, 2025.
- [8] T. Y. H. Altun ve H. Karadal, "Farklı topolojiye sahip MLP yapay sinir ağları ile enerji sistemlerinde gerilim kararlılığı analizi," 13th Turkish Symposium on Artificial Intelligence and Artificial Neural Networks, ss. 547-554, 2004.
- [9] Anon., "Elektrik Depolama Tesislerinin İzlenmesi ve Kontrol Edilmesine İlişkin Usul ve Esaslar," Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ), Ankara, 2025.
- [10] Anon., "EPIAŞ Şeffaflık Platformu," Enerji Piyasaları İşletme A.Ş. (EPIAŞ), Ankara, [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://seffaflik.epias.com.tr/home>, Erişim: 22 Ekim 2025.
- [11] A. Arvesen ve diğerleri, "On the potential role of flexible Norwegian hydropower in managing challenging renewable energy variability events in Europe," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, c. 1442, s. 1, Makale no. 012003, doi: 10.1088/1755-1315/1442/1/012003, 2025.

- [12] M. Ćerpinska ve diğerleri, "The role of hydropower on energy market: a comparative study in four EU countries," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, c. 1442, s. 1, Makale no. 012001, doi: 10.1088/1755-1315/1442/1/012001, 2025.
- [13] K. Doğanşahin, B. Kekezoğlu ve R. Yumurtacı, "An improved mathematical model for the calculation of maximum permissible DG integration capacity," Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, c. 35, s. 1, ss. 275–285, doi: 10.17341/gazimmfd.463225, 2020.
- [14] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, W. D'Haeseleer ve R. Belmans, "Distributed generation: definition, benefits and issues," Center for Economic Studies Working Paper Series, ss. 0–21, 2003.
- [15] A. Kaygusuz, Ö. Tuttokmağı ve A. Acar, "Investigation of the effects of distributed-uncertain production and consumption conditions on power system stability," Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, c. 40, s. 2, ss. 1049–1058, doi: 10.17341/gazimmfd.884439, 2025.
- [16] F. Kocer, Elektrik dağıtım şebekesine bağlı güneş ve hidroelektrik santrallerinin güç kalitesi parametreleri yönünden analizi ve karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019.
- [17] Y. Liu ve diğerleri, "Optimal scheduling of a cascade hydropower energy storage system for solar and wind energy accommodation," Energies, c. 17, s. 11, ss. 1–23, 2024.
- [18] M. J. B. Kabeyi ve O. O. Akanni, "Hydroelectric power plants and their sustainability," Advances in Hydro-power Technologies, Springer, 2024.
- [19] M. Onüçyıldız, N. Büyükkaracıoğlu ve M. E. Erkmen, "Küçük hidroelektrik santrallerin enerji potansiyelleri ve çevresel etkileri," Sosyoteknik Sosyal ve Araştırmalar Dergisi, c. 3, s. 6, ss. 37–59, 2013.
- [20] M. Rouholamini ve diğerleri, "A review of modeling, management, and applications of grid-connected Li-Ion battery storage systems," IEEE Transactions on Smart Grid, c. 13, s. 6, ss. 4505–4524, doi: 10.1109/TSG.2022.3188598, 2022.
- [21] S. Uzun, Dağıtık Üretim Tesislerinin Şebeke Entegrasyon Etkileri ve Şebeke Uyumluluğunun Güç Sistem Analizleriyle Uygulamalı Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [22] B. Tabak ve M. A. Yalçın, "Elektrik güç sistemlerinde enerji kalitesi," SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, c. 8, s. 1, ss. 52–54, 2004.
- [23] A. Telli ve diğerleri, "Hydropower's role in enhancing energy justice: preliminary insights from the EU and Turkey," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, c. 1442, s. 1, Makale no. 012009, doi: 10.1088/1755-1315/1442/1/012009, 2025.
- [24] Y. K. Wu, S. M. Chang ve P. Mandal, "Grid-connected wind power plants: a survey on the integration requirements in modern grid codes," IEEE Transactions on Industry Applications, c. 55, s. 6, ss. 5584–5593, doi: 10.1109/TIA.2019.2934081, 2019.
- [25] T. Yeşilyurt ve B. Akbal, "Elektrik tesislerinde gerilim kararlılığının sağlanması için kullanılan yöntemler," European Journal of Science and Technology, ss. 287–292, doi: 10.31590/ejosat.804207, 2020.
- [26] Y. Zhang ve diğerleri, "Long-term stochastic model predictive control and efficiency assessment for hydro-wind-solar renewable energy supply system," Applied Energy, c. 316, Makale no. 119134, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.119134, 2022.