

Araştırma Makalesi

## Rüzgâr ve Güneş Enerji Santrallerinin Şebeke Entegrasyonu için Esnek Alternatif Akım İletim Sistemli Elektrik Güç Sistemi Çözümlerinin Digsilent ile İncelenmesi

 Kumru Bayrak<sup>a,\*</sup>,  Mustafa Dursun<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Düzce/Türkiye.

\*Sorumlu Yazar: [kumru.bayrak@hotmail.com.tr](mailto:kumru.bayrak@hotmail.com.tr)

### Makale Bilgileri:

Geliş: 25/04/2024, Revizyon: 03/09/2024, Kabul: 09/09/2024.

DOI: 10.70081/duted.1473732

### ÖZET

Günümüzde nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler enerji tüketimini artırmıştır. Tüketim oranını korumak için yeterli miktarlarda üretilmeyen, yenilenemeyen veya yeniden kullanılmayan doğal kaynakların miktarı genellikle sabittir ve doğanın yenilenme yeteneğinden çok daha hızlı tükenir. Bu sınırlı kaynaklar dünyadaki ülkelerin ekonomisini, politikasını ve çevresini etkilemektedir. Bu bağlamda yenilenebilir enerji, fosil yakıtlara ve nükleer enerjiye güçlü bir alternatif olup ekonomik, politik ve çevresel sorunları en aza indirme potansiyeline sahiptir. Rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları çevre dostu olmaları ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamaları nedeniyle önemlidir. Son yıllarda değişen talep yükleri ve artan güç sistemi karmaşıklığı gibi faktörler nedeniyle yüksek güçlü enerji santrallerinin kurulumu hız kazanmıştır. Ancak bu yüksek güçlü enerji kaynaklarının dağıtım şebekesine entegre edilmesi bazı zorlukları da beraberinde getiriyor. Bu makalede, esnek bir alternatif akım (AA) iletim sistemine sahip bir dağıtım şebekesindeki rüzgâr ve güneş enerjisi santrallerinin şebeke entegrasyonu Digsilent yazılımı kullanılarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Analiz, Dağıtım Şebekesi, Enerji Santralleri, Yük Akışı.

## Investigation of Electrical Power System Solutions with Flexible Alternating Current Transmission System for Grid Integration of Wind and Solar Power Plants with Digsilent

### ABSTRACT

Today, population growth and technological development are driving up energy consumption. Natural resources that cannot be produced at a level commensurate with the rate of consumption, cannot be regenerated or reused are usually limited and are consumed much faster than nature can renew them. Due to their limited nature, these resources have economic, political and environmental impacts on countries. In this context, renewable energy is a powerful alternative to fossil fuels and nuclear energy and offers great potential to minimize economic, political and environmental problems. Renewable energy sources such as wind and solar are essential due to their environmental benefits and their contribution to sustainable energy production. In recent years, power systems have become increasingly complex due to the constant fluctuations in demand, accelerating the construction of large-capacity power plants. However, the integration of these high-capacity energy sources into distribution networks presents several challenges. This paper will provide an evaluation of the integration of wind and solar

power plants into electrical distribution networks, using flexible alternating current (AC) transmission systems (FACTS) within the Digsilent software.

**Keywords:** *Analysis, Distribution Grid, Energy Plants, FACTS Devices, Load Flow.*

## I. GİRİŞ

Teknolojinin ve insan popülasyonunun hızlı artışıyla enerjiye, özellikle de elektrik enerjisine olan ihtiyaç sürekli olarak artmaktadır. Fosil yakıtların enerji üretiminde kullanılması ve bu yakıtların azalması sebebiyle yeni enerji kaynakları arayışına başlanmıştır. Sürdürülebilir olmayan yakıtların yeniden kullanım fırsatının bulunmaması ve tüketim talebini karşılayamaması, yeni enerji kaynaklarına yönelimi artırmıştır. Bu arayış, doğaya zarar vermeyen, üretim kirliliği ve sera gazı emisyonlarına neden olmayan, gelecekte önemli rol oynayacak yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir.

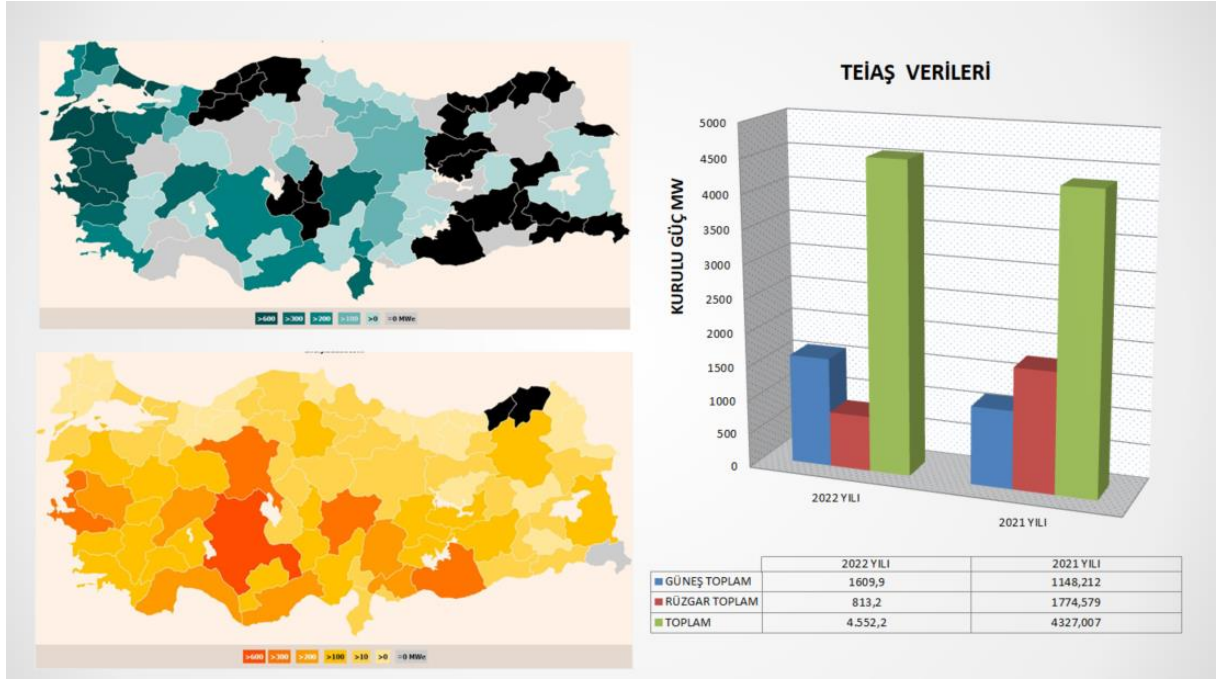
Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş ve rüzgâr enerjisi öne çıkmaktadır. Türkiye’de bulunan güneş enerji santrallerinin toplam kurulu gücü 8.335 MW’dır. 2021 yılında bu santraller aracılığıyla 13.294.280.970 kWh elektrik üretilmiştir (<https://www.enerjiatlası.com/gunes/>). Sürdürülebilirlik ve karbon azaltımı açısından çevre dostu olmaları, istenilen alanlarda kurulabilmeleri ve özellikle çatılara yerleştirilebilmeleri nedeniyle gelecekte en önemli enerji kaynakları arasında yer almaktadır. Anlı yük veya rüzgar profili için bugüne kadar gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları, gün geçtikçe gelişen ve büyüyen elektrik şebekeleri için gelecekte gerekli olan performansı karşılamayacaktır. Bundan dolayı, bu etkilerin incelenmesi için gerekli olan optimizasyon yöntemlerinin saptanması güncel bir araştırma konusudur (Ersavaş, 2013).

İlk zamanlarda küçük güçlerde imal edilen rüzgâr santralleri, müstakil yapıların enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılıyordu. Ancak artan nüfus ve güç sistemlerinin karmaşık hale gelmesi, talep edilen yükün sürekli değişmesi gibi nedenlerle, büyük kapasiteli rüzgâr enerji santrallerinin üretimi büyük önem kazanmıştır (Döşoğlu, 2010). Dünyada rüzgâr enerjisi ile elektrik üretimi yapan 100’den fazla ülke bulunmaktadır. Rüzgâr enerjisi kurulu gücü açısından en yüksek kapasiteli ülkeler arasında Çin, Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya uzun zamandır ilk üç sırada yer almaktadır. Türkiye ise rüzgâr enerji santrali kurulu gücü bakımından Avrupa’da 7. ve dünyada 13. sırada bulunmaktadır.

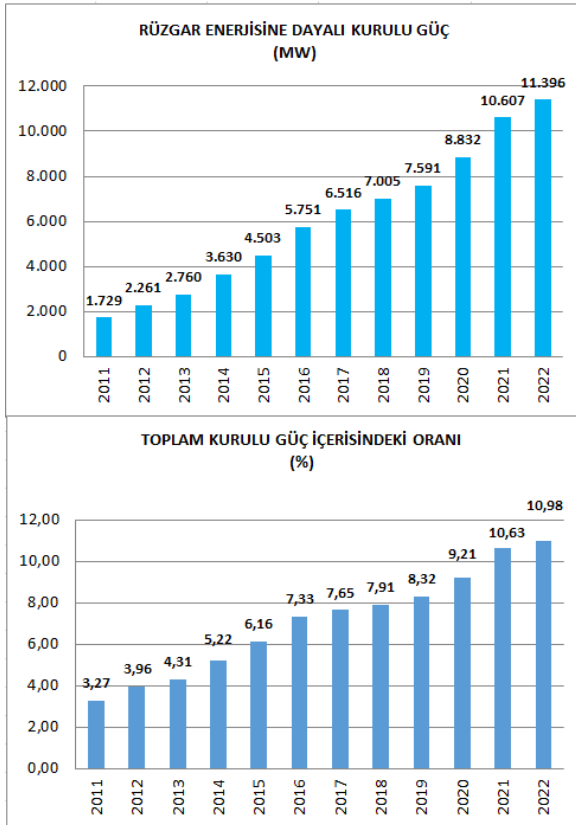
Haziran 2022 sonu itibarıyla, rüzgâr enerji santrallerindeki üretimin kurulu güç ve toplam güç arasındaki oran incelendiğinde, rüzgâr enerjisine dayalı elektrik üretiminin kurulu gücünün 10.976 MW olduğu ve bu gücün toplam kurulu güce oranının %10,81 olduğu belirlenmiştir (Türkiye Elektrik Üretim ve İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ)2022/2021 İstatistikleri).

Dünyanın hemen hemen tüm ülkelerinde güneş enerjisi ile az ya da çok elektrik üretimi yapılmaktadır. Şebeke bağlantılı sistemlerin ülkelere dağılımına bakıldığında, Çin 78 GW’yi aşan kurulu gücü ile lider konumdadır. Türkiye, güneş enerji santrali kurulu gücü bakımından 14. sıradadır (Enerji Atlası, 2024. <https://www.enerjiatlası.com/ruzgar/>).

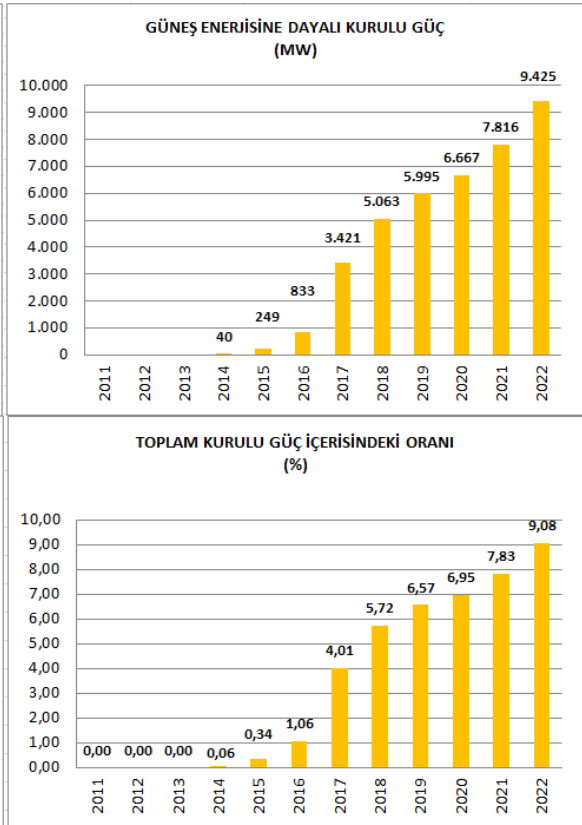
Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası’na (GEPA) göre, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2.7 saat olup, ortalama yıllık toplam ışınım değeri 1.527,46 kWh/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Haziran 2022 itibarıyla güneş enerjisi kurulu gücümüz 8.479 MW olup, toplam kurulu güce oranı %8,35’tir. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Atlası (REPA-V1) tarafından 2006 yılında yapılan araştırma sonucunda, kilometrekare başına 5 MW gücünde rüzgâr santralinin tesis edilebileceği kabul edilmiştir. Bu araştırma doğrultusunda, Türkiye’de 47.849,44 MW kapasitede rüzgâr enerji santralleri kurulabileceği öngörülmüştür.



Şekil 1. Türkiye'de Rüzgar ve Güneş Enerji Tesislerinin Bölgelere göre dağılımı ve 2 yıllık değişimi



Şekil 2. Yıllara Göre RES Kurulu Güç Değişikliği



Şekil 3. Yıllara Göre GES Kurulu Güç Değişikliği

Şekil 1, Şekil 2, Şekil 3'te belirtilen verilerde TEİAŞ raporuna göre, rüzgâr ve güneş enerji santrallerinin sayısında ve buna bağlı olarak elektrik üretiminde bir artış olduğu görülmektedir. Ancak, güneş ve rüzgâr santrallerinin kullanımının artması, güç sistemlerinde bazı problemleri de beraberinde getirmiştir. Elektrik enerjisinin tüketicilere daha kaliteli, kesintisiz ve düşük maliyetle sunulması önem

arz etmektedir. Elektrik enerjisinin üretiminden son tüketiciye kadar ulaşırken, sabit şebeke frekansında, sinüzoidal biçimli dalga şeklinde ve belirgin bir gerilim seviyesinde olması istenmektedir. Ancak, bu ideal koşullar gerçekte tam olarak sağlanamamaktadır (Tabak ve Yalçın, 2004).

Enerji kalitesi kavramı, dağıtım sisteminden çekilen akımdaki dalga şekli bozukluklarını ve dağıtım sisteminin frekansı ile geriliminde oluşabilecek değişimleri incelemek için kullanılmaktadır (Özdemir, 2007). Enerji kalitesinin bilinen temel sorunlarından biri, gerilim/akım dalga şeklindeki sapmalardır. Bu sapmalar, ideal sinüs düzleminden uzaklaşmayı ifade eder (Tekin ve ark., 2016).

Güç kalitesi, enerji sistemlerinden çekilen akım ve gerilim dalga şeklindeki sinüzoidal özelliklerin korunmasını ifade eder. Dağıtım sistemlerinde frekans değeri 50 Hz olarak kabul edilmektedir ve bu frekans değeri, güç kalitesinin bir parçası olarak kabul edilmelidir (Gencer, 2018). Dağıtım sisteminde talep edilen güç ile sistemden tüketiciler tarafından çekilen güç arasında bir eşitsizlik olduğunda, dağıtım sistemlerinde arızalar, kesintiler, üretim yoğunluğunun artması ve ani akım değişiklikleri nedeniyle gerilim dengesizlikleri meydana gelebilir (Yeşilbudak ve ark., 2016).

Güç kalitesi, belirli standartlara uygun olarak besleme gerilimini korumayı amaçlar. Ancak, ideal durumda sağlanan gerilimin her zaman sabit bir büyüklükte ve frekansta mükemmel bir sinüs dalgası olması ve sonraki akımın bu gerilimi takip etmesi nadiren mümkündür. Bu tür bozukluklar güç kalitesini düşürebilir. Güç kalitesi problemlerinin bazı yaygın türleri kısaca ele alınmıştır (Bayraktar, 2021):

- **Gerilim Geçişleri:** Kısa süreli ve yüksek gerilim dalgalanmalarıdır. Transformatörler ve motorlar gibi cihazlar için zararlı olabilir (Edvard, 2014).
- **Gerilim Düşmeleri ve Yükselmeleri:** Ani gerilim düşüşleri ve artışlarıdır. Bu durumlar sistem arızaları veya ağır yük değişiklikleri ile ilişkilendirilebilir ve elektronik ekipmanı etkileyebilir (Edvard, 2014).
- **Düşük ve Aşırı Gerilimler:** Uzun süreli düşük veya yüksek gerilimlerdir. Aşırı yüklenmiş devreler veya şebeke beslemesi bu sorunlara yol açabilir ve ciddi hasarlara neden olabilir (Edvard, 2014).
- **Kesintiler:** Birkaç milisaniyeden birkaç saate kadar sürebilen tam güç kaybıdır. Hava koşulları veya ekipman arızaları gibi nedenlerden kaynaklanabilir ve işletmeleri önemli ölçüde etkileyebilir (Edvard, 2014).

Asenkron makinalar yapılarının basit, kontrollerinin kolay ve maliyetlerinin düşük olması sebebiyle rüzgar türbinlerinde sıklıkla tercih edilmektedir (Wu ve ark., 2007). Asenkron motor kullanımı ile birlikte, güç sistemlerinde aktif güç, reaktif güç, empedans ve gerilim kontrolünün sağlanabilmesi için güç elektroniği tabanlı Esnek AA İletim Sistemleri (FACTS) kullanımında hız kazandırılmıştır.

Rüzgâr enerji santrallerinden (RES) elde edilen güçlerdeki belirsizlikler ve kullanılan asenkron makinaların kararsız çalışma durumlarını düzenlemek ve kontrol etmek için FACT cihazları kullanılmaktadır (Kumar ve Gokulakrishnan, 2011). Bu cihazlar hakkında, gerilim profilinin düzenlenmesi ve reaktif güç kompanzasyonu gibi konularda pek çok çalışma yapılmıştır (Kehrli ve Ross, 2003; Qiao ve ark., 2008).

FACTS cihazlarının iki ana amacı vardır:

- İletim sistemlerinin güç transfer kapasitesini artırmak
- Tanımlanan iletim rotaları üzerinde güç akışının kontrolünü sağlamak

Güç sistemlerinin karmaşık doğası, sürekli değişen talepler ve çeşitli dış etkenler nedeniyle kararlılık problemi büyük önem taşır. Kararlılık, rotor açısı, frekans ve gerilim olmak üzere üç ana kategoride incelenir. Gerilim kararlılığı, güç sistemlerindeki herhangi bir bozucu etkiye maruz kalındığında, tüm baraların kabul edilebilir bir gerilim seviyesinde kalabilmesi olarak tanımlanır. Kararlılığı etkileyen faktörler arasında transformatör kademe değişimi, jeneratör arızaları, aşırı yüklenme ve hat kopmaları gibi çeşitli durumlar yer alır. Ayrıca, gerilim kararlılığı uzun ve kısa dönem olarak da sınıflandırılmıştır. Bu sınıflama, çözüm stratejilerinin belirlenmesini kolaylaştırır ve güç sistemlerinin karmaşık yapısını anlamak için önemli bir araçtır (Uzun, 2022).

Amacımız, sistem üzerindeki güç akışının gerçek zamanlı ve uygun kontrolü yoluyla sistem kararlılığını korumaktır. İkinci amaç ise belirlenen hat üzerinde akım kontrolü yaparak güç akışını

istenilen iletim koridorlarına yönlendirmektir. Birincil güç akışı, sistem arızaları durumunda sistemden talep edilen tüm gücü iletmek için hızlı bir şekilde kullanılabilir; bu amaçla ikinci bir güzergâh tespit edilerek değiştirilebilir. Bu amaçların verimli şekilde gerçekleştirilmesi, iletim sistemlerinin kullanımını artıracak, mevcut hatlarda yıpranmayı minimuma indirecek ve yeni iletim hatları için gereksinimleri azaltarak özelleştirmeyi kolaylaştıracaktır (Vural, 2001). Güç elektroniği teknolojisindeki gelişmeler, FACTS cihazlarının ilgi odağı olmasına zemin hazırlamıştır. Bu cihazlar, gerilim regülasyonu, iletim kapasitesi ve güç akış kontrolü artırımı gibi kontrol sorunlarının çözülmesi amacıyla kullanılmaktadır. Güç sistemlerinde meydana gelen dalgalanmaların sönümlenmesi ve sistemlerin kararlılığını artırmada FACTS cihazlarının kullanımı incelenmiştir (Abido, 2008).

FACTS cihazlarının konfigürasyonu şönt ve seri olarak kategorize edilebilir. Güç akışı kontrolü geleneksel olarak jeneratör çıkışlarına ve gerilim düzenlemesine dayanır. Geleneksel ağ çalışmalarında, faz kaydırma ve tap değiştirme transformatörleri, reaktif güç kompanzasyonu yaparak gerilim büyüklüğünü ve faz açılarını değiştirerek güç akışını düzenler. Seri reaktörler ve kapasitörler, iletim hatlarının elektriksel parametrelerini değiştirerek güç akışını değiştirebilir. Ayrıca, güç aktarımını aşırı yüklemeye maksimum yüklenme koşullarında seri kapasitif kompanzasyon kullanımı avantajlıdır (Acha ve ark., 2004). Operasyonel açıdan, SVC (Static Var Compensator), gerilim büyüklüğünü düzenlemek için reaktif gücü ayarlayan bir şönt bağlı değişken reaktans olarak hareket eder. AA ağlarında, SVC geniş ölçüde hızlı reaktif güç desteği ve gerilim düzenlemesi için kullanılır (Becerik Mir, 2022).

Elektrik enerjisi iletimi ve son kullanıcıların karşılaştığı en büyük problem olan harmonikler, şebeke güç kalitesinin bozulmasına neden olurlar. Çeşitli FACTS cihazları ve kontrolörler, güç kalitesi sorunlarının iyileştirilmesinde ve azaltılmasında önemli bir rol oynamıştır (Darabian ve Jalilvand, 2017). Son yıllarda, verimli enerji kullanımı, arz-talep kontrolü, gerilim salınım dengeleme, güç kalitesi iyileştirme, güç faktörü düzeltilmesi ve harmonik bozulma azaltma konularında FACTS teknolojisi kontrolörlerinin kullanımı artmıştır (Barrios-Martínez ve Ángeles-Camacho, 2017).

Bu çalışmada, TEİAŞ'tan çıkan gerçek bir fider kullanılarak bu ve bu fiderin beslediği ilgili dağıtım şebekesi üzerinde birden fazla tüketim ve üretim tesisinin (güneş enerji santralleri ve rüzgâr enerji santralleri) dağıtım şebekesine entegrasyonu ve anlık olarak gerilim/akım dalga şeklinin bozulmasına neden olan anlık yüklerin DIGSILENT POWER FACTORY kullanılarak FACTS cihazları ile yük akış analizlerinin takip edilmesi amaçlanmıştır. Gerçek zamanlı ve gerçek verilerle şebeke DIGSILENT POWER FACTORY'de modellenen ve sistemin anlık yük durumlarında kararlılığı incelenecektir.

## II. MATERYAL METOT

Yapılacak çalışmada, sistemde aşırı yük ve zaman dilimlerinde sürekli değişen yük miktarlarının güç kalitesini etkileyebileceği göz önüne alınacaktır. Sisteme giren yüklerin ve üretim tesislerinin enerji kalitesinde değişiklikler yaratacağı, dağıtım sisteminden çekilen aşırı akımın gerilim değişimlerine ve şebeke frekansının dalga şeklindeki bozulmalara neden olacağı öngörülmektedir. Bu tür değişikliklerin en kısa sürede kararlı hale getirilmesi, dağıtım tesisinin ekonomik ömrünü uzatmakta ve tüketicilere kesintisiz ve kaliteli enerji sunulmasını sağlamaktadır. Sistemin eski haline hızlı bir şekilde dönmesi sağlanmalıdır; yani sistem kararlılığı kısa sürede gerçekleşmelidir. Gerilim kararlılığını sağlamak, güç sistemlerini güvenli ve istikrarlı sınırlar içinde çalıştırmak ve elektrik enerjisi arzını kaliteli, kesintisiz ve yeterli bir şekilde sağlamak için güç sistemlerinin planlama ve işletme aşamalarında yüklenebilirlik, arz-talep dengesi, güç akışı ve kararlılık gibi faktörler dikkatlice incelenmeli ve analizler doğru bir şekilde yapılmalıdır. Gerekli önlemler alınmalıdır (İşin, 2022).

FACTS cihazları, iletim hatlarının reaktif güç kompanzasyonunu reaktör veya kapasitör gruplarına ihtiyaç duymadan, anahtarlamalı konvertör devreleri kullanarak reaktif güç üretebilir ve tüketebilirler. Modern kompanzasyon yöntemleri sayesinde FACTS cihazlarının, kısa sürede tepki verip, her fazın ayrı ayrı kontrol edilebilmesi, dengesiz yükleri kompanzasyonunda bu cihazların kullanımını oldukça önemli kılmaktadır (Carlak ve Kayar, 2019). Literatürde yapılan benzetim çalışmaları, sistemde farklı zamanlarda değişken yüklerin girmesiyle FACTS cihazlarının yük barasındaki reaktif güç, gerilim ve aktif güç değerlerini minimum sürede kararlı hale getirdiğini göstermektedir. Reaktif ve aktif yük değerlerinin

artış ve azalışının yol açtığı salınımlar, FACTS cihazlarının kullanımı ile ortadan kaldırılmıştır. Bu durum, sistemin daha güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamıştır (Döşoğlu, 2010).

Sistem tasarımında SVC (Static Var Compensator) kontrolörleri kullanılacaktır. Bu kontrolörler, gerilim gibi güç sistemi parametrelerini kontrol etmek için güç sisteminin kararlılık durumuna göre reaktif güç üreten veya tüketen FACTS cihazları ailesinin bir parçasıdır. Temel amacı, sisteme hızlı, etkili, hassas ve kontrol edilebilir sürekli reaktif güç üretmek veya tüketmektir. SVC kontrolörleri yüksek tepki süresine sahip, geniş bir aralıkta çalışan, güvenli ve operasyonel esnekliği olan cihazlardır (Gyugyi, 2000). İletim sistemi sınırlamaları şu karakteristikleri içerebilir: sürekli durum güç transfer limiti, gerilim kararlılık limiti, dinamik kararlılık, işletme gerilim limiti, geçici kararlılık limiti, güç sistemi dalgalanma sönümlenme limiti, termal limit ve kısa devre akım limiti. Her bir iletim engeli ve bölgesel kısıtlama, bir veya daha fazla sistem seviyesinde probleme yol açabilir (Acha ve ark., 2004). Güç sisteminin karakteristikleri, yük büyüdükçe ve üretim arttıkça zamanla değişir. Enerji iletim şebekesi sistem iyileştirmeleri yeterli şekilde geliştirilip işletilmezse, güç sistemi sürekli durum ve geçici durum problemlerine karşı kararlılık sınırları daralır (Habur ve O'Leary, 2004).

SVC kontrolörleri, büyük endüstriyel tesislerde reaktif güce olan talep yüksek olduğunda, dinamik güç faktörü düzeltilmesi için kullanılır. SVC kontrolörleri, tesisin güç faktörünü artırır, tesis girişindeki gerilim dalgalanmalarını en aza indirir ve işletme maliyetlerini azaltır. Gerilim kontrolü ve sistem stabilitesinin artırılması için SVC kontrolörleri güç sistemlerinde kullanılmaktadır.

Modelleme çalışması, Digsilent yazılımı kullanılarak yapılacaktır. Bu yazılım, tek bir program ile pilot TM üzerinde bulunan tüm dağıtım şebekesinin fonksiyonlarının gerçek zamanlı simülasyonunu yürütmeyi mümkün kılacaktır. DigSilent programı, iletim, dağıtım ve endüstriyel elektrik sistemlerinin analizi için kullanılan ve elektrik güç sistemi planlamasında ve işletilmesinde optimizasyon hedeflerine ulaşmak için geliştirilmiş entegre bir mühendislik aracıdır (Samancıoğlu, 2014).

Bu program ile:

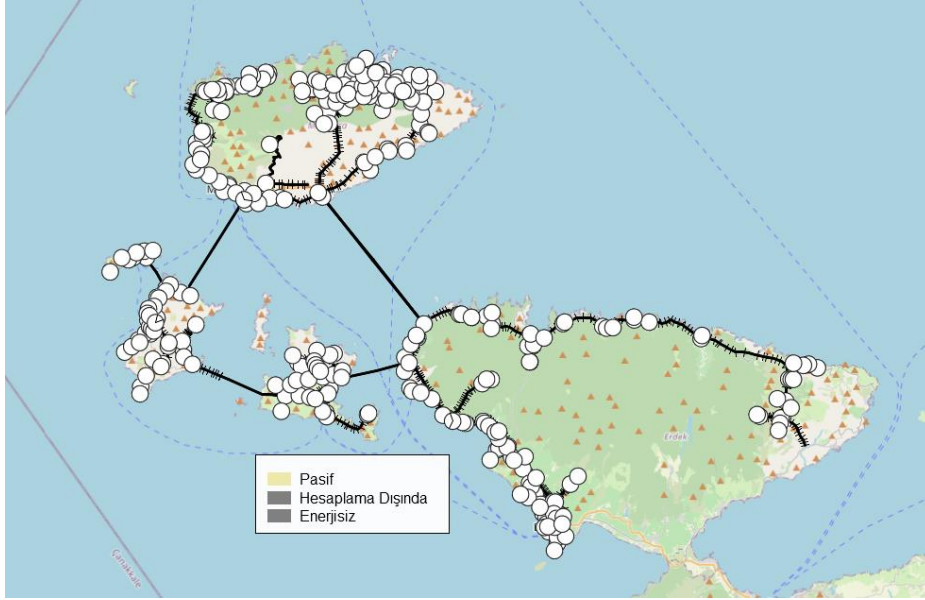
1. Güç Akış Analizi
2. Üretim Yeterliliği Analizi
3. Optimal Güç Akış Analizi
4. Model Parametre Tanımlama
5. Güç Sistemlerinin Dinamik Simülasyonu
6. Harmonik Analizi
7. Dağıtım Şebekesi Analizi
8. Rüzgâr ve Güneş Santrallerinin Modellenmesi
9. Sistem Kararlılık Analizi (FACTS Cihazları ile)

Belirtilen hususlar üç farklı durum için kontrol edilecek ve grafikler oluşturularak analizler yapılacaktır. Sistemin modellenmesi tamamen kullanıcının tercihine kalmakla birlikte, model içinde kullanılan veriler tamamen sahadan alınan değerlerdir. Gerilim kararlılığı, FACTS cihazlarının maliyeti ve güç kayıpları matematiksel olarak modellenmiştir (Singh ve ark., 2010). Literatürde yapılan modellemeler örnek alınarak, modelleme sürecinde tercih edilen güneş santrali ve rüzgar santrali değerleri belirlenen periyot aralığında enerji analizöründen alınacak ve sistemde aktif olan yükler OSOS ile maksimum yükün olduğu zaman diliminde incelenecektir.

Coğrafi bilgi sisteminden alınan veriler DigSilent'a işlenmiş olup, üretim tesislerinin maksimum üretim periyotları, anlık yüklerin devreye giriş çıkış süreleri ve anlık güç durumları OSOS üzerinden alınarak TM bara gerilimleri, fider gerilim profilleri ve en yüklü fidere bağlanacak FACTS cihazı ile gerilim değerlerindeki değişiklikler tespit edilecektir.

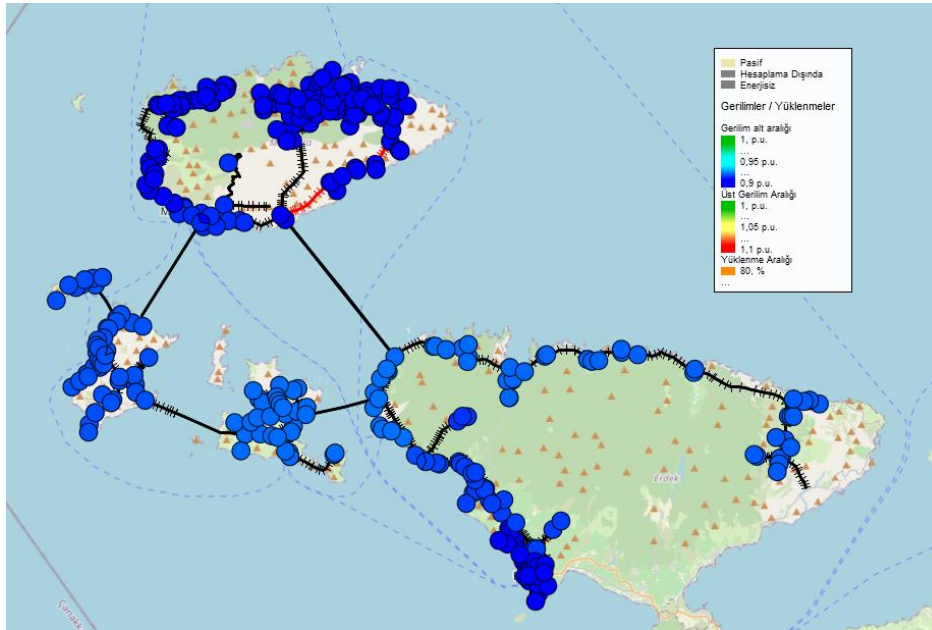
#### A. Digsilent Power Factory İle Mevcut Şebekenin Modellemesi

Program üzerinde veriler, çizim ve istenilen bilgiler kullanıcı tarafından girilerek düzenlenir. Bu programda, pilot TM üzerinde üretim santralleri ve tüketim noktaları coğrafi bilgi sistemi üzerinden alınarak şebeke modellemesi yapılmıştır. Modelleme sürecinde kullanılan yükler ve değerler, gerçek veriler olup, bu veriler OSOS aracılığıyla sistemden çekilmiştir.



Şekil 4. Coğrafi Bilgi Sisteminden Alınan Pilot TM Şebeke Modellemesi

Şekil 4'te belirtilen sistemin çalıştığı durumu Şekil 4.1'de görebilirsiniz. Bu şekil, yük akış analizinin başlatıldığı sistemin görüntüsünü göstermektedir. Gerilimler ve yüklenmeler, alt aralık, üst aralık ve yüklenme aralığı dikkate alınarak renk kodlaması ile belirtilmiştir.



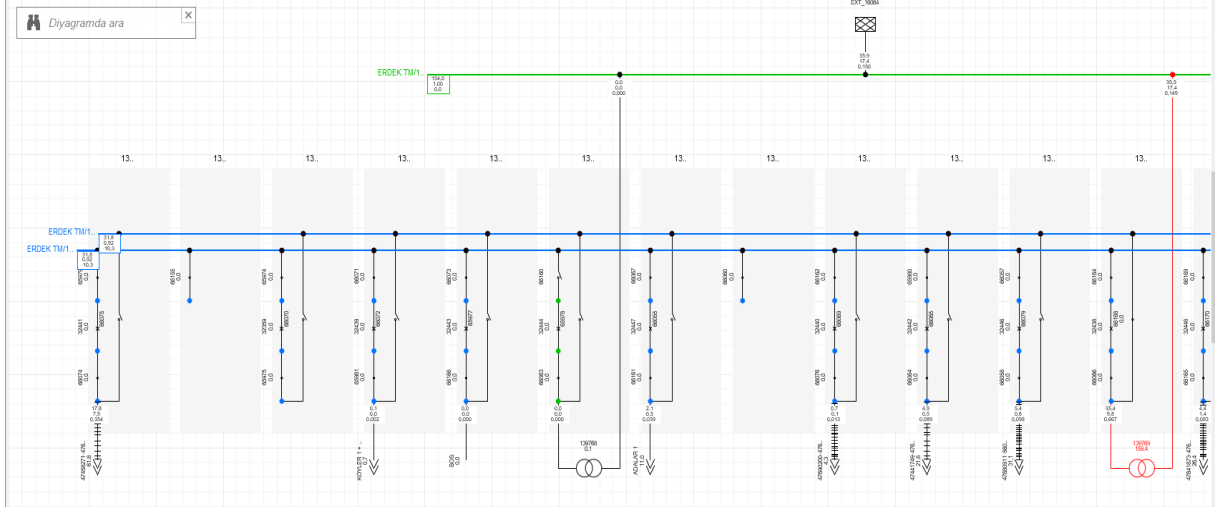
Şekil 4.1 Pilot TM'nin Yük Akış Analizinin Çalıştırılmış Hali

Şebeke yönetimde karşılaşılan temel zorlukların başında güç sistemlerindeki yük belirsizlikleri gelmektedir. Bu nedenle, yük akış analizlerine yük modellerinin dâhil edilmesi çok büyük önem arz etmektedir (Haghifam ve Malik, 2007). Yapılan analizler, çıkış fiderlerinin tamamında 0,9 p.u. gerilim



düşüşü yaşandığını göstermektedir. Adalara giden fider çıkışlarında, maden ocaklarının yoğunluğu gerilim düşüşlerinin ana nedeni olarak belirlenmiştir. Hesaplamalar, kış ayları dikkate alınarak üretimin ve tüketimin minimum olduğu zaman dilimlerine göre yapılmıştır.

Şekil 4.2'de, pilot TM'ye ait yük akış analizinin çalıştırılmasıyla fider çıkışlarındaki bara gerilimleri ve gerilim düşüşlerinin p.u. değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Pilot TM içerisindeki Fiderlerin Gerilim Değerleri

Güç sistemlerinin analizi, program sayesinde yük akışı hesapları yapılarak kararlı sistem koşulları altında incelenmektedir. Dağıtım şebekesinin mevcut işletme durumu ve planlama durumu için analizler gerçekleştirilir. Yük akış analizi çalıştırıldığında, reaktif ve aktif güç değerleri, hatların ve trafoların yüklenme durumu, akım değerleri ve mevcut sistemin gerilim değerleri görüntülenir. Şekil 4.2'de ise tüm baralar ve çıkışların değerleri, sistemin çalışır durumda olduğu haliyle gösterilmiştir.

Gerilimin 1 p.u. nominal değerinde olması istenmektedir. Ancak, çoğu zaman gerilim değeri nominal değerde tutulamaz. Bu nedenle, fider çıkışlarındaki 154 kV ve 34,5 kV baralardaki gerilim değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler, sistem limitleri dâhilindedir.

Tablo 1. Pilot TM'deki baraların gerilim değerleri

| Ad                           | umin<br>p.u. | umax<br>p.u. | Maksimum Gerilim<br>kV | Maksimum Gerilim (Faz-Faz)<br>kV | Minimum Gerilim<br>kV | Minimum Gerilim (Faz-Faz)<br>kV |
|------------------------------|--------------|--------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| ERDEK TM                     | 0,769        | 1,000        | 88,9                   | 154,0                            | 0,2                   | 0,3                             |
| ERDEK TM_ADALAR 1            | 0,905        | 0,922        | 0,2                    | 0,4                              | 0,2                   | 0,4                             |
| ERDEK TM_ADALAR 2            | 0,863        | 0,921        | 18,3                   | 31,8                             | 0,2                   | 0,3                             |
| ERDEK TM_ADALAR 3            | 0,769        | 0,913        | 18,2                   | 31,5                             | 0,2                   | 0,3                             |
| ERDEK TM_BOS                 | 0,000        | -1,000       | 0,0                    | 0,0                              | 0,0                   | 0,0                             |
| ERDEK TM_ERDEK 1             | 0,875        | 0,914        | 18,2                   | 31,5                             | 0,2                   | 0,3                             |
| ERDEK TM_ERDEK 2             | 0,899        | 0,915        | 18,2                   | 31,6                             | 0,2                   | 0,4                             |
| ERDEK TM_KOYLER 1 + ILHANLAR | 0,914        | 0,922        | 18,4                   | 31,8                             | 0,2                   | 0,4                             |
| ERDEK TM_KOYLER 2            | 0,906        | 0,921        | 18,4                   | 31,8                             | 0,2                   | 0,4                             |



Tablo 2. Pilot TM baraların maksimum yüklenme durumları

| Ad                           | Maks. Yüklenme % | umax p.u. |
|------------------------------|------------------|-----------|
| ERDEK TM                     | 159,4            | 1,000     |
| ERDEK TM_ADALAR 1            | 30,0             | 0,922     |
| ERDEK TM_ADALAR 2            | 89,8             | 0,921     |
| ERDEK TM_ADALAR 3            | 101,2            | 0,913     |
| ERDEK TM_BOS                 | 0,0              | -1,000    |
| ERDEK TM_ERDEK 1             | 54,2             | 0,914     |
| ERDEK TM_ERDEK 2             | 30,1             | 0,915     |
| ERDEK TM_KOYLER 1 + ILHANLAR | 29,6             | 0,922     |
| ERDEK TM_KOYLER 2            | 30,0             | 0,921     |

Yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme olan etkisini incelemek amacıyla mevcut sistemde bağlı olan yaklaşık 9 adet RES santrali bulunmaktadır. Bu santrallerin statik jeneratörleri ve bunlara bağlı yükler Tablo 3 ve Tablo 4'te belirtilmiştir.

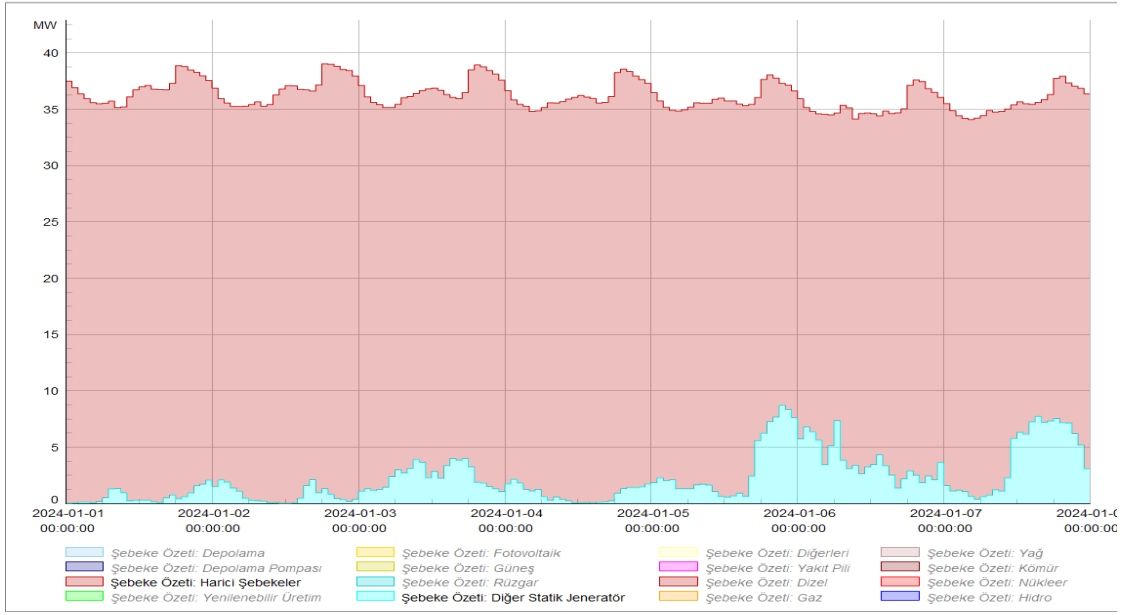
Tablo 3. RES'lere ait statik generatör güçleri

| Ad    | Klas... | Şebeke   | Enerji (Aktif Güç) MWh | Aktif Güç, Maks. MW |
|-------|---------|----------|------------------------|---------------------|
| 1.res | TR- ... | ERDEK TM | 23,0                   | 0,8                 |
| 2.res | TR- ... | ERDEK TM | 31,4                   | 0,8                 |
| 3.res | TR- ... | ERDEK TM | 90,6                   | 2,0                 |
| 4.res | AD...   | ERDEK TM | 90,6                   | 2,0                 |
| 5.res | TR- ... | ERDEK TM | 17,7                   | 0,7                 |
| 6.res | TR- ... | ERDEK TM | 30,3                   | 0,8                 |
| 7.res | RK ...  | ERDEK TM | 29,7                   | 0,8                 |
| 8.res | TR- ... | ERDEK TM | 27,2                   | 0,8                 |
| 9.res | TR- ... | ERDEK TM | 28,2                   | 0,8                 |

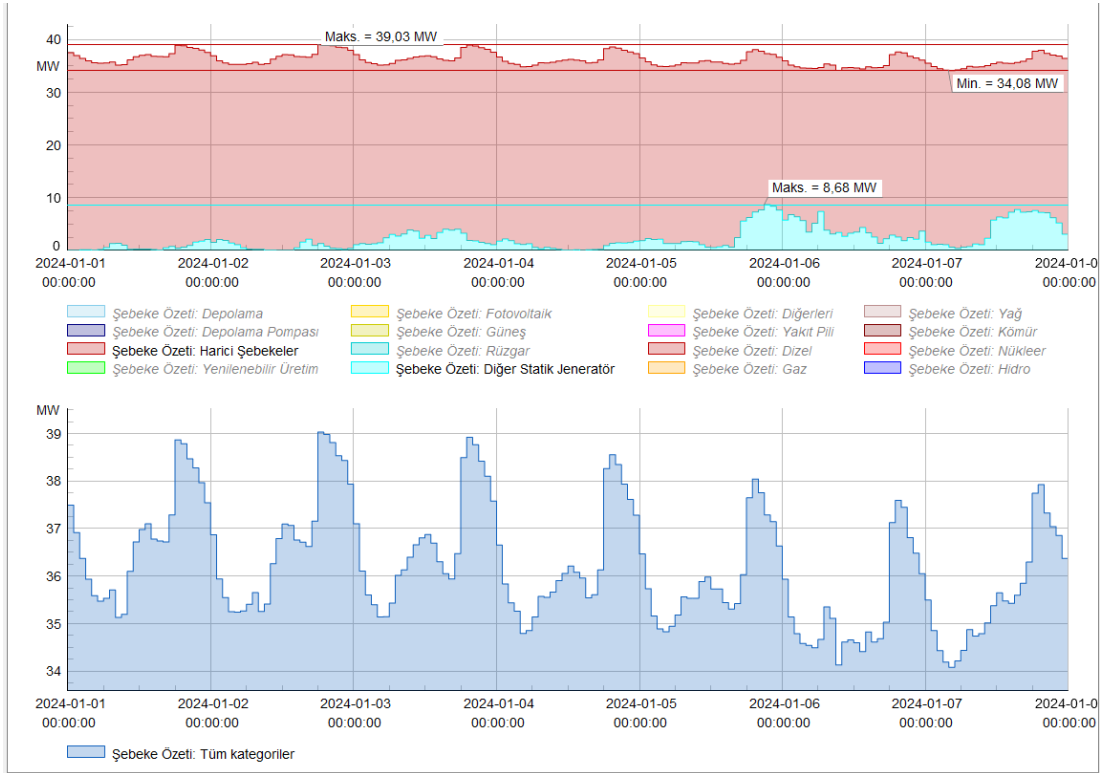
Tablo 4. Pilot TM baralara bağlı yük durumları

| Ad            | Klas... | Şebeke   | Terminal Bara | u, Büyükl... p.u. | Aktif Güç MW | Reaktif Güç Mvar | Görünür G... MVA | Güç Faktörü |
|---------------|---------|----------|---------------|-------------------|--------------|------------------|------------------|-------------|
| 54302782_Load | TR- ... | ERDEK TM | 54302782_LV   | 0,875             | 0,8          | 0,3              | 0,9              | 0,928       |
| 55200116_Load | TR- ... | ERDEK TM | 55200116_LV   | 0,875             | 0,6          | 0,2              | 0,7              | 0,928       |
| 55200273_Load | AD...   | ERDEK TM | 55200273_LV   | 0,875             | 0,6          | 0,2              | 0,7              | 0,928       |
| 55222013_Load | TR- ... | ERDEK TM | 55222013_LV   | 0,912             | 0,0          | 0,0              | 0,0              | 0,928       |
| 57379876_Load | MA...   | ERDEK TM | 57379876_LV   | 0,901             | 0,0          | 0,0              | 0,0              | 0,928       |
| 57380163_Load | MA...   | ERDEK TM | 57380163_LV   | 0,899             | 1,3          | 0,5              | 1,4              | 0,928       |
| 57380300_Load | MA...   | ERDEK TM | 57380300_LV   | 0,899             | 1,3          | 0,5              | 1,4              | 0,928       |

Modellemede mevcut sistemde toplamda 9 adet RES bulunmaktadır. Bu RES'lerin toplam gücü 9,5 MW'dır; bunlardan 7 tanesine yük bağlı olup, 2 tanesinde yük bulunmamaktadır. Sisteme sonradan dâhil edilecek 4 adet lisanssız GES için senaryo oluşturulmuş ve bu GES'lerin toplam gücü 2,9 MW olarak belirlenmiştir. Bu GES'lere yük bağlanmamış ve sadece enerji sağlayacak şekilde modellemeye dâhil edilmiştir. Modelleme sonrasında yarı dinamik simülasyon zaman bağımlı olarak çalıştırılmış ve ekil 5'teki grafik elde edilmiştir.

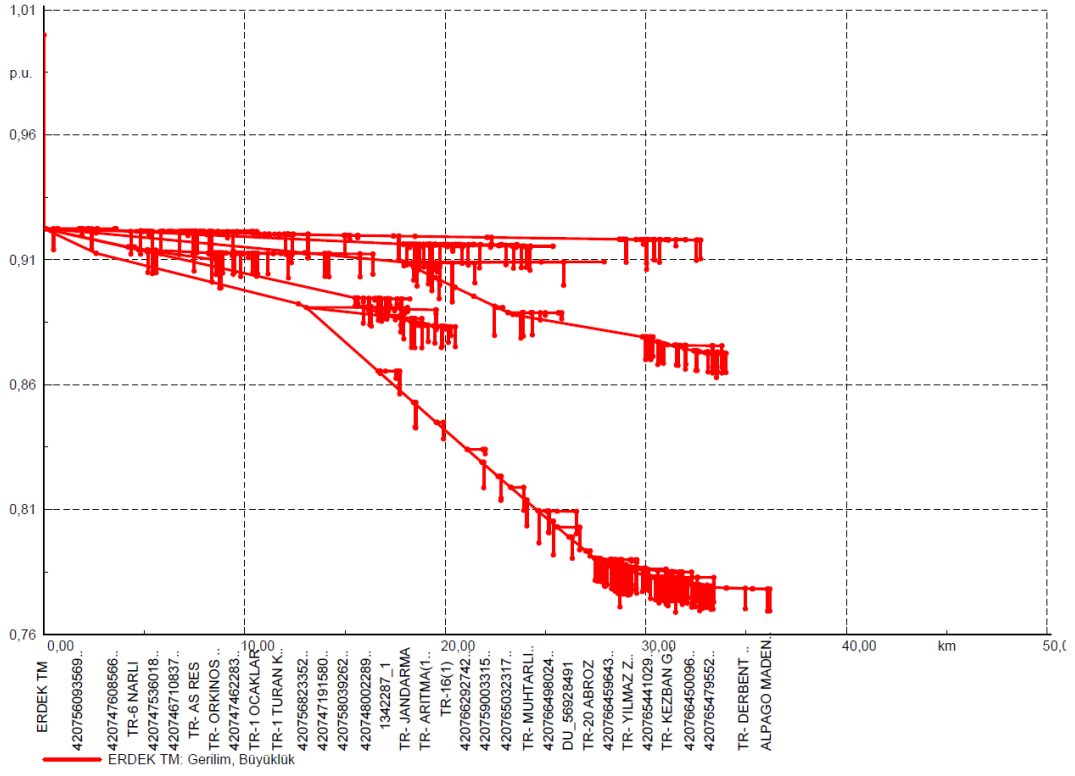


Şekil 5. Zamana bağlı çalıştırılan Yarı Dinamik Simülasyon Santral Kategorisi Grafiği

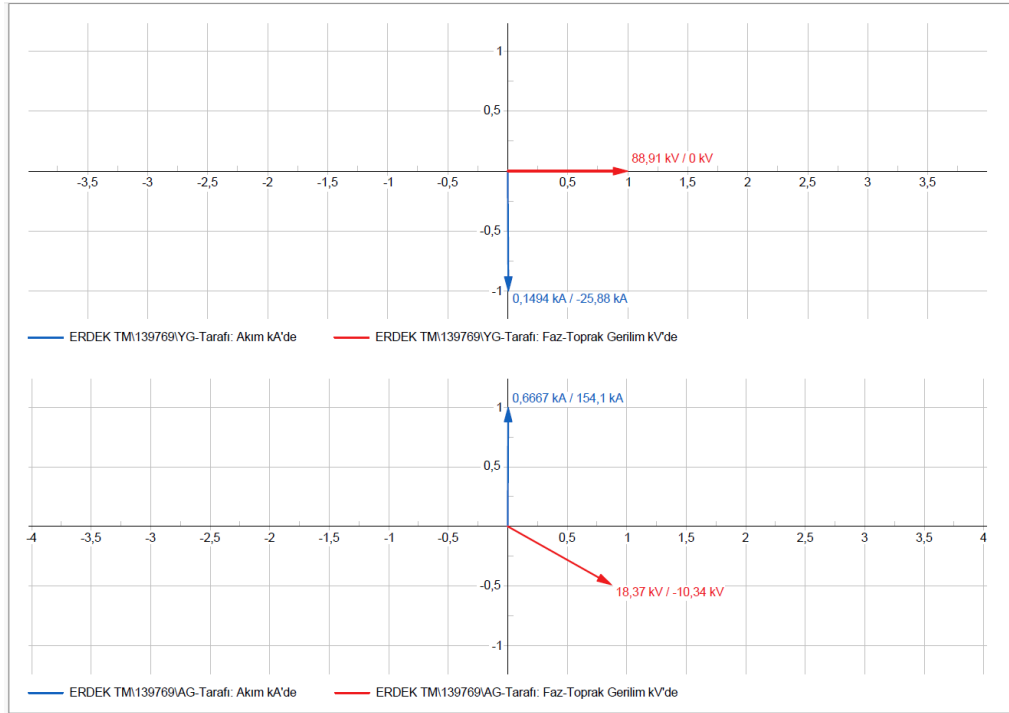


Şekil 6. Şebeke Özeti

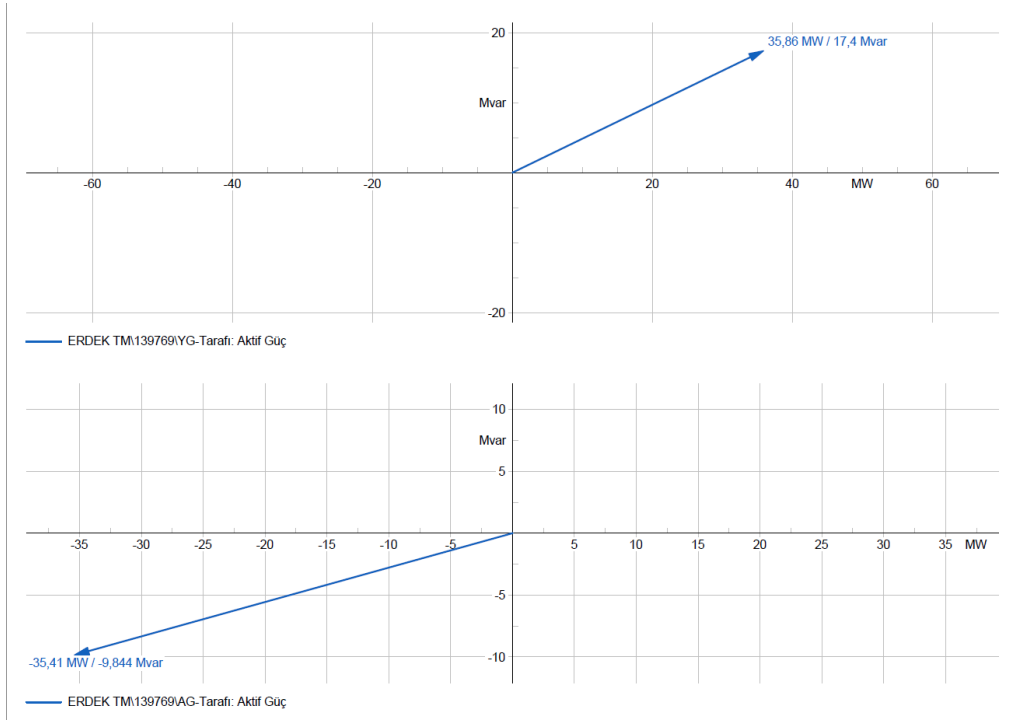
Sisteme FACTS cihazı bağlantısı yapılmadan önce sistemden alınan akım, gerilim ve güç değerlerine ilişkin veriler Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9 da gösterilmiştir.



Şekil 7. Pilot Fider Gerilim Profili



Şekil 8. Akım-Gerilim Vektör Diyagramı



Şekil 9. Aktif-Reaktif Güç Vektör Diyagramı

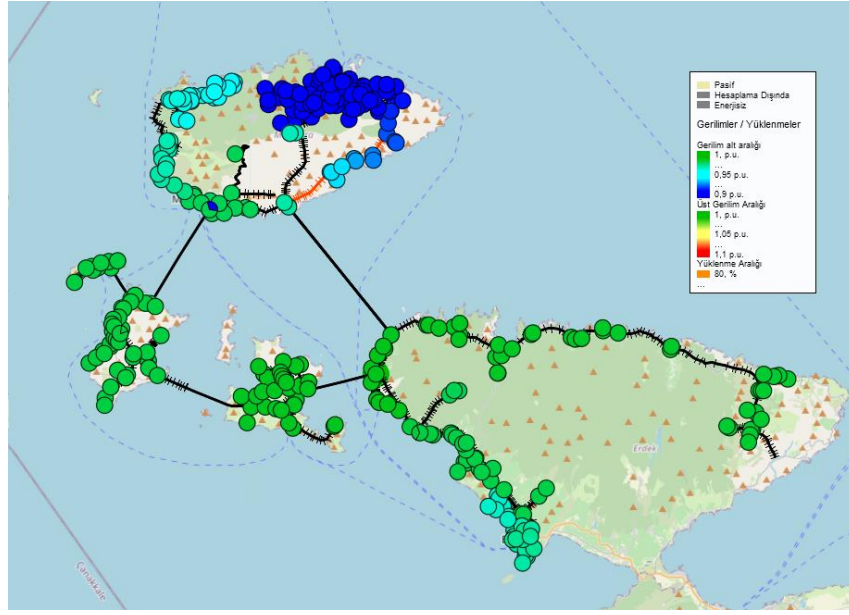
Modellemede FACTS Cihazı bağlanmadan önceki durumu toplam dış besleme 865.246 MWh, toplam üretim 15.101 MWh toplam yük = 805.970 MWh toplam kayıp = 74.377 MWh olarak hesaplanmıştır.

#### B. Şebeke Modellemesinin Facts Cihazı İle Tasarlanarak Yük Akış Analizinin Yapılması

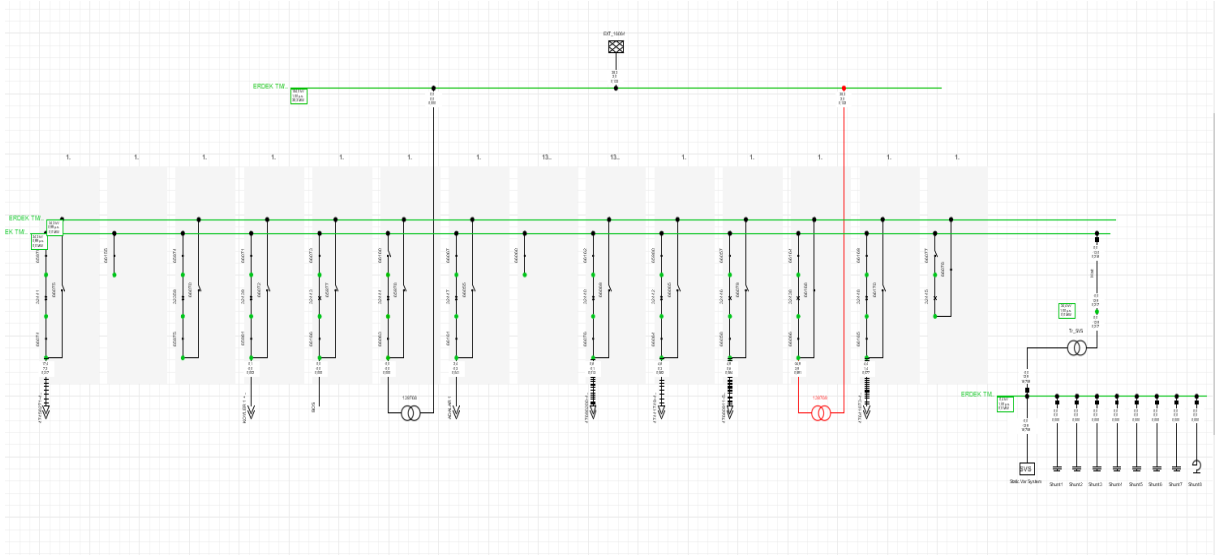
Bu bölümde, P-Q barasında gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişimleri Statik Var Kompanzator kullanılarak DigSilent Power Factory ortamında modellenerek incelenmiştir. SVC, aktif gücü ve gerilimi kontrol etmek için kullanılan en temel FACTS cihazıdır ve güç sisteminde bağlı olduğu baradaki gerilim değerini, reaktif güç değerine göre kontrol edebilme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle, sisteme bağlantısı yapılmıştır (Sundareswaran, 2010).

Bu cihazların çalışma aralığı -14 Mvar ile 14 Mvar arasındadır. Endüktif karakteristikte çalışma durumunda güç değeri negatif olmaktadır ve reaktif güç çekildiğini göstermektedir. Kapasitif karakteristikte ise güç değeri pozitifdir ve reaktif güç bastığını göstermektedir. Negatif veya pozitif değerler, modelleme açısından kolaylık sağlar. Bu çalışmada, SVC, güç sistemine paralel bağlanan ve hızlı bir şekilde kontrol edilebilen ideal bir reaktif güç kompansemanı olarak modellenmiştir.

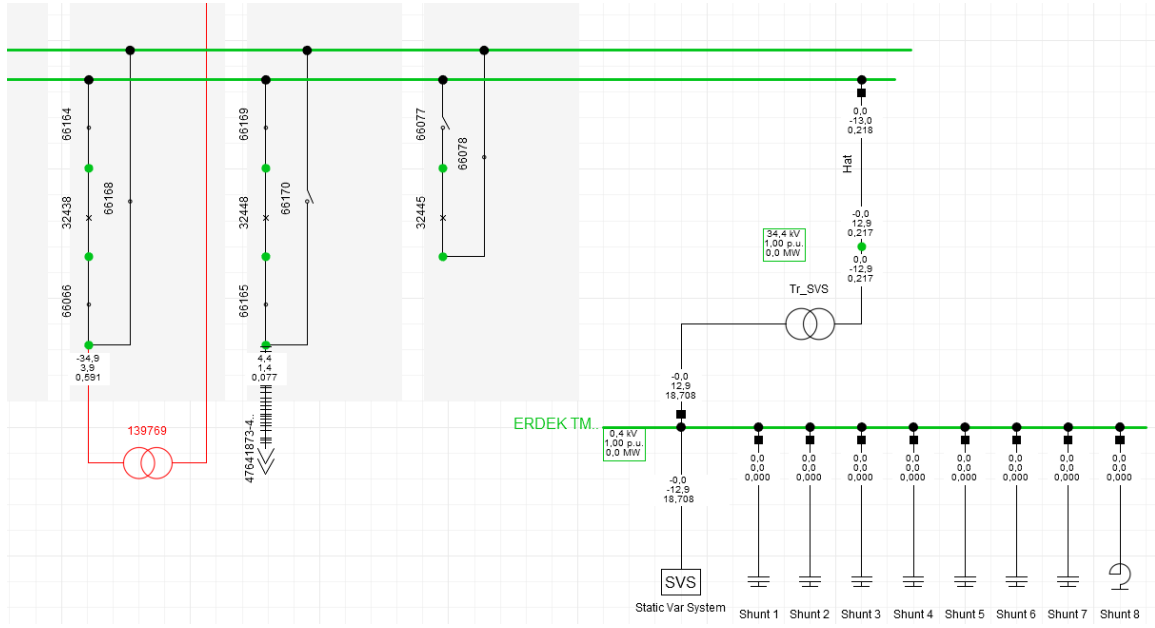
Sisteme paralel olarak bağlantısı yapılan SVC sonrası gerilim değişimleri Şekil 10, Şekil 10.1 ve Şekil 10.2'de gösterilmiştir. Şekil 10'da coğrafi bilgi sistemi üzerindeki modelleme yer almaktadır. Şekil 10.1 ve Şekil 10.2'de ise gerilimler ve gerilim düşümleri p.u. cinsinden etiketlerde belirtilmiştir.



Şekil 10. Pilot TM'ye SVC bağlanarak Yük Akış Analizinin Çalıştırılmış Halı



Şekil 10.1. Pilot TM içersindeki Fiderlerin SVC'den sonrası Gerilim Değerleri



Şekil 10.2. Pilot TM içerisindeki Fiderlerin SVC'den sonrası Gerilim Değerleri

Pilot TM modellenmesinde gerçekte sahada kurulu bulunan rüzgâr santralleri ve ilave olarak güneş enerji santralleri kullanılmıştır. Bu sistemde 9 tane 9,5 MW'lık rüzgâr santrali, 5 tane 5 MW'lık güneş enerji santrali kullanılmıştır. Santraller reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sisteme 14 MVAR'lık Statik Var Sistemi grubu kullanılmıştır.

Tablo 6. Pilot TM'deki baraların gerilim değerleri

| Ad                           | umax p.u. | umin p.u. | Maksimum Gerilim kV | Maksimum Gerilim (Faz-Faz) kV | Minimum Gerilim (Faz-Faz) kV | Minimum Gerilim kV |
|------------------------------|-----------|-----------|---------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------|
| ERDEK TM                     | 1,000     | 0,858     | 88,9                | 154,0                         | 0,3                          | 0,2                |
| ERDEK TM_ADALAR 1            | 1,000     | 0,979     | 0,2                 | 0,4                           | 0,4                          | 0,2                |
| ERDEK TM_ADALAR 2            | 0,994     | 0,941     | 19,8                | 34,3                          | 0,4                          | 0,2                |
| ERDEK TM_ADALAR 3            | 0,987     | 0,858     | 19,7                | 34,0                          | 0,3                          | 0,2                |
| ERDEK TM_BOS                 | -1,000    | 0,000     | 0,0                 | 0,0                           | 0,0                          | 0,0                |
| ERDEK TM_ERDEK 1             | 0,988     | 0,952     | 19,7                | 34,1                          | 0,4                          | 0,2                |
| ERDEK TM_ERDEK 2             | 0,988     | 0,973     | 19,7                | 34,1                          | 0,4                          | 0,2                |
| ERDEK TM_KOYLER 1 + ILHANLAR | 0,995     | 0,987     | 19,8                | 34,3                          | 0,4                          | 0,2                |
| ERDEK TM_KOYLER 2            | 0,994     | 0,979     | 19,8                | 34,3                          | 0,4                          | 0,2                |

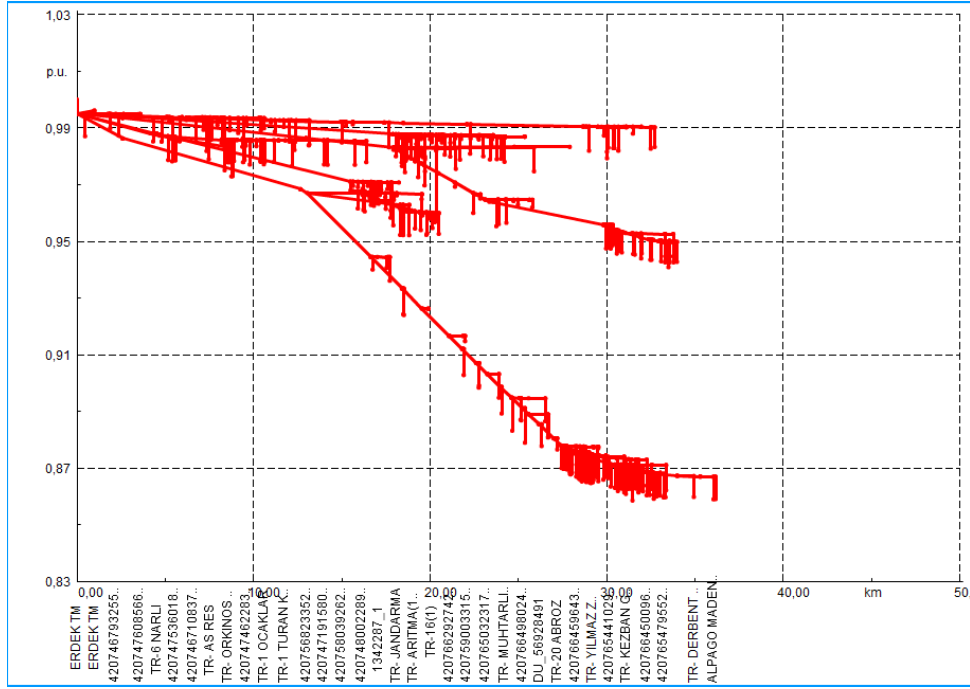
Tablo 7. Pilot TM baraların maksimum yüklenme durumları

| Ad                           | Maks. Yüklenme % | umax p.u. |
|------------------------------|------------------|-----------|
| ERDEK TM                     | 100000,0         | 1,000     |
| ERDEK TM_ADALAR 1            | 69,0             | 1,000     |
| ERDEK TM_ADALAR 2            | 94,3             | 0,994     |
| ERDEK TM_ADALAR 3            | 91,3             | 0,987     |
| ERDEK TM_BOS                 | 0,0              | -1,000    |
| ERDEK TM_ERDEK 1             | 52,2             | 0,988     |
| ERDEK TM_ERDEK 2             | 27,8             | 0,988     |
| ERDEK TM_KOYLER 1 + ILHANLAR | 27,4             | 0,995     |
| ERDEK TM_KOYLER 2            | 32,5             | 0,994     |

Gerilim yerel bir büyüklüktür ve gerilim kontrolüne ilişkin tedbirler dengesizliğin yakınında devreye sokulmalıdır. Özel cihazlar (generatörler, kapasitörler, reaktörler gibi) ve güç tesisleri reaktif gücün kontrol edilmesini sağlamaktadır. Gerilim kontrolünün sağlanması için sistemdeki bozunumlar sırasında sistem içerisinde reaktif rezervler bulunmalıdır. Rezervler, bozulmalar sırasında güç sistemlerinin gerilim seviyesini istenilen değerdeki kararlı hale getirebilmesi için temel rezerv olarak kullanılmaktadır.

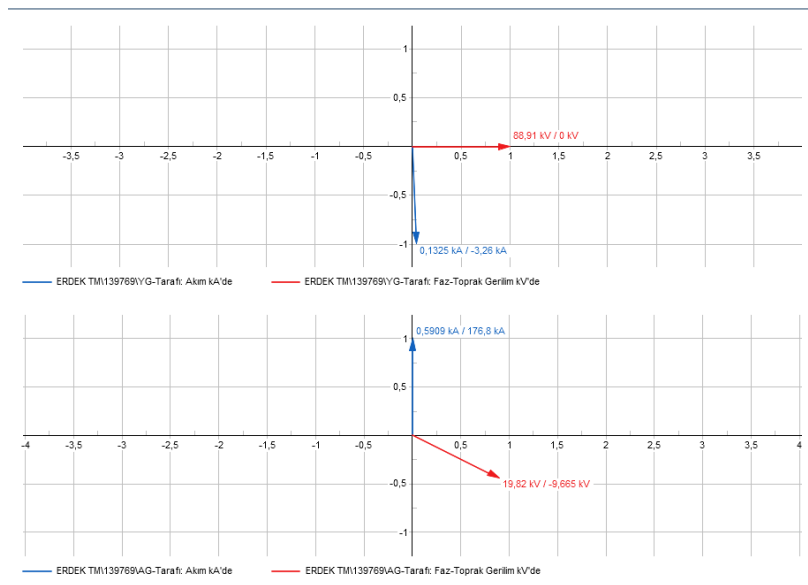
Farklı gerilim seviyelerinin dönüşümü, kademe değiştircili güç transformatörleri ile ayarlanabilir. Bu da farklı gerilim seviyeleri arasında reaktif güç akışını sağlar (Samancıoğlu, 2014).

Bu çalışmada, yükü modellerken birbirinden bağımsız rastgele değerler kullanılmıştır. Sistemdeki orijinal yük değerleri, ortalama yük değerleri olarak seçilmiştir. Test sonuçlarına göre SVC cihazının doğruluğu izlenmiştir. Şebekenin aşırı yüklenme durumlarında seviye transformatörleri kullanılmadan, SVC cihazı gerilim kontrolünü sınırları içerisinde sağlayabilmektedir. SVC'nin 1 nolu baraya paralel bağlanması ile TM'den gerilim profili alınmıştır.



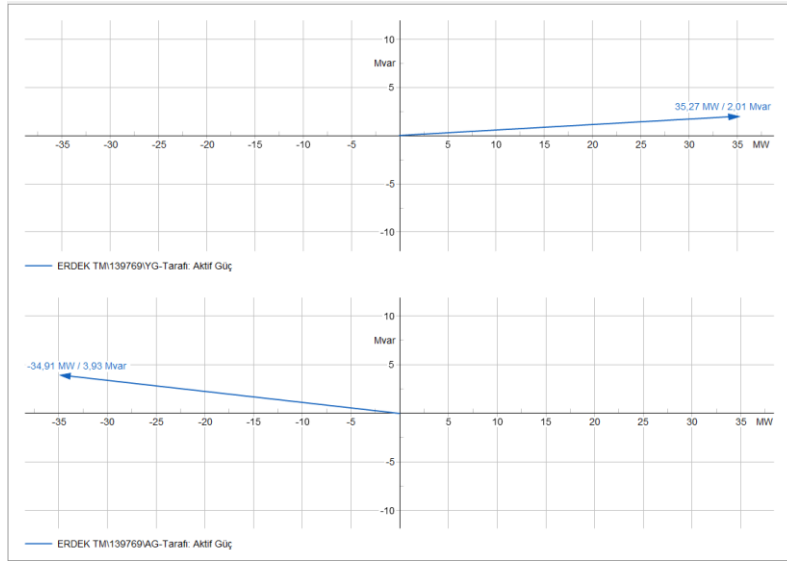
Şekil 11. Pilot Fider Gerilim Profili

Şekil 12 ve Şekil 13'te SVC bağlandıktan sonra Akım-Gerilim ve aktif ve reaktif güç değerindeki değişimlerin vektör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 12. Akım-Gerilim Vektör Diyagramı





Şekil 13. Aktif-Reaktif Güç Vektör Diyagramı

Modellemede FACTS Cihazı bağlandıktan sonraki durumu Toplam Dış Besleme 852,323 MWh Toplam Üretim 15.101 MWh Toplam Yük = 805.970 MWh Toplam Kayıp = 61,454 MWh olarak hesaplanmıştır.

### III. SONUÇLAR

Oluşturulan modellemede, üretim santrallerinin şebekeye bağlanması durumunda gerilim bozulması sırasında sistemde yeterli reaktif rezerv bulunması gerekmektedir. Ancak, bu rezervlerin sistemden çekilmesi aynı zamanda sistem kararlılığını da bozmaktadır.

Bilimsel araştırmalar, FACTS cihazlarının elektrik güç sistemine optimum yerleşiminin karmaşık ve önemli bir problem olduğunu göstermiştir. Elektrik güç akış denklemleri lineer olmadığı için çözümler iteratif yöntemlerle yapılmaktadır. FACTS cihazlarının entegrasyonunda, optimizasyon metotları ve amaç fonksiyonları belirlemek zor olabilir. Güç kayıpları, gerilim dalgalanmaları ve maliyet gibi faktörler farklı sonuçlara yol açabilir. DigSilent Power Factory programı, FACTS cihazlarının güç sistemi kontrolünü iyileştirdiğini ortaya koymuştur. (Agüero ve ark., 2014).

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını artırmak ve sistem gereksinimlerini karşılamak için FACTS cihazlarının yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretiminde daha önemli bir rol oynamaktadır (Mahela ve ark., 2015). Yapılan araştırmalar, FACTS cihazlarının yenilenebilir enerji sistemlerinde ve akıllı şebekelerde etkili olduğunu, bu cihazların enerji üretimini artırdığını ve güç sistemlerinde daha fazla güvenilirlik sağladığını göstermiştir. (Crow, 2004; Suresh ve Sreejith 2017). Ayrıca, dağıtık üretim ve değişken arz-talep durumları için yapılan dinamik yük akış analizleri, FACTS cihazlarının gerilim ve güç faktörü kararlılığı üzerindeki olumlu etkilerini ortaya koymuştur. (Sadaiappan ve ark., 2010).

Kalair ve ark., (2017) tarafından değişken arz talep durumları ve dağıtık üretim durumları için gün içi dinamik yük akış analizi yapılmış, değişken arz ve talep durumları, güç parametre değerlerinin saatlik değişimleri hesaplanmış ve incelenmiştir. Sonuç olarak üretim süreksizliği gösteren generatörlerden oluşan dağıtık üretimin, gerilim ve güç faktörü kararlılığı üzerindeki etkileri değişen arz ve talepleri üzerine analiz edilmiştir (Kalair ve ark., 2017).

Gerilimleri değişken olan trafo merkezleri ve bara sistemlerine yönelik optimizasyon teknikleri kullanılarak bağlantı noktaları belirlenmiş ve FACTS cihazları bağlanarak sistemin güç hesaplamaları, yük akışı analizi ve gerilim düşümü kontrolleri gerçekleştirilmiştir. FACTS kontrolörlerinden SVC kontrolörü, paralel bağlandığı için ek bir sanal baraya ihtiyaç duyulmamıştır.

Çalışmada, mevcut şebekede yüklerin yoğun olduğu bölgelerde üretim santrallerinin devrede olması nispeten şebekedeki yük yoğunluğunu azaltmaktadır. Bu azaltımların yanında sistemde reaktif güç etkisi oluşturarak aktif gücün akım-gerilim değerlerini değiştirmektedir. Modellemede alt ve üst sınır değerleri,

400 kV gerilim seviyesi için 1p.u. gerilim alt aralığı 0.95-1.0p.u. ve üst gerilim aralığı 1-1.05p.u. olarak belirlenmiş olup, hem endüktif hem de kapasitif karakteristikte çalışabilmektedir.

1. Şekil 7 ve Şekil 11'de, TM içerisinde bulunan trafoya ait gerilim profili oluşturulmuştur. FACTS cihazı bağlandıktan sonra sistem kararlılığı artmış ve gerilim düşümleri azalmıştır.
2. Şekil 8 ve Şekil 12 karşılaştırıldığında, YG tarafında akım 0,1494 kA/-25,88 kA iken AG tarafında 0,6667 kA/154,1 kA, gerilim ise YG tarafında 88,91 kV iken AG tarafında 18,37 kV/-10,34 kV'dir. FACTS cihazı bağlandıktan sonra sistemde akım 0,1325 kA/-3,26 kA iken AG tarafında 0,5909 kA/176,6 kA, gerilim ise YG tarafında 88,91 kV iken AG tarafında 19,82 kV/-9,665 kV'dir.
3. Şekil 9'da, üretim santralleri devrede iken YG tarafında aktif-reaktif güç 35,86 MW/17,4 MVar, AG tarafında ise -35,91 MW/-9,844 MVar'dır. Şekil 13'te, FACTS cihazı devreye alındıktan sonra YG tarafında aktif-reaktif güç 35,27 MW/2,01 MVar, AG tarafında ise -34,91 MW/3,93 MVar'dır.
4. Şekil 4.1 ile Şekil 10 incelendiğinde, FACTS cihazı bağlantısından sonra modellenmenin  $\frac{3}{4}$ 'ünde gerilim düşümünün azaldığı ve sistemin gerilim değerlerinin 34,5/36 kV değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Şekil 4.2 ve Şekil 10.1'de baralarda bulunan etiket bilgilerinden gerilimde iyileşmeler vardır.
5. FACTS cihazları bağlı değilken 7 günlük yük profili altında FACTS cihazları bağlıken bulunan ihlaller karşılaştırılmıştır. Şekil 4.1'de artan FACTS cihazı sayısı ile sorunlu durumlarda azalma görülmüştür. Eğer haftalık yük belirsizliği modelinde FACTS cihazları tercih edilmezse, bara gerilimleri ve hat ihlallerinin sonuçları yük modeline bağlıdır. Optimizasyonun amacı, uzun süreli yük değişimlerine göre bara gerilimlerindeki ve hatlardaki güç ihlallerini minimum seviyeye indirmektir.

Farklı yük karakteristiklerine sahip bir enerji iletim sisteminde FACTS elemanlarının gerilim kararsızlığını nasıl etkilediği incelenmiştir. Şönt ekipmanlar sürekli devrede iken, en kötü acil durum senaryosu olarak üretim barasının kısa devre durumu ele alınmış ve bu durumda bara gerilimlerinin ortalama 0.86 p.u. seviyelerine düştüğü, kararlı hale geçişin daha uzun sürdüğü gözlemlenmiştir. FACTS cihazlarının devrede olduğu durumlarda ise gerilimlerin 0.95 p.u. işletme limit değerleri içinde tutulduğu belirlenmiştir.

Yapılan analizler, mevcut enerji iletim sisteminde bara gerilimlerinin işletme limit değerlerine yakın olduğunu ve sistem arızalarında kritik noktalarda gerilim çökmelerinin yaşandığını göstermiştir. FACTS cihazlarının elektrik güç sistemlerine entegre edilmesinin, sistemlerin kararlılığını ve maksimum yüklenme aralıklarını artırdığı ve gerilim değerlerini alt ve üst limitler arasında koruduğu ortaya konulmuştur. Sonuç olarak, enerji iletim sistemlerinde gerilim kararlılığının sağlanmasında en etkin yöntemlerden birinin sisteme uygun noktalardan FACTS cihazlarının entegre edilmesi olduğu vurgulanmıştır.

SVC (Statik Var Kompanzatorü) sistemlerinin, dinamik güç sistemlerinde reaktif güç yönetimini nasıl sağladığı ve sisteme olan faydaları ele alınmıştır. SVC sistemlerinin, anlık ihtiyaçlara bağlı olarak hızlı bir şekilde reaktif güç basıp çekebildiği, geniş bir aralıkta çalışabildiği, güvenli ve işletme esnekliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Gerçekleştirilen maliyet analizi araştırmalarına göre, modellenmesi yapılan pilot bölgede FACTS cihazlarının kendilerini yaklaşık 6-8 yıl içinde amorti edeceği tespit edilmiştir. Ayrıca, bu cihazların ilave iletim hatları ve üretim ünitelerinin tesis edilme gereksinimlerini belirli bir süre öteleyebileceği sonucuna varılmıştır (Değirmenci, 2016).

#### IV. TARTIŞMA

Şekiller ve tablolarda gösterilen değerler, gerilim değeri, yüklenme kapasitesi ve reaktif-aktif güç değerleri gibi verileri içermektedir. Örneğin, dağıtım sisteminin yüzdesel olarak yüklenme durumu, FACTS cihazı bağlanmadan ve bağlandıktan sonraki halleri tablolarda gösterilmiştir. Bu sonuçlar, güç sistemindeki elektrik üretimi ve tüketiminin her zaman dengede olması gerektiğini göstermektedir. Arz ve talepteki farklılıklar, güç sistemi kararsızlığına veya voltaj dalgalanmalarına neden olarak ciddi arızalara neden olabilir. Beklenmeyen yük değişiklikleri elektrik kesintilerine neden olabilir. Bir güç hattı aşırı yüklendiğinde bara voltajı düşer veya iletim hattı termal kapasitesine ulaşır. Senkron jeneratörlerin ve kontrol yetenekleri sınırlı olan kompanzasyon kaynaklarının mevcut altyapısında yüksek veya düşük gerilim durumları meydana gelebilir. Bu açıdan bakıldığında, doğru şekilde yerleştirilen FACTS ekipmanları mevcut güç altyapısının daha iyi çalışmasını sağlayabilir.

Mevcut sistemde bulunan reaktif güçleri minimize etmek, hem şebeke kararlılığını artırmakta hem de sistemden beslenen üçüncü şahısları gerilim düşümü gibi bozunmalardan koruyarak enerjinin verimli olarak tüketilmesini sağlamaktadır. Kurulacak olan üretim santralının ve sistemde yük barasına (P-Q) bağlantısı yapılacak FACTS cihazının konumlarının yükün fazla olduğu bölgelere göre ayarlanması, ekonomik ve teknik açıdan yapılan değerlendirmelerle birlikte dağıtım sistemine yapılan yatırımların yapılabilir ve finanse edilebilir olmasını sağlayacaktır. Mevcut dağıtım ağında gerilim düşümü olan alanlara ilave trafo tesisleri yapmak veya hatların kesitini artırmak, sistem kararlılığını sağlamayacak olup daha fazla işletme bakım maliyetini artıracak ve mevcut hatlardaki kayıpları sönmülemeyecektir.

Elektriksel kayıpların azaltılması, elektrik enerji sistemlerinin verimliliği açısından oldukça önemlidir. Güç sistemlerinde karşılaşılan teknik kayıpların başında Harmonik Distorsiyon gelmektedir. Harmonik Distorsiyon Elektrik akımındaki bozulmalar, sistemde istenmeyen harmonik frekansta sinyaller oluşturur. Bu kayıpları sırasıyla tüketici yüklerinin yanlış topraklanması, iletim hatlarının aşırı yüklenmesi ve uzunlukları, uzun mesafelerde elektrik enerjisi iletiminde yaşanan gerilim düşüşleri ve kalitesiz veya standart dışı ekipman kullanımı, verimliliği olumsuz etkiler. Son olarakta şebekeden çekilen reaktif güç tüketimi, güç kayıplarını artırabilir. Bu nedenlerle, bu kayıpları minimize etmek, sistem verimliliğini artırmak için önemlidir (Navani ve ark., 2012).

Gerilim düşümünün temel nedenlerinden biri, güç sisteminde yükün aktif ve reaktif güç ihtiyacının aşırı artmasıdır. Bu durum, iletim hatlarında ve jeneratörlerde kayıplara yol açar. Güç sistemlerindeki kayıplar üç ana kategoriye ayrılabilir: üretim, iletim ve dağıtım kayıpları. Elektriksel kayıpların büyük kısmı iletim ve dağıtım sistemlerinde görülür. Üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık %8'i iç kayıp ve iç tüketimden kaynaklanmaktadır (Yaşar ve ark., 2010).

Güç sistemlerindeki kayıpların artması, enerji iletim hatlarının kapasitesinin üzerinde çalışmasına neden olur ve bu durum, aktif ve reaktif güç kaynaklarının azalmasına yol açar. İletim hattının sınırlarının aşılması, diğer hatlardaki reaktif güç kaybını artırır ve bu da güç sistemindeki reaktif güç ihtiyacını artırır. Artan yükler nedeniyle yük baralarında belirgin gerilim düşümleri gözlemlenir. Gerilim düşümlerini dengelemek için şönt ekipmanlar ve jeneratörler kullanılarak gerilim eski seviyelere çekilmeye çalışılır, ancak bu süreçte aktif ve reaktif güç kayıpları artar. Sonuç olarak, enerji iletim hattındaki gerilim düşümleri daha büyük olur. Güç kayıplarını minimize etmek için akımın düşürülmesi ve gerilimin artırılması gereklidir. Ayrıca, hat empedansını azaltmak da kayıpları düşürmek için bir yöntemdir.

## V. ÇIKARIM

Elektrik enerjisinin tüketicilere kesintisiz, daha az maliyetle ve kaliteli şekilde iletilmesini sağlamak önemlidir. Şebekede uyarımların neden olduğu gerilim dalgalanmalarına sebep olan durumlar sadece tüketiciyi değil, aynı zamanda bu elektriğin dağıtılmasından sorumlu dağıtım şirketlerini ve mevcut şebekeyi olumsuz etkilemektedir. Mevcut şebekede bu dengesizliklerin oluşması, hem şebeke bakım maliyetlerini artırmakta hem de yeni yatırımların yapılması için zorunluluk oluşturmaktadır. Ani oluşan zorunlulukların ve bakım maliyetlerinin minimize edilmesi, ancak gerçek veriler doğrultusunda tahmin edilebilir yüklerin sanal olarak sisteme bağlanması ve oluşabilecek olumsuz olasılıklar için önlem alınması ile mümkündür. Örneğin, yapılacak olan yüksek güçlü üretim santrallerinin yükün en fazla olduğu alanlara kaydırılması ve bu firmaların başka şehirde olsa bile mahsuplaşmasının sağlanması için çalışmalar hızlandırılmalı ve kolaylaştırılmalıdır. Tüketimin az olduğu bölgelere ise üretim santrallerinin kurulmasının önüne geçilmesi gerekmektedir. Bu hususlar dikkate alındığında, şebekenin ömrü ve bakım maliyetleri minimize edilebilir. Bir bölgede üretim santrali kurulması planlanırken, elektrik enerji sisteminin üretim birimleri ve yüklerin tümüne hizmet vermesi sebebiyle elektrik enerji sisteminin bütün olarak ele alınması önem arz etmektedir.

Üretim tesislerinin yakınlarındaki tüketiciler tarafından üretim santrallerince gerçekleştirilen üretimler tüketilmezse, enerji tüketilemeden yeniden ana baraya dönecektir. Bu geri dönüş sistemde gerilim yükselmesine sebep olacaktır. Üretilen bu enerjinin tek bir noktadan çıkış yapılması yerine, sistemde farklı noktalardan dağıtılarak verilmesi gerilimdeki ani değişikliklerin önüne geçilmesinde etkin rol oynayacaktır. Modellemenin yapıldığı bölgede yük yoğunluğunun fazla olması, bölgenin çalışma yapılacak optimum lokasyon olduğunu göstermektedir. RES ve GES'lerin yüksek kurulu güçlerde dağıtım sistemine bağlantı yapılmaya başlanması, özellikle dağıtım sisteminin nispeten zayıf olduğu bölgelerde şebeke kararlılığı açısından hassas bir durum teşkil etmektedir.

Tabii ki, bütün bu çalışmaların yapılabilmesi ve kaliteli enerji sağlanabilmesi için soğuk havanın rüzgâr türbinlerinden enerji üretiminde önemli bir faktör olduğunu ve soğuk bölgelerde kurulum yaparken zorlukların ortaya çıkabileceğini belirtmiştir (Tammelin ve Seifert, 2001). Bu nedenle, kurulumların yapılacağı alanlarda soğuk iklim etkisinin kısa sürmesi önem arz etmektedir. Ayrıca, incelediğimiz çalışmalarda soğuk sıcaklıklardaki operasyonlarla ilgili herhangi bir bilgiye rastlanmamıştır. Ancak, bu çalışmaya katılan uzmanlar anketler aracılığıyla soğuk havanın rüzgâr türbinlerinden enerji üretimindeki önemini ve soğuk bölgelerdeki kurulum zorluklarını vurgulamıştır. Türbinlerin çalışmadığı 5 ila 7 ay süresince kendilerini ısıtmak için enerji harcaması durumunda, üretimin beklenen miktarın yarısı kadar azalacağı ve bu nedenle yüksek rüzgârlı alanlara yatırım yapmanın mantıklı olmayacağı belirtilmiştir. Kanat ısıtma sistemlerinin geliştirilmesi, bu sorunu hafifletebilir. Sonuçlar, mevcut rüzgâr çiftliklerinin donma süresi skalasında 50 derecenin altında yer almadığını ve çoğunun donma süresi haritasına göre en uygun bölgelerde bulunduğunu göstermiştir. Ancak, gelecekte rüzgâr çiftliklerinin sıfırın altındaki daha yüksek bölgelere doğru kayacağı öngörülmektedir. Örneğin, Borusan EnBW, 52,8 MW kurulu kapasiteye sahip olan ve yüksekliği 1600-1693 metre arasında değişen Mut Rüzgar Enerjisi Santrali'ni Mersin'in Gökçetaş ve Medreselik köylerinde kurmuştur. Rüzgâr enerjisinin ülkenin bu kısmına kayması nedeniyle, bu çalışmada sıcaklık kriteri diğer çalışmalara kıyasla karar verme sürecine dâhil edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, sistem güvenilirliğini ve kararlılığını artırmak, hatalar ve donanımsal bozuklukların etkilerini sınırlandırarak tekrar eden enerji kesilmelerini önlemek ve Türkiye'nin enterkonnekte sisteminin gerilim ve güç kontrolünü daha kaliteli ve ekonomik bir şekilde sağlamaya yönelik katkılar sunacaktır.

### TEŞEKKÜR

Bu çalışmada her türlü desteği veren katkı sağlayan fikirleri ile yön gösteren sayın danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mustafa DURSUN'a, fikirleri ile makaleme katkı sağlayan Doç. Dr. M. Kenan DÖŞOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü bilgi ve birikimi kullanıma sunan UEDAŞ ailesine, ayrıca akademik eğitime verdiği desteklerden dolayı UEDAŞ Yatırım Direktörü Sn. Ahmet BERK'e bu süreçte en büyük destekçim bu çalışmaları yapabilmem için bana fırsat sunan zaman ayıran Yatırım Planlama Müdürü Sn. Hakan ERSOY'a ,manevi desteğini hiç eksik etmeyen Yatırım Planlama Ekip Lideri Hazim ÖZTÜRK'e , Şebeke analiz programının kullanımı için eğitim desteği aldığımız EPRA ENERJİ Sn.Hüseyin Oğuz'a Makalede yaptığım projenin sahadan OSOS verilerinin alınmasında ve her program kullanımında desteklerini esirgemeyen Genel Aydınlatma ve Kayıp Analizi Yönetmeni Sn. Erdi KOCADAĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Makale hazırlama sürecinde kıymetli vakitlerinden feragat eden beni hep destekleyen annem Selma BAYRAK, eşim Ahmet Serdar BAYRAK ve oğlum Zeki Tuna BAYRAK'a hep arkamda duran hiçbir şeyi esirgemeyen değerli ailem Mukaddes -Servet DİNÇER ve Meryem -Selahattin KAHVECİ'ye minnettarım.

### KAYNAKLAR

- Döşoğlu M. K (2010). Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı Haziran 2010 Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi - Rüzgâr Santralinde Gerilim Ve Güç Kontrolünün Facts Cihazları İle İncelenmesi.
- Abido M. A., (2008). Power System Stability Enhancement Using Facts Controllers: A Review, The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 34, Number 1B,153-172.
- Acha, E., Fuerte-Esquivel, C. R., Ambriz-Perez, H., & Angeles-Camacho, C. (2004). *FACTS: modelling and simulation in power networks*. John Wiley & Sons.
- Agüero, E.D., Cepeda, J.C. and Colomé, D.G. (2014). FACTS models for stability studies in DigSILENT Power Factory. 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA), ss. 1-6.
- Barrios-Martínez, E. and Ángeles-Camacho, C. (2017). Technical comparison of FACTS controllers in parallel connection. *Journal of applied research and technology*, 15, (1): 36-44.
- Bayraktar, E. (2021). Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi - Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Artırılmasında Facts Cihazların Uygulaması.
- Becerik Mir,G. (2022). Dokuz Eylül University Graduate School Of Natural And Applied Sciences, Coordinated Transmission Expansion Planning With Wind Power Generation And Facts Devices.
- Carlak, H. F. and E Kayar, E. (2019). Volt/VAR Regulation in Energy Transmission Systems Using SVC and STATCOM Devices. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*. 7(4).
- Crow, M. (2004). Power quality enhancement using custom power devices [Book Review]
- Darabian, M. and Jalilvand, A. (2017). A power control strategy to improve power system stability in the presence of wind farms using FACTS devices and predictive control. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 85, 50-66.
- Değirmenci, S. (2016). Environmental Impact and Capacity analysis of Renewable Energy resources: Case Study of Wind Energy in Turkey. A Thesis Submitted to the Graduate School of Engineering And Sciences of İzmir Institute of Technology in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Environmental Engineering
- Edvard C, (2014). 9 Most Common Power Quality Problems. <https://electrical-engineeringportal.com/9-most-common-power-quality-problems> (Available From: 08.06.2021).
- Ersavaş, C. (2013). Elektrik Şebekelerinde Facts Cihazlarının Optimum Yerleşimi. Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ege Üniversitesi.
- Gencer, E. (2018) Orta gerilim şebekelerinde gerilim sarkmalarına dstatcom etkileri. Yüksek lisans tezi Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim dalı Sakarya 87s.
- Gyugyi, L. (2000). Application characteristics of converter-based FACTS controllers. PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No. 00EX409), ss. 391-396,
- Habur, K. and O'Leary, D. (2004). FACTS-flexible alternating current transmission systems: for cost effective and reliable transmission of electrical energy. *Siemens-World Bank document-Final Draft Report, Erlangen*, 46.

- Haghifam, M.R. and Malik, O.P., (2007). Genetic algorithm-based approach for fixed and switchable capacitor placement in distribution systems with uncertainty and time varying loads, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 1(2):244-252 pp.
- İşin, E. (2022). Güneş Enerji Santrallerinde Güç Faktörü Ve Gerilim Kararlılığının Belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya Teknik Üniversitesi.
- Kalair, A., Abas, N., Kalair, A., Saleem, Z. and Khan, N. (2017). Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 1152-1187.
- Kehrli, A. and Ross, M., (2003). Understanding grid integration issues at wind farms and solutions using voltage source converter FACTS technology, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1822-1828 pp.
- Kumar, N.S. and Gokulakrishnan, J., (2011). Impact of FACTS controllers on the stability of power systems connected with doubly fed induction generators, *Electrical Power and Energy Systems*, 33(5):1172-1184 pp.
- Mahela, O.P., Shaik, A.G. and Gupta, N. (2015). A critical review of detection and classification of power quality events. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 495-505.
- Navani, J., Sharma, N. and Sapra, S. (2012). Technical and non-technical losses in power system and its economic consequence in Indian economy. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, 1, (2): 757-761.
- Özdemir, E. (2007). Dağılmış Enerji Üretim Sistemleri ve Yardımcı Hizmetler. 12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi, 14-18.
- Sadaippan, S., Renuga, P. and Kavitha, D. (2010). Modeling and simulation of series compensator to mitigate power quality problems. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2, (12): 7385-7394.
- Samancıoğlu, G. (2014). Rüzgar Havza Planlaması Ve Rüzgar Santrallerinin Şebekeye Olan Etkilerinin Digsilent Programı İle Modellenmesi.-Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi.
- Singh, B., Sharma, N.K. and Tiwari, A.N., (2010). A Comprehensive Survey of Optimal Placement and Coordinated Control Techniques of FACTS Controllers in Multi-Machine Power System Environments, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 5(1):79-102 pp.
- Sundareswaran, K. (2010). Optimal Placement of Static VAR Compensator (SVC's) Using Particle Swarm Optimization, *Power, Control and Embedded Systems*, Allahabad, India, 1-4 pp.
- Suresh, V. and Sreejith, S. (2017). Power flow analysis incorporating renewable energy sources and FACTS devices. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7 (1): 452-458.
- Tabak, B. and T-Yalçın M.(2004). Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 8(1).
- Tammelin, B. and Seifert, H. (2001). *Large Wind Turbines Go Into Cold Climate Regions*. *Power*. 20: P. 30.
- Tekin, M., Keçecioglu, Ö.F., Erafşar, Ö., and Şekkeli, M. (2016). Bir hidroelektrik santralinin(hes) elektrik şebekesindeki harmonik Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi . *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2),70-77.
- Uzun, U.E (2022). Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Y.Lisans Tezi- Facts Cihazları Kullanılarak Elektrik Güç Sistemlerinin Kararlılık Yapısının İncelenmesi Ve Çoklu Bara Uygulamaları.
- URL-1, [www.enerjiatlası.com/gunes/](http://www.enerjiatlası.com/gunes/) 2 Mayıs 2024.
- URL-2, [www.enerjiatlası.com/ruzgar/](http://www.enerjiatlası.com/ruzgar/) 3 Mayıs 2024.
- URL-3, [www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri](http://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri), 5 Mayıs 2024.
- Vural, A. (2001). Flexible AC Transmission a Unified Power Flow Controller, Master Thesis, Gaziantep Üniv.
- Wu, F., Zhang, X. P., Godfrey, K. and Ju, P., (2007). Small signal stability analysis and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 1(5):751-760 pp
- Yaşar, C., Aslan, Y. and Biçer, T. (2010). Bir Dağıtım Transformatörü Bölgesindeki Kayıpların İncelenmesi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (022): 9-22.
- Yeşilbudak, M., Bayındır, R., and Çetinkaya, Ü.(2016) Güç sistemlerinde Gerilim kararlılığını etkileyen Faktörler; *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Tecnology*, 3(4), 595-602.