



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNİN
MODELLENMESİ VE KISA DEVRE ANALİZİ**

Mehmet ŞEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Ağustos-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet ŞEN tarafından hazırlanan ‘‘Rüzgar Enerji Santrallerinin Modellenmesi ve Kısa Devre Analizi’’ adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliğı / oy okluğı ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç.Dr.Nurettin ÇETİNKAYA

.....

Danışman

Prof.Dr.Muciz ÖZCAN

.....

Üye

Dr.Öğr.Üyesi Mümtaz MUTLUER

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet ŞEN

Tarih: 10.08.2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR ENERJİ SANTRALLERİNİN MODELLENMESİ VE KISA DEVRE ANALİZİ

Mehmet ŞEN

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof.Dr.Muciz ÖZCAN

2020, 144 Sayfa

Jüri

Prof.Dr.Muciz ÖZCAN

Doç.Dr.Nurettin ÇETİNKAYA

Dr.Öğr.Üyesi Mümtaz MUTLUER

Dünya’da ve ülkemizde artan nüfus ve gelişen teknoloji ile birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Fosil yakıtların sınırlı kaynaklar olması, elektrik enerjisi üretiminde kullanılması sonucu atmosfere bıraktıkları sera gazı yayılımının insanlar için hem çevresel hem de sağlık problemlerine sebep olması gibi bir takım olumsuz etkileri insanlığın yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesini zorunlu kılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilmesi planlanan elektrik enerjisinin, belirlenmesi güç özellikteki değişkenlere bağlı olması ve enerji talebi arzını karşılamak için elektrik şebekelerine verebileceği bazı olumsuzluklar önceden ön görülüp gerekli tedbirlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda enerji arzı ve talebi karşılama dengesi arasındaki ince çizgi daima göz önüne alınmalıdır.

Bu tez çalışmasında enerji arz-talep arasındaki bu dengeyi bozabilecek olumsuzluk önceden tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada Konya-Ardıçlı bölgesine ait geçmiş tarihli meteorolojik hava durumu verileri kullanılarak yıl içerisindeki aşırı rüzgârlı gün sayısı tespit etmek hedeflenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında modellenen rüzgâr elektrik santralının kurulacağı yerin rüzgâr hızı açısından uygun konumda olup olmadığı tespit etmek için geleceğe yönelik rüzgâr hızı tahmini gerçekleştirilmiştir. Geleceğe yönelik rüzgâr hızının değeri yapay sinir ağları ile Levenberg Marquardt algoritması kullanılarak tahmin edilmiştir. Matlab programında yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak yapılan çalışmadan elde edilen yüksek rüzgâr hızlarından kaynaklı oluşabilecek kısa devre arıza sayısı, yılda en fazla 14 gün olarak gerçekleşebileceği sonucu bulunarak rüzgâr santralının kurulacağı yerin konumunun uygunluğu doğrulanmıştır. İleri tarihli bir gün için bölgede rüzgâr hızı tahmini yapay sinir ağları ile % 92.76 oranında başarı ile tahmin edilmiş olup, oluşturulan yapay sinir ağı ezberleme yapmadan, daha önce programa girilmeyen verileri bile belirtilen bu yüksek başarı oranıyla tahmin edilmiştir.

Tezin ikinci aşamasında, yedi adet rüzgâr türbininden oluşan bir rüzgâr santrali Digsilent PowerFactory programında önce elektriksel modellemesi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde bu elektrik modelleme devresi üzerinde santrale ait oluşması muhtemel dört adet senaryo belirlenmiştir. Tespit edilen bu senaryolar için yük akış analizi ve kısa devre analizleri yapılarak pratikte kısa devre arızası olarak % 70 oranında en çok karşılaşılan faz-toprak kısa devre arızası için çözüm önerisi sunulmuş ve arıza akımının değeri düşürülmeye çalışılmıştır. Faz-toprak kısa devre analizi etkileyen faktörlerden transformatör bağlantı şekli ve topraklama direnci değerleri değiştirilerek, YNyn transformatör bağlantısı ve 20 ohm toprak direnci değeri için en düşük faz-toprak kısa devre akımı ile karşılaşılabileceği tespit edilmiştir. Bu yöntemle yanlış parametreler seçilmesi ile oluşturulacak bir tesisin, muhtemel herhangi bir faz toprak arızası durumunda kısa devre akımının değeri 30 kA seviyelerinde oluşabileceği ve bu çalışma sonucu belirtilen şekilde tesisin kurulması durumunda bu değer 0.02 kA seviyesinde oluşabileceği sonucu elde edilmiştir. Yapılan çalışma ile gösterilmeye çalışılan kısa devre akımı değerinin düşük çıkması durumu tesisin kurulması aşamasında kullanılacak şalt cihazlarının daha ekonomik olmasını sağlayarak yatırım maliyetlerinin düşürülmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Anahtar Kelimeler: kısa devre, rüzgâr hızı tahmini, rüzgâr santrali, yapay sinir ağları

ABSTRACT

MS THESIS

MODELLING OF WIND POWER PLANTS AND SHORT CIRCUIT ANALYSIS

Mehmet ŞEN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY**

**Advisor: Prof.Dr.Muciz ÖZCAN
2020, 144 Pages**

**Jury
Prof.Dr.Muciz ÖZCAN
Doç.Dr.Nurettin ÇETİNKAYA
Dr.Öğr.Üyesi Mümtaz MUTLUER**

The need for electrical energy is increasing day by day with the increasing population and developing technology in the world and in our country. Some negative effects such as the fact that fossil fuels are limited sources and the greenhouse gas emission released to the atmosphere as a result of its use in electrical energy production causes both environmental and health problems for people have made it compulsory for humanity to turn towards renewable energy sources. The fact that the electrical energy planned to be generated from renewable energy sources depends on the variables that are difficult to determine and some negativities that may be given to the electricity networks to meet the energy demand supply are foreseen and necessary measures must be taken. In this context, the fine line between the energy supply and the balance of meeting the demand should always be considered.

In this thesis, the negativity that might disrupt this balance between energy supply and demand was tried to be predicted. In this study, it was aimed to determine the number of extremely windy days during the year by using the meteorological weather data of the Konya-Ardıçlı region. In the first phase of the study, the estimation of future wind speed was made to determine whether the location of the wind power plant modeled is in a suitable position in terms of wind speed. The value of the wind speed for the future was estimated by using the Levenberg Marquardt algorithm with artificial neural networks. In Matlab program, the number of short circuit breakdowns that may occur due to the high wind speeds obtained from the study using the method of artificial neural networks, has been confirmed by the location of the place where the wind power plant will be established by finding the result that it can take place at most 14 days a year. For a future day, the wind speed in the region was estimated with a success rate of 92.76% with artificial neural network and even data that has not been entered into the program beforehand has been estimated with this high success rate with the artificial neural network created and without memorizing.

In the second phase of the thesis, electrical modeling of a wind power plant consisting of seven wind turbines was first performed in the Digsilent PowerFactory program. Then, four scenarios likely to arise from the power plant were determined on this electrical modeling circuit. Load flow analysis and short circuit analysis were made for these detected scenarios, a solution was proposed for phase-to-ground short circuit failure, the most common short circuit failure at a rate of 70% in practice and the value of the fault current was tried to be reduced. By changing transformer connection type and grounding resistance values among factors affecting phase-to-ground short circuit analysis, it was determined that the lowest phase-to-ground short circuit current will be encountered for YNyn transformer connection and 20 ohm ground resistance value. It was concluded that a plant to be constructed by selecting the wrong parameters with this method may have a short circuit current value of 30 kA in case of a possible phase-ground fault and that this value may occur at the level of 0.02 kA if the plant is established as specified in the conclusion of this study. The fact that the value of short circuit current, which is tried to be shown with the study, is low, played an important role in reducing the investment costs by making the switchgears to be used more economical during the establishment of the facility.

Keywords: short circuit, estimation of wind speed, wind plant, artificial neural networks

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen ve her konuda bana anlayış gösteren değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Muciz ÖZCAN'a ve her zaman yanımda olan, desteklerini her an arkamda hissettiğim aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mehmet ŞEN
KONYA-2020



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1.Literatür Araştırması.....	2
1.2.Tezin Amacı.....	5
1.3.Tezin Yapısı	5
2. RÜZGÂR ENERJİSİ.....	7
2.1.Rüzgâr Enerjisi Meteorolojisi	7
2.2.Türkiye’de Rüzgâr Enerji Potansiyeli.....	8
2.3.Türkiye’nin Rüzgâr Atlası	9
2.4.RES’lerin Kurulu Güç İçerisindeki Payı	11
2.5.Ülkemizin 2023 Rüzgâr Enerjisi Hedefleri	12
3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ.....	14
3.1.Türbin Elemanlar	15
3.1.1.Kule.....	16
3.1.1.1.Kule’nin rüzgâr gücüne etkisi	16
3.1.2.Kanat	18
3.1.2.1.Türbin kanatlarının rüzgâr gücüne etkisi	18
3.1.3.Nasel	20
3.1.4.1.Elektriksel elemanların rüzgâr gücüne etkisi	22
3.1.4.Rotor	23
3.2.Türbin Tipleri.....	24
3.2.1.Kanat sayılarına göre türbin tipleri	24
3.2.2.Eksenlerine göre türbin tipleri	25
3.2.3.Türbin hızlarına göre türbin tipleri	25
3.3.Türbin Dizaynlarına Göre Türbin Tipleri	26
3.3.1.Sabit hızlı rüzgâr türbinleri (Tip 1).....	26
3.3.2.Değişken hızlı rüzgâr türbinleri	27
3.3.2.1.Değişken rotor direncine sahip türbinler (Tip 2)	27
3.3.2.2.Kısmi ölçek frekans konverterine sahip türbinler (Tip 3).....	27
3.3.2.3.Tam ölçek frekans konverterine sahip türbinler (Tip 4)	29

4. RÜZGÂR HIZI TAHMİNİ	31
4.1.Yapay Sinir Ağları	32
4.2.Uygulama Bölgesi ve Verilerin Hazırlanması	36
4.3.YSA ile Modelleme	39
4.4.YSA'nın Eğitimi ve Testi	40
4.5.YSA Modeli ile Maksimum Rüzgâr Hızının Tahmin Sonuçları	42
5. KISA DEVRE	44
5.1.Kısa Devre Akımı Karakteristiği	45
5.2. İletim Nakil Hatlarında Meydan Gelebilecek Kısa Devre Çeşitleri	51
5.2.1. Faz-toprak arasında meydana gelen kısa devre durumu	52
5.2.2. Faz-faz arasında meydana gelen kısa devre durumu	54
5.2.3. İki faz-toprak arasında meydana gelen kısa devre durumu	55
5.2.4. Üç faz arasında meydana gelen kısa devre durumu.....	57
5.3. Kısa Devre Akımının Neden Olabileceği Termik Etki.....	58
5.4. Elektrik Enerji Tesislerinin ve İşletme Cihazlarının Maruz Kalabilecekleri Mekanik Etkiler ve Dayanımlarının Belirlenmesi	61
6. RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZ ÇALIŞMASI	64
6.1. Digsilent PowerFactory Programı Tanıtımı.....	66
6.2. RES'in Digsilent PowerFactory Programında Modellenmesi	69
6.2.1.Rüzgâr Türbini	73
6.2.2.Yükler	75
6.2.3.Hatlar	76
6.2.4.Baralar.....	77
6.2.5.Transformatörler	78
6.2.6. Şebeke	79
6.3. Modellenen RES Üzerinde Yük Akış Analizi	82
6.3.1.Rüzgâr türbini ve yükler devrede değilken durum (Senaryo-1)	86
6.3.2.Yalnızca yükler devre iken (Senaryo-2)	88
6.3.3.Yalnızca rüzgâr türbinleri devre iken (Senaryo-3)	90
6.3.4.Rüzgâr türbinleri ve yükler devrede iken (Senaryo-4)	92
6.4.Modellenen RES Üzerinde Kısa Devre Analizi	94
6.4.1.Üç faz kısa devre analizi (Senaryo-1).....	94
6.4.2.Faz-faz kısa devre analizi (Senaryo-2)	97
6.4.3.Faz-toprak kısa devre analizi (Senaryo-3).....	99
6.5. Santral Malzemelerinde Maliyet Verimliliği	104
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	107
8. KAYNAKLAR	109
EKLER	113
ÖZGEÇMİŞ	129

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Türkiye rüzgâr atlası güç yoğunluğu 50 m'deki verileri.....	10
Şekil 2.2. Türkiye rüzgâr atlası rüzgâr hızı 50 m'deki verileri.....	10
Şekil 2.3. Türkiye rüzgâr atlası güç yoğunluğu 100 m'deki verileri.....	11
Şekil 2.4. Türkiye rüzgâr atlası rüzgâr hızı 100 m'deki verileri.....	11
Şekil 2.5. Türkiye'de 2019 yılı için RES'lerin kurulu gücü.....	12
Şekil 2.6. Ülkemizde yıllara göre rüzgâr enerjisi gelişimi	12
Şekil 2.7. Yıllara göre kurulu güç, puant talep ve bağlanabilir RES kapasitesi	13
Şekil 3.1. Rüzgâr türbinlerinde mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü	15
Şekil 3.2. Rüzgâr türbini bileşenleri	16
Şekil 3.3. Kanadı oluşturan kesitler	18
Şekil 3.4. Rüzgâr türbini elemanları ve yerleri.....	20
Şekil 3.5. Direkt bağlı sincap kafes endüksiyon generatörlü sabit hızlı rüzgâr türbini ...	26
Şekil 3.6. Değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini.....	27
Şekil 3.7. Kısmi ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini	28
Şekil 3.8. Türbin hızına bağlı olarak elektriksel çıkış gücü.	29
Şekil 3.9. Tam ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini.	29
Şekil 4.1. Çok tabakalı yapay sinir ağının mimarisi.....	33
Şekil 4.2. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu	34
Şekil 4.3. Konya Ardıçlı RES bölgesinde 2019 yılına ait 10 metredeki maksimum rüzgâr hızı	38
Şekil 4.4. YSA' da kullanılan verilerin aldığı bölge	38
Şekil 4.5. Kullanılan Matlab YSA ara yüzü	39
Şekil 4.6. Eğitim, doğrulama ve test verilerine ait eğitim aşamasındaki performans fonksiyonunun değişimleri	40
Şekil 4.7. Eğitim, doğrulama ve test aşamalarında tüm verilerin sonuçlarına ait regresyon eğrileri.....	41
Şekil 4.8. YSA çıkışında elde edilen günlük maksimum rüzgâr hızı	43
Şekil 5.1. Yaz aylarında hava sıcaklığı sonucu veya aşırı yüklenme sonucu sarkma yapan iletkenler	44
Şekil 5.2. Generatöre yakın kısa devre sürecinin zamana bağlı grafiği	46
Şekil 5.3. Darbe kısa devre akımının R/X ve X/R oranına göre değişimi.....	47
Şekil 5.4. Senkron reaktans değeri 1.0 ve 2.0 olan silindirik generatörlerin λ değerleri. 49	
Şekil 5.5. Senkron reaktans değeri 1.0 ve 2.0 olan çıkık kutuplu generatörlerin λ değerleri	49
Şekil 5.6. Kısa devre açma akımındaki u parametresinin grafiksel değişimi.....	50
Şekil 5.7. Faz-toprak kısa devre genel gösterimi.....	52
Şekil 5.8. Faz-toprak kısa devre bileşen devre gösterimi.	53
Şekil 5.9. Faz-faz arası kısa devre genel gösterimi.	54
Şekil 5.10. Faz-faz kısa devre bileşen devre gösterimi.	55
Şekil 5.11. İki faz-faz kısa devre genel gösterimi.	56
Şekil 5.12. İki faz-toprak kısa devre bileşen devre gösterimi.	56
Şekil 5.13. Üç faz kısa devre genel gösterimi.	57
Şekil 5.14. Tepe faktörü (κ) ve kısa devre süresi (t_k)'nın bir fonksiyonu olan m faktörü	60
Şekil 5.15. Kısa devre süresi (t_k) ve I_k'' / I_a oranının bir fonksiyonu olan n faktörü	60
Şekil 5.16. Baraların mekanik zorlamalara maruz kalması sonucu birbirlerine doğru eğilmesi.....	63

Şekil 5.17.Elektrik şalt dolaplarında baraların sıcaklığı 100 °C'yi geçmemelidir	63
Şekil 6.1. I akımı altında Z empedansının her iki ucundaki gerilimler	65
Şekil 6.2.Bir rüzgâr türbinine ilişkin şebeke bağlantısı.....	65
Şekil 6.3.Rüzgâr türbin sistemi ile şebeke bağlantısının fazörel olarak gösterilmesi	65
Şekil 6.4.PowerFactory programı grafik arayüzü.....	66
Şekil 6.5.PowerFactory programı proje çalışma alanı oluşturulması.....	67
Şekil 6.6.PowerFactory programı veri giriş ana penceresi	67
Şekil 6.7.PowerFactory programı örnek bir yük akış analizi	68
Şekil 6.8.PowerFactory programı örnek bir kısa devre analizi hesaplama ekranı	69
Şekil 6.9.Digsilent Powerfactory programında çizilen RES'e ait tek hat güç akış şeması	72
Şekil 6.10.Rüzgâr türbinlerinin temel verilerinin girişi.....	73
Şekil 6.11.Rüzgâr türbinlerinin karakteristik özelliklerinin girişi.....	73
Şekil 6.12.Digsilent Powerfactory programında yük özelliklerinin veri girişi.....	76
Şekil 6.13.Digsilent Powerfactory programında hat uzunluğu veri girişi	77
Şekil 6.14.Digsilent Powerfactory programında hattın karakteristik özelliğinin veri girişi	77
Şekil 6.15.Digsilent Powerfactory programında baraların veri girişi.....	78
Şekil 6.16.Digsilent Powerfactory programında transformatörlerin veri girişi.....	78
Şekil 6.17.Ardıçlı RES indirici trafo merkezi	80
Şekil 6.18.Digsilent Powerfactory şebekenin temel verilerinin girişi	82
Şekil 6.19.Digsilent Powerfactory programında şebekenin bağlı olduğu baranın veri girişi	82
Şekil 6.20.Senaryo-1 için yük akış analizi	86
Şekil 6.21.Senaryo-1 için kısa devre analizi.....	95
Şekil 6.22.Üç faz kısa devre akım ve kısa devre güç grafiği.....	97
Şekil 6.23.Faz-faz kısa devre akım ve kısa devre güç grafiği	99
Şekil 6.24.Faz-toprak kısa devre akım ve kısa devre güç grafiği.....	103

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Atmosferik hareketlerin çeşitleri	8
Tablo 3.1. Ölçüm yerinin özelliklerine bağlı olan Hellman katsayısının değışimi.....	17
Tablo 3.2. Rüzgâr türbini tiplerinin sistem karşılaştırılması.....	30
Tablo 4.1. YSA'da kullanılan girdi ve çıktı katmanları verileri	37
Tablo 4.2. YSA'da kullanılan yöntem sonuçlarının karşılaştırılması.....	42
Tablo 6.1. Modellenen rüzgâr santraline ait veriler.....	70
Tablo 6.2. IEC 60076-5 standartı kısa devre gücü değerleri.....	80
Tablo 6.3. Bara tipleri genel özellikleri.	81
Tablo 6.4. Senaryo-1 için baraların yük akış değerleri.	87
Tablo 6.5. Senaryo-1 için hatların yük akış değerleri.	88
Tablo 6.6. Senaryo-1 için transformatörleri yük akış değerleri.	88
Tablo 6.7. Senaryo-2 için baraların yük akış değerleri.	89
Tablo 6.8. Senaryo-2 için hatların yük akış değerleri.	89
Tablo 6.9. Senaryo-2 için transformatörleri yük akış değerleri.	90
Tablo 6.10. Senaryo-3 için baraların yük akış değerleri.	91
Tablo 6.11. Senaryo-3 için hatların yük akış değerleri.	91
Tablo 6.12. Senaryo-3 için transformatörleri yük akış değerleri.	91
Tablo 6.13. Senaryo-4 için baraların yük akış değerleri.	92
Tablo 6.14. Senaryo-4 için hatların yük akış değerleri.	93
Tablo 6.15. Senaryo-4 için transformatörleri yük akış değerleri	93
Tablo 6.16. Modellenen sistemin üç faz kısa devre değerleri.....	96
Tablo 6.17. Modellenen sistemin faz-faz kısa devre değerleri	98
Tablo 6.18. Modellenen sistemde transformatör bağlantısı Dyn için faz-toprak kısa devre değerleri	100
Tablo 6.19. Modellenen sistemde transformatör bağlantısı YNyn için faz-toprak kısa devre değerleri	101
Tablo 6.20. Modellenen sistemde transformatör bağlantısı YNyn ve topraklama direnci 20 ohm için faz-toprak kısa devre değerleri	102
Tablo 6.21. Geliştirilen senaryoların yıl içerisindeki muhtemel karşılama gün sayıları	104
Tablo 6.22. RES koruma ekipmanlarının listesi.	104
Tablo 6.23. Koruma rölelerinin fonksiyonel açıklamaları.	105
Tablo 6.24. Analiz sonrası değışiklik yapılan malzemeler.	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

V	: Hesaplanmak istenen yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s)
V_0	: Ölçüm sonuçları bilinen yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s)
h	: Hesaplanmak istenen noktanın yerden yüksekliği (m)
h_0	: Ölçüm sonuçları bilinen noktanın yerden yüksekliği (m)
μ	: Hellmann katsayısı
ρ	: Havanın yoğunluğunu (kg/m)
P	: Basınç (N/m^2)
m	: Kütle (kg)
n	: Avagadro sayısı (mol)
R	: İdeal gaz sabiti ($J.mol^{-1}.K$)
T	: Sıcaklık ($^{\circ}K$)
A	: Kanatların süpürme alanını (m^2)
R	: Kanat çapı (m)
P_{in}	: Rüzgâr gücünü ($Watt$)
P_{giris}	: Türbin giriş gücü ($Watt$)
$P_{çikis}$: Türbin çıkış gücü ($Watt$)
C_p	: Türbin güç katsayısı
η_t	: Türbin aerodinamik verimlilik
η_m	: Mekanik verimlilik
η_e	: Elektriksel verimlilik
x_i	: Ağın girdileri
w_{ij}	: Girdi katmanı ile gizli katman arasındaki ağırlıklar
b_j	: Girdi katmanı ile gizli katman arasındaki eşik (bias) terimlerini
f_1	: Girdi katmanı ile gizli katman arasındaki aktivasyon fonksiyonunu
f_2	: Çıktı katmanı ile gizli katman arasındaki aktivasyon fonksiyonunu
j	: Gizli katmanına ait hücre sayısı
n	: Girdi katmanına ait hücre sayısı
k	: Çıkış katmanına ait hücre sayısı
w_{jk}	: Gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki ağırlıklar
b_k	: Gizli katmanı ile çıktı katman arasındaki eşiktir (bias)
$E(w)$: Performans fonksiyonu
$e(w)$: Beklenen değerler ile çıktı değerler arasındaki fark
I	: Birim matris
I_p	: Darbe kısa devre akımı ($Amper$)
I''_k	: Başlangıç kısa devre (subtranzient) alternatif akımı ($Amper$)
κ	: Darbe kısa devre akımı katsayısı
X	: Endüktans ($Henry$)
X''_d	: Başlangıç geçici reaktans (ohm)
I_{kmax}	: Sürekli kısa devre akımının maksimum değeri
I_{kmin}	: Sürekli kısa devre akımının minimum değeri
I_N	: Anma akımı
λ_{max}	: Generatör tipine göre güç katsayısının maksimum değeri
λ_{min}	: Generatör tipine göre güç katsayısının minimum değeri
I_a	: Kısa devre açma akımı ($Amper$)
S''_k	: Başlangıç kısa devre gücü

S_a	: Simetrik açma gücü
S_{aasm}	: Asimetrik açma gücü
I_{aasm}	: Asimetrik kısa devre açma akımı
U	: Kısa devre sonrası kesici kontakları arasındaki hat gerilimi
σ_m	: Ana baralar üzerinde oluşan bükme gerilmesi (N/m^2)
V_σ	: Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (<i>Katsayı</i>)
V_r	: Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (<i>Katsayı</i>)
β	: Mesnetleme şekli ile ilgili çarpan (<i>Katsayı</i>)
F_m	: Ana baralar arasında meydana gelen kuvvet (N)
L_m	: Ana baraların iki mesnet noktası arasındaki uzaklık (m)
Z_m	: Ana iletkenlerin kesit atalet momenti (m^3)
σ_s	: Tali baralar üzerinde oluşan bükme gerilmesi (N/m^2)
$V_{\sigma s}$: Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (<i>Katsayı</i>)
V_{rs}	: Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (<i>Katsayı</i>)
F_s	: Tali baralar arasında meydana gelen kuvvet (N)
L_s	: Tali baralar arasında kullanılan iki komşu ara destek elemanı arasındaki en büyük mesafe (m)
Z_s	: Tali iletkenlerin kesit atalet momenti (m^3)

Kısaltmalar

RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
STATCOM	: Statik Senkron Kompansatör
SFCL	: Süper İletken Arıza Akım Sınırlayıcı
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
EİE	: Elektrik İşleri Etüt İdaresi
REPA	: Rüzgâr Enerji Potansiyel Atlası
WASP	: Wind Atlas Analysis and Application Program
YSA	: Yapay Sinir Ağları
LM	: Levenberg-Marquardt
UPS	: Uninterruptible Power Supply
	: Kesintisiz Güç Kaynağı
OG	: Orta Gerilim
AG	: Alçak Gerilim
TMŞ	: Termik Manyetik Şalter

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan nüfus, elektrik enerjisine olan ihtiyacımızı her geçen gün daha da artırmaktadır. Elektrik enerjisi üretmek için kullandığımız doğal kaynakların sınırlı olması ve çevreye verdikleri olumsuz etkiler dikkate alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ihtiyacımız artık elzem bir duruma gelmiştir. Son 10 yılda ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretilmesi durumunda devletimiz tarafından verilen teşvikleri artması ve teknolojik imkânların artmasıyla birlikte rüzgâr enerji santralleri, günümüzde ülkemiz için elektrik enerjisi üretiminde büyük bir paya sahip hale gelmiştir. 2019 verilerine göre, rüzgâr enerji santrallerinden üretilen elektrik enerjisi ile ülkemizin toplam elektrik ihtiyacının % 7,40'ı karşılanabilmektedir (Türeb,2019).

Türkiye'nin enerji profili gözden geçirildiğinde, 2019 verilerine göre ülkemizde elektrik üretiminin % 51,03 oranında üretimi ithal edilen enerji kaynaklarına dayalı olarak üretilmektedir (Türeb,2019). Veriler enerji üretiminde dışa bağımlı bir ülke olduğumuzu göstermekte olup söz konusu bu durum enerjiyi yüksek maliyetli kullanmamıza neden olmaktadır. Kısa vadede enerji açığımızın kapanması ve maliyetinin düşürülmesi ancak yerli kaynaklarımızın hayata geçirilmesi ile mümkün olabilir. Bu amaca ulaşmak için yenilenebilir enerji kaynaklarına bağlı olarak elektrik enerjisi üretimini artırmamız ülkemiz için çok büyük önem arz etmektedir. 1980'li yıllarda rüzgâr gücünden elektrik üretim maliyeti 30 cent kWh iken teknolojinin gelişmesi ile günümüzde 6 cent kWh'e kadar düşmüştür. Bu durum her geçen gün ithal enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi ile olan rekabeti ülkemiz açısından pozitif katkı sağlamış ve ülkemizin bütçesine önemli bir katkı sağlayacak duruma gelmiştir (Ağaçbiçer,2010).

Yenilenebilir enerji kaynaklarında aşılması gereken en önemli konular güç kalitesi ve sistem kararlılığı ve sistem güvenilirliğidir ki, enerji ihtiyacının karşılanması bakımından üretilen elektriğin kesintisiz olması istenir. Rüzgâr enerjisi gün içerisinde rejim değişikliği göstermektedir. Örneğin rüzgârın azalması, ani olarak kesilmesi veya artması durumlarında rüzgâra bağlı olarak çalışan elektrik enerji üretiminde kullanılan sistemlerde olumsuz durumların yaşanmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra elektrik üretiminde kullanılan sistemlerin kalitesinin artırılması ise işletme koşullarındaki

değerlere bağlı olmakla birlikte önceden oluşabilecek arızaların zamanında tespit edilip girebilmesi ile mümkün olmaktadır.

Rüzgâr enerjisi santralinde (RES) gerçekleşebilecek olası bir kısa devre arızasının önüne geçmek için sistemde arızalara dayanabilecek, uygun şalt ekipmanları seçilmesi gerekir. Sistemde kullanılan ekipmanların elektriksel bilgileri üretici firma tarafından verilir. Ancak kısa devre hesaplamasında önemli olan nokta, mevcut iletim hatlarının empedansların doğru bir şekilde belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Bu sayede rüzgâr santralinden, elektrik enerjisi iletim hattına kadar olan kısımda hatayı minimize edecek ekipmanların seçimi yapılır. Bu tez çalışmasında rüzgâr enerji santralleri modellenmiş, enerji aktarımı esnasında her kısımda oluşabilecek kısa devre arıza akımı değerinin nasıl belirlenebileceği tespit edilmeye çalışılmıştır. RES'in elektrik sistemine bağlantı şekillerine bağlı olarak kısa devre arıza akımının değerinin nasıl değişeceği yapılan analizler sonucunda gösterilmeye çalışılmıştır.

1.1.Literatür Araştırması

Mingyang, L. ve arkadaşları (2017) yapmış oldukları çalışmada, çift beslemeli endüksiyon jeneratörleri içeren rüzgâr santralleri için yeni bir kısa devre akımı hesaplama yöntemi önermiştir. Yaptıkları çalışmayı PSCAD ile doğruluğunu karşılaştırmışlar ve elektrik enerjisi güvenliği için olumlu bir önerme olduğu gözlemlenmiştir.

R. J. Nelson ve H. Ma (2011) yapmış oldukları çalışmada, rüzgâr türbinlerinin doğru bir şekilde modellenmesi için kısa devre koşullarında senkron ve asenkron makinalarda oluşabilecek arıza durumlarını incelemişlerdir.

M. R. Aghaebrahimi ve arkadaşları (2008) yapmış oldukları çalışmada MATLAB-Simulink kullanarak rüzgâr santrallerindeki indüksiyon jeneratörlerin kısa devre davranışlarını ele almışlardır. Sonuçlar gözden geçirildiğinde rüzgâr hızı değişiminin güç sistemine olan arızalara doğrudan etkisi olduğu görülmüştür. Bu nedenle tasarımcılar rüzgâr hızını kontrol etmenin bir yolunu bulmalı ve sisteme olan arızaların, rüzgâr hızı değişiminden dolayı etkilenmemesi için yeni tasarımlar gerektiğini savunmuşlardır.

Thomas L. ve Lutz H. (2019) yapmış oldukları çalışmada, üç fazlı kısa devre arızası için IEC 60909 standartlarına göre, rüzgâr santrali üzerindeki etkilerini değerlendirmek için yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirilen yaklaşım, her durumda maksimum kısa devre akımının hesaplanması için iyi bir tahmin sunmuştur.

Willi C. ve David T.Johnsen (2006) yapmış oldukları çalışmada, türbin güçlerinin artması ile birlikte rüzgâr çiftliklerinin şebekeye katılım etkilerini incelemişlerdir. Araştırmanın asıl amacı, arzın artması ile birlikte şebeke üzerinde oluşabilecek etkileri incelemek olmuştur.

Milad Gheydi ve arkadaşları (2015) yapmış oldukları çalışmada, rüzgâr türbinlerinin kısa devre analizlerini ETAP programı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analiz sonucunda sistem güvenilirliği için röle koordinasyonu yapılmıştır.

Nick ve arkadaşları (2011) yapmış oldukları çalışmada, rüzgâr santrallerini modelleyerek, en uygun kurulumunu analiz etmişlerdir. Yapılan bu analizde santrallerin kurulduğu noktalardaki rüzgâr potansiyeli dikkate alınmıştır. Sonuç olarak rüzgâr potansiyelinin yüksek olduğu noktalarda, iletim hattı bağlantı problemlerinin, maliyet yönünden olumsuzluk oluşturacağı için santral kurulumunun sadece rüzgâr potansiyeli açısından değerlendirilmesinin yanlış olduğunu savunmuşlardır.

Alegria ve arkadaşları (2007) yapmış oldukları çalışmalarda rüzgâr santrallerinin şebeke entegrasyonunda yaşanan problemleri ele almışlar ve hata sonrası sisteme katkının şebeke için gereklilik arz ettiğinin savunmuşlardır.

Dragomir ve arkadaşları (2009) yapmış oldukları çalışmalarda rüzgâr santrallerinin şebeke entegrasyonunu incelemişler ve bağlantı kriterlerinin kabin (nasel) içerisindeki ekipmanlara göre değişiklik gösterdiğini söylemişlerdir.

Eduard M. ve arkadaşının (2011) yapmış olduğu çalışmada, RES’de farklı kısa devre arıza koşullarında iletim şebekesine olan katkısını incelemişlerdir. Bu bilgiler ışığında kullanılan kesicilerin sınıflandırılması ve sistemin uygun bir şekilde korumasını sağlamışlardır.

Muhammad N. ve arkadaşları (2015) yapmış oldukları çalışmada, artan rüzgâr çiftliği sayısından dolayı tüketicilerin problem yaşamasına neden olduğu belirtmişlerdir. Bu bağlamda kısa devre akımını iyileştirmek için dengeli ve dengesiz hataları içeren statik senkron kompensatör (STATCOM) kullanımını incelemişlerdir. Simülasyon çalışmalarını DIgSILENT yazılımı ile gerçekleştirmişlerdir.

D.D.Li (2008) yapmış olduğu çalışmada RES'lerin hızla artması ile güç sistemlerinde kısa analizi için önemli bir yer tuttuğunu belirtmiştir ve rüzgâr enerji jeneratörlerini ayrıntılı olarak incelemiştir. Kısa devre akımlarının hesabı için sabit akı bağlantı teoremini kullanmış, hesaplamaları simülasyon sonuçları ile karşılaştırmış bu sayede Formüllerin gerçekliğini hesaplamıştır.

M. R. Aghaebrahimi ve arkadaşları (2008) yapmış oldukları çalışmada, rüzgâr hızı değişikliklerini ve rüzgâr çiftliği ve güç sistemi üzerindeki etkisini dikkate alarak bir rüzgâr çiftliğindeki indüksiyon jeneratörlerinin kısa devre davranışını dikkate almaktadır. Çalışmanın yürütülmesinde Matlab-Simulink simülasyonundan yararlanmışlardır.

S.Das ve arkadaşı (2012) yapmış oldukları çalışmada, rüzgâr hızı değişiminin sabit hızlı bir rüzgâr türbininde üzerinde oluşturacağı kısa devre akımı etkisini incelemişlerdir. Rüzgâr hızı değişimi jeneratörün iç voltajını etkilemektedir, jeneratör voltajı maksimum olduğunda bir hata oluşursa bu durumda hata akımı da maksimum olacaktır. Bu nedenle bu çalışmada IEC 60909 standardında hesaplanan koruyucu cihaz ayarlarına göre arıza akımındaki bu değişimin ne kadar önemli olduğu vurgulanmıştır.

Y.Salami ve arkadaşı (2011) yapmış olduğu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları arasında en uygun maliyetli enerjinin, rüzgâr enerjisi olduğu ancak rüzgâr enerji jeneratörlerinin, güç sistemindeki kısa devre kapasitesini artırdığını söylemiştir. Bu sorunu çözmek için arıza akımı sınırlayıcıları kullanılmasını gerektiğini savunmuşlar ve köprü tipi süper iletken arıza akımı sınırlayıcısının (SFCL) şebekenin dinamik performansına etkisini incelemişlerdir. PSCAD yazılımı ile yaptıkları analizde SFCL kullanımının şebekenin dinamik performansını artırdığını gözlemlemişlerdir.

1.2. Tezin Amacı

2022 yılında seri üretime geçilmesi hedeflenen % 100 elektrikle çalışan yerli otomobillerin yollara çıkması ile birlikte Türkiye'nin elektrik enerjisine olan ihtiyacı daha da artacaktır. Doğal enerji kaynaklarımızın sınırlı olması ve bunlardan elektrik üretiminde ortaya çıkan sera gazlarının çevreye verdikleri zararlar dikkate alındığında ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarından, elektrik üretimini son yıllarda hızlandırmış ve kesintisiz enerjiye olan ihtiyacımızın ve öneminin daha da artmasına sebep olmuştur. Bu bağlamda her yıl rüzgâr santrallerinin elektrik üretimine sağladığı katkıların artması ile birlikte arz güvenliği, enerji kalitesi ve kararlılık gibi problemleri de beraberinde getirecektir.

Bu tez çalışmasının amacı rüzgâr santrallerinin DIgSILENT PowerFactory programı ile modellenmesi ve oluşabilecek kısa devre arıza akımlarına çözüm önerileri sunmaktır. Bazı dönemlerde rüzgâr hızının aşırı yükselmesi ve türbindeki frenleme sistemlerinin çalışmaması sonucunda elektriksiz elemanlar zarar görebilmektedir. Bu durum olası bir kısa devre arızası ile sonuçlanmakta ve santralin devre dışı kalmasına sebebiyet vermektedir. Bu bağlamda çalışmanın bir diğer amacı olan rüzgâr hızı tahmini Matlab programı kullanılarak gerçekleştirilecek ve rüzgâr hızının pik noktasına ulaşabileceği günler önceden tespit edilmeye çalışılacaktır.

1.3. Tezin Yapısı

Birinci bölümde genel olarak rüzgâr santralleri hakkında bilgi verilmiş ve kaynak taraması gerçekleştirilmiştir.

İkinci bölümde rüzgâr enerjisinin oluşumundan ve rüzgâr enerjisinin ülkemizdeki potansiyelinden bahsedilmiştir. Ülkemizin rüzgâr atlası incelenmiş ve gelecekteki rüzgâr enerji hedefleri hakkında bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde rüzgâr türbinlerinin genel yapısı sunulmuştur. Türbin elemanları ve türbin tipleri incelenmiş her bir elemanın rüzgâr gücüne olan etkisi irdelenmiştir.

Dördüncü bölümde rüzgâr hızının tahmini Matlab programı ile gerçekleştirilmiştir. Böylece kurulacak olan santralin bölgedeki rüzgâr hızı bulunmuş ve aşırı rüzgâr hızından kaynaklanabilecek kısa devre arızaları hakkında bilgi verilmiştir.

Beşinci bölümde kısa devre hakkında teorik bilgiler sunulmuştur, kısa devre karakteristiği ve çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

Altıncı bölümde Digsilent Power Factory programı ile yedi adet türbine sahip rüzgâr santralinin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modellenen santralinin yük akış ve kısa devre analizi yapılmış ve farklı senaryolar üzerinde yorumlanmıştır. Elde edilen kısa devre akımı sonuçları için çözüm önerisi geliştirilmiştir.



2. RÜZGÂR ENERJİSİ

2.1.Rüzgâr Enerjisi Meteorolojisi

Güneşin yer yüzeyini ısıtması ve sonrasında yer yüzeyinin soğumasından ortaya çıkan hava hareketlerine rüzgâr denir. Ana kaynağı güneş olan rüzgâr, yeryüzüne ulaşan güneş enerjisinin yalnızca % 2'si kadardır (Durak ve Özer, 2008).

Rüzgâr oluşumunda coğrafi koşullar çok büyük önem arz etmektedir. Dağlar, vadiler ve denizler rüzgâr oluşumunu tetikleyen faktörlerdir. Bu doğal yapıların tetikleme sebebi şu elemanlara bağlıdır; pürüzlülük, yüzey şekilleri ve perdeleme gibi etkilerinin bulunmasındandır. Bu elemanlar, doğal yapılarda bulunan ve rüzgâr oluşumunu etkileyen ek faktörlerdir. Bu bağlamda atmosferde oluşan hava belirli kriterlere göre hareket etmekte olup Tablo 2.1'de detaylandırılmıştır (Durak ve Özer, 2008).

Rüzgâr hareketlerinin en büyüğü genel sirkülasyon hareketleridir. Zaman ve boyut olarak geniş aralıklara yayılabilmekte ve küresel rüzgârlar olarak sınıflandırılmaktadır. Terminolojide sinoptik rüzgârlar olarak adlandırılan sistemler günler ve haftalar arasında değişebilmekte ve küresel rüzgâr sınıfında yer almaktadır. Rüzgâr elektrik enerjisinde üretim için küresel rüzgârlardan ziyade yerel rüzgârlar önemlidir. Mezo ve Mikro ölçekte günler ve dakikalar arasında değişen maksimum 100 km'ye kadar etkili olan meltem, tornado gibi rüzgâr çeşitleri yerel rüzgârlar sınıfındadır (Durak ve Özer, 2008).

Tablo 2.1. Atmosferik hareketlerin çeşitleri (Durak M., Özer S., 2008).

ADI	ZAMAN ÖLÇEĞİ	UZUNLUK	ÖRNEK
Genel Sirkulasyon	Hafta-Yıl	1000-40000 km	Ticaret rüzgârları, jet akımı
Sinoptik Ölçek	Gün-Hafta	100-5000 km	Basınç sistemleri, tayfun
Mezo Ölçek	Dakika-Gün	1-100 km	Meltem, raj, Tornado
Mikro Ölçek	Saniye-Dakika	<1 km	Türbülans

2.2. Türkiye’de Rüzgâr Enerji Potansiyeli

Ülkemizin rüzgâr potansiyeli yılda 400 milyar kWh, teknik kayıplar dâhil edildiğinde ise potansiyelin 120 milyar kWh olduğu tahmin edilmektedir ve 2019 verilerine göre ülkemizin yıllık enerji tüketimi 290 milyar kWh’dir (Tavman ve ark., 2001).

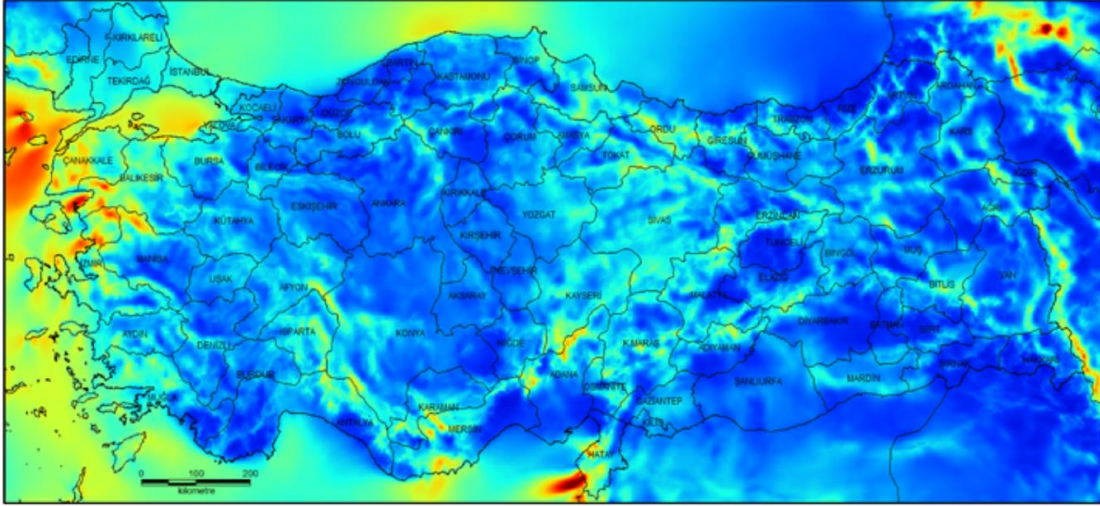
2020 Ocak sonu verilerine göre ülkemizin 91,342 GW santral kurulu gücü mevcuttur (Teiaş, 2020). Ülkemizin karada rüzgâr elektrik enerjisi potansiyeli ise 48 GW olarak belirlenmiştir (Türeb, 2019). Bu durumda rüzgâr enerji tek başına ülkemizin kurulu santral gücünün % 52 oranında karşılayabilecek potansiyele sahiptir. Rüzgâr enerjisi değişken karakterli olması sebebi ile elektrik enerjisi üretiminde rüzgâr enerjisi dayalı olarak bu oranın karşılaması uygun değildir. RES’ler sadece enerji kaynaklarımızı çeşitlendirerek santral arızalarından oluşabilecek elektrik kesintilerini azaltmak, doğal ekosistemi korumak ve dışa bağımlılığı en aza indirmek için tercih edilmedi. Ancak teknolojinin de gelişmesi ile birlikte bu durum değişmiş, ileri düzeyde rüzgâr hızı tahminleri ve arıza akımı oluşumlarının önüne geçilerek, şebekeye daha fazla rüzgâra dayalı üretilen elektrik enerjisinin verilmesi imkânının önü açılmıştır. Bu bağlamda yatırımların hızlanması ve rüzgâr enerjisinden daha fazla yararlanarak elektrik üretilmesi için rüzgâr enerjisinden faydalanılacak bölgelerin rüzgâr enerjisi potansiyel atlasının çok iyi bir şekilde hazırlanması ve önceden tahmin edilmesi rüzgâra dayalı elektrik üreten sistemlerin güvenilirliği için önemlidir ve gereklidir.

2.3.Türkiye'nin Rüzgâr Atlası

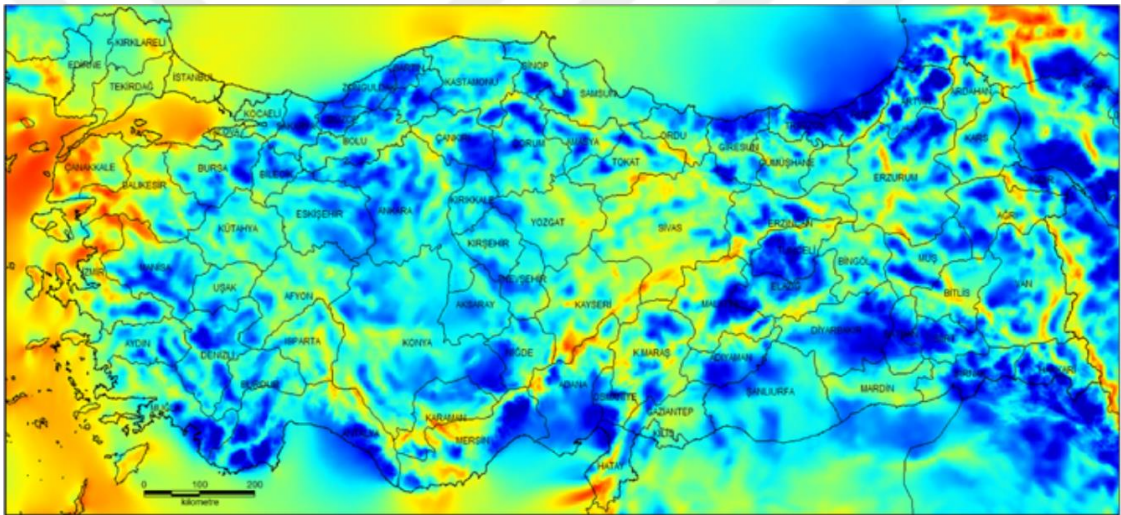
Avrupa'da rüzgâr atlası çalışmaları tamamlanmış olmasına rağmen, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) konusunda gelişmekte olan ülkelerde, rüzgâr atlası çalışmaları devam etmektedir. Elektrik İşleri Etüt İdaresine (EİE) göre, Dünya'da toplam rüzgâr enerji potansiyeli 240.000 GW iken ülkemizde 48.000 GW'dır (Enerji Atlası, 2019).

Dünya'da rüzgâr enerji potansiyelinin yaklaşık % 20'si ülkemizde mevcuttur. 2020 Ocak sonu verilerine göre Dünya'daki potansiyelin % 3'ünü, ülkemizdeki rüzgâr potansiyelin ise yalnızca % 15,4'lük kısmını kullanmaktayız (Enerji Atlası,2019). Bu bağlamda Türkiye'de rüzgâr enerjisi çalışmalarına hız verilmesi gerekir. Rüzgâr atlası oluşturulmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Hesaplamalar için Danimarka Meteoroloji Teşkilatı'nın Riso, Avrupa Rüzgâr Atlasının hazırlanmasında kullanılan Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP) gibi programlar tercih edilmiştir. Türkiye'de 45 adet istasyon baz alınarak yapılan çalışmalarda Türkiye Rüzgâr Atlası oluşturulmuştur. Rüzgâr enerji potansiyel atlaslarına (REPA) göre, 200 x 200 m²'lik bir alanda rüzgâr bilgilerine ulaşmamıza imkan vermektedir. Yatırımcılar santral kurulumunda önce REPA'dan faydalanarak gerekli planlamaları gerçekleştirebilmektedir.

Coğrafi olarak, Türkiye'nin hem 50m'de hem de 100m'deki ölçümlerinde rüzgâr hızı ve güç yoğunluğu en yüksek bölge Marmara bölgesi ve Ege bölgesi olarak Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de görülmektedir. Bu bölgelere haritada sarı ve kırmızı renkler ile ifade edilmiş ve yaklaşık rüzgâr hızları 7 m/s'nin üzerindedir. Bu bölgenin rüzgâr enerjisine uygun olmasının nedeni, denize yakın olmasından kaynaklı sürekli ve kuvvetli rüzgârların varlığıdır (Türkeş,2013). REPA'dan alınan veriler doğrultusunda, iyi ve sıra dışı rüzgâr sınıfına giren sarı ve kırmızı renk ile belirtilmiş bölgelerde rüzgâr gücünden üretililecek elektrik enerjisi 47.849,44 (yaklaşık 48 GW) olarak hesaplanmıştır (Eie,2019; Yegm,2019).

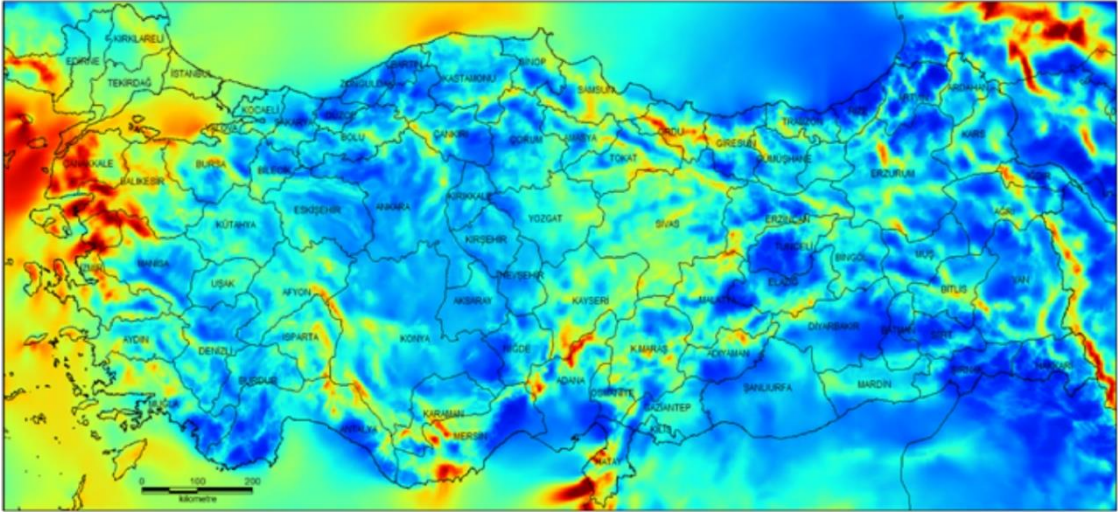


Şekil 2.1. Türkiye rüzgâr atlası güç yoğunluğu 50 m'deki verileri (Repa, 2020).

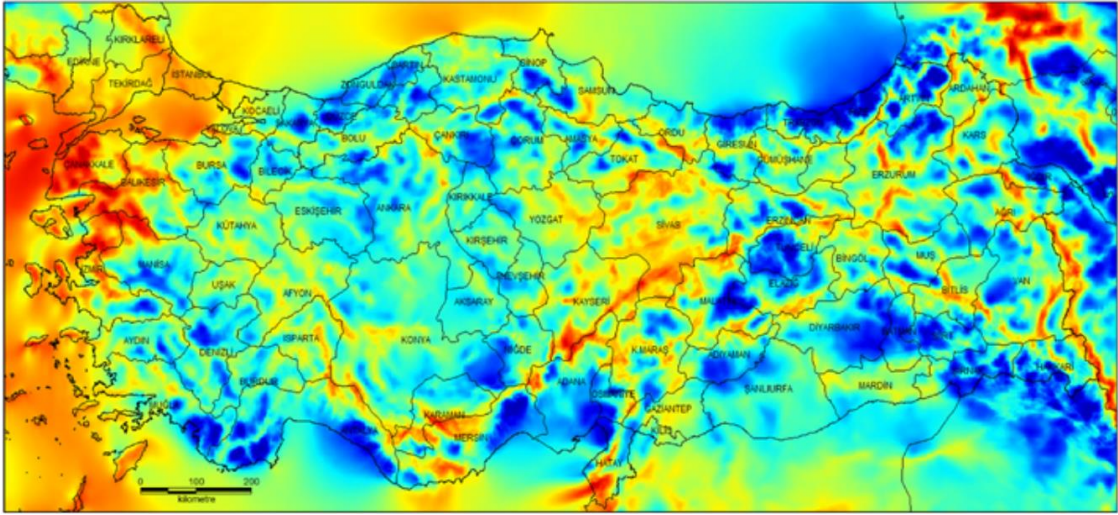


Şekil 2.2. Türkiye rüzgâr atlası rüzgâr hızı 50 m'deki verileri (Repa, 2020).

Şekil 2.3 ve 2.4'te ülkemizin 100 m'deki güç yoğunluğu ve rüzgâr hızı gösterilmektedir. Kırmızı ile gösterilen bölgelerde güç yoğunluğu için 900 W/m^2 iken rüzgâr hızı için ise $9,5 \text{ m/s}$ 'dir. Bu durum Dünya ortalamasının çok üzerinde bir rüzgâr enerji potansiyeli olduğunu göstermektedir. Şekil 2.2 ve Şekil 2.4 incelendiğinde rüzgâr hızı verilerinde koyu mavi ile gösterilen bölgelerde rüzgâr enerjisi için uygun olmadığı tespit edilmiştir.



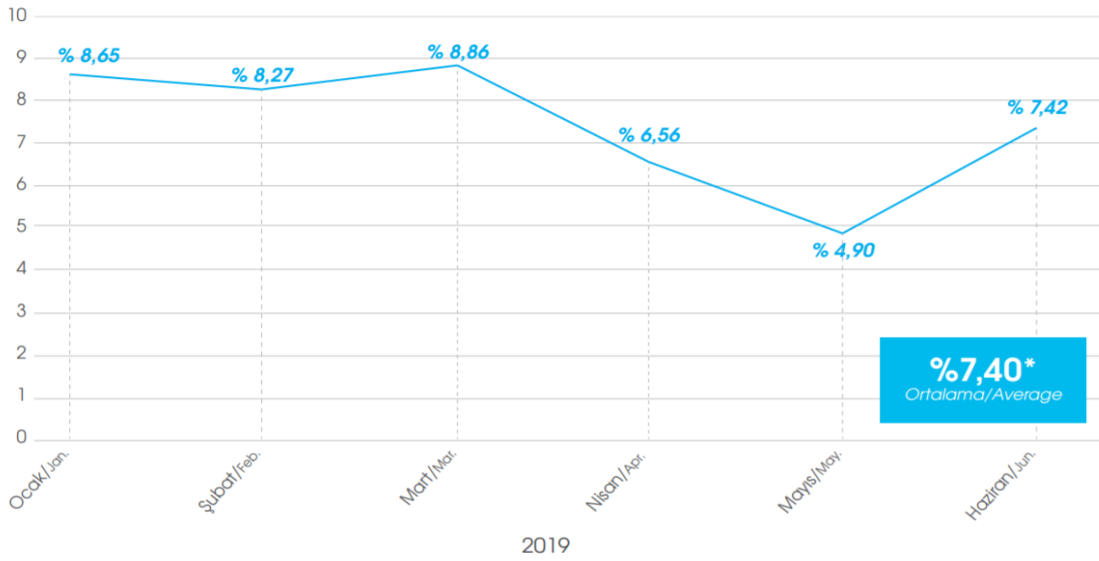
Şekil 2.3. Türkiye rüzgâr atlası güç yoğunluğu 100 m'deki verileri (Repa, 2020).



Şekil 2.4. Türkiye rüzgâr atlası rüzgâr hızı 100 m'deki verileri (Repa, 2020).

2.4.RES'lerin Kurulu Güç İçerisindeki Payı

Ülkemizde rüzgâr enerjisinin, elektrik üretimine katkısı 2019 yılı ilk 6 ayı için % 7,40 oranındadır. 2019 yılı bu oran Şekil 2.5'te verilmiştir. 2019 yılı başından Temmuz ayına kadar olan dönemde toplam elektrik üretimine rüzgâr enerji santrallerinin katkısı % 4,90 ile % 8,86 arasında değişiklik göstermiştir. 2023 yılında ülkemizin toplam kurulu gücü 120 GW rüzgâr enerjisi kurulu gücü ise 20 GW olarak tahmin edilmektedir. Bu durumda rüzgâr enerjisinin elektrik üretimine katkısını % 16 civarına getirecektir.



Şekil 2.5. Türkiye’de 2019 yılı için RES’lerin kurulu gücü (Türeb,2019).

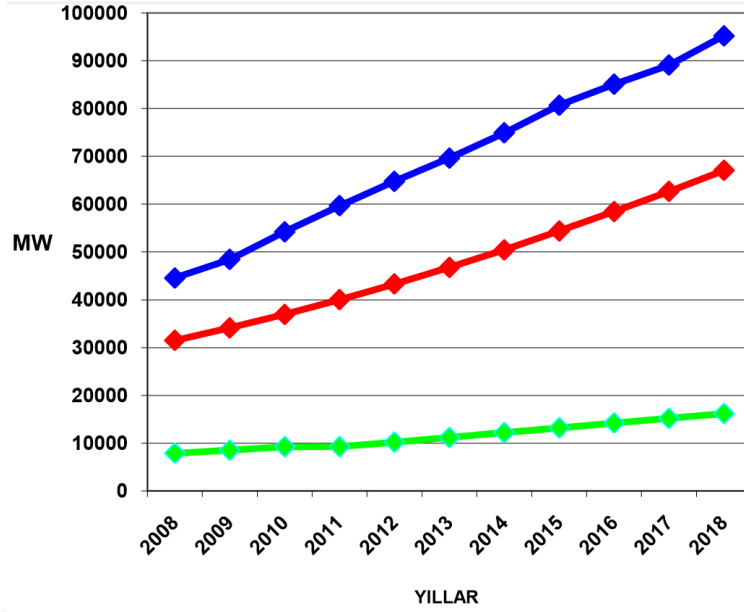
2.5. Ülkemizin 2023 Rüzgâr Enerjisi Hedefleri

Son 10 yılda hızla artan elektrik enerji talebine karşılık, devlet teşvikleri de hız kazanmıştır. Son 10 yıl değerlendirildiğinde % 2000 gibi çok yüksek bir artış yaşanmış ve 2023 hedeflerine hızla yaklaşılmıştır.



Şekil 2.6. Ülkemizde yıllara göre rüzgâr enerjisi gelişimi (Türeb,2019).

Şekil 2.6’da görüldüğü üzere ülkemizin mevcut rüzgâr kurulu gücü 7.615 MW’dır. İlerleyen yıllarda puant talep ve bağlanabilir RES kapasitesine göre hedefler belirlenmektedir.



Şekil 2.7.Yıllara göre kurulu güç, puant talep ve bağlanabilir RES kapasitesi (Gülden S.2014).

Yukarıdaki Şekil 2.7’de görüldüğü üzere, mavi eğri kurulu gücü, kırmızı eğri puant talep ve yeşil eğri yıllara göre bağlanabilecek RES kapasitesini göstermektedir. 2023 yılında YEK’ten enerji elde edilmesi hedeflenirken, RES’ler bu kapsamda ayrı bir öneme sahiptir. Bu bağlamda ülkemizde son 10 yıldan bugüne kadar hızla gelişen RES’ler bundan sonrada yatırımlar ile hızla gelişmeye devam edecek ve 2023 hedefi olan 20 GW kapasiteye ulaşacaktır.

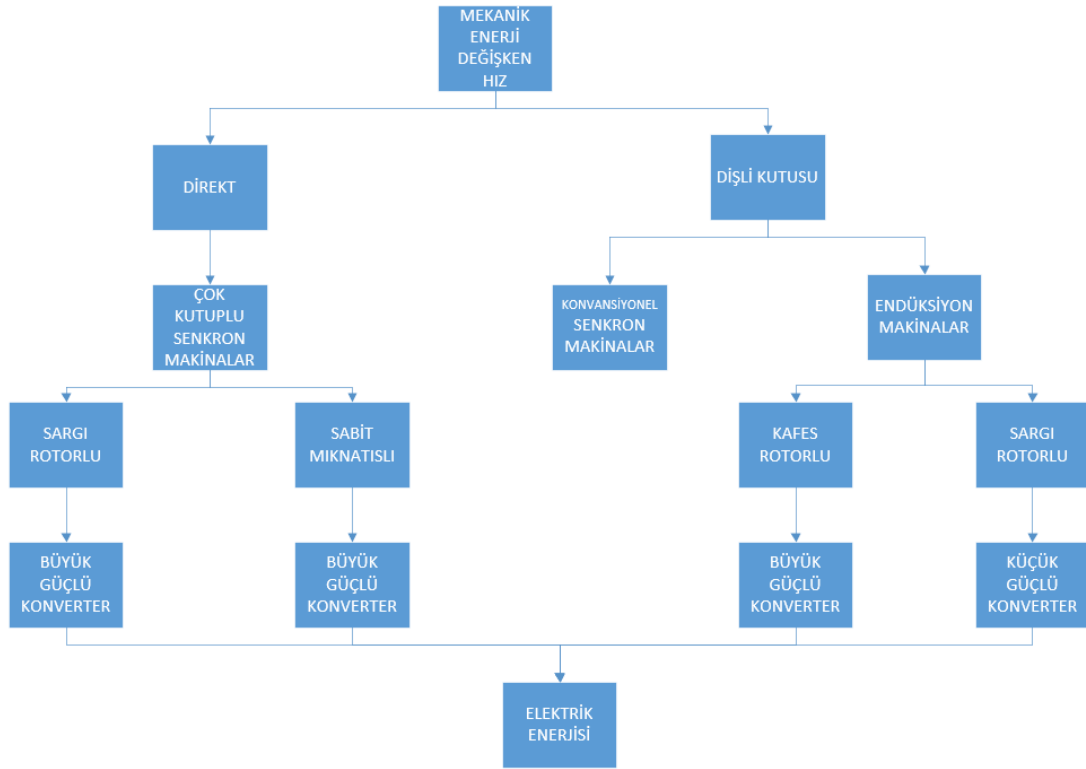
3. RÜZGÂR TÜRBİNLERİ

Rüzgâr türbinleri; rüzgâr enerjisini mekanik enerjiye, mekanik enerjiyi de elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. Türbinler nasel (kabin) içerisindeki elemanlar ile elektrik enerjisindeki gerilim ve frekans gibi ayarlamaları yaparak istenilen uygun düzeye getirirler (Hansen ve ark., 2001).

Şekil 3.1’de rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüşüm aşamaları verilmiştir. Türbinde konvansiyonel senkron makina veya endüksiyon makina kullanılıyorsa mekanik enerji önce dişli kutusunda 1:40 ile 1:80 arasındaki bir oranda devir hareketi hızlandırılır ve mekanik enerji generatöre aktarılır. Çok kutuplu senkron generatörlerde ise mekanik enerji direkt olarak generatöre aktarılır.

Çok kutuplu senkron generatörler sargı rotorlu ve sabit mıknatıslı olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bu iki tipte de dişli kutusuna ihtiyaç duyulmaksızın kanatlara direkt bağlanabilirler. Ancak rotoru sargılı senkron generatörlerin kontrol konverterlerinin, nominal gücün üzerinde bir değerde seçilmesi, sabit mıknatıslı senkron generatörün ise sıcaklık değişimleri ile manyetiğinin kolay bozulması maliyet açısından olumsuz sonuçlar doğurduğu için genellikle küçük türbin güçlerinde tercih edilirler (Baroudi ve ark., 2006).

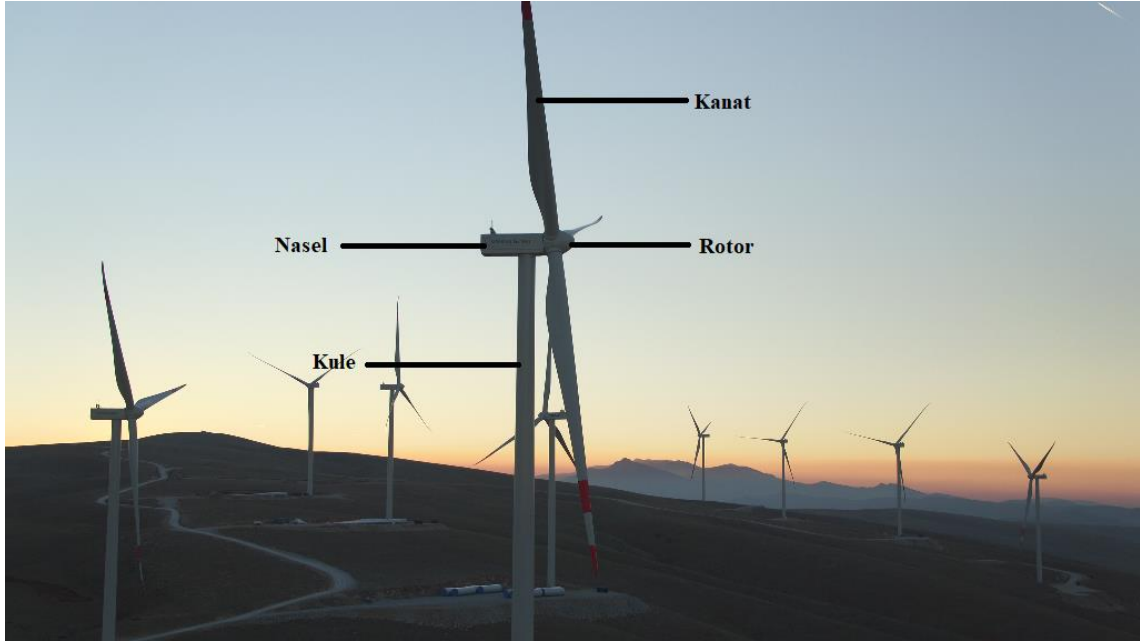
Endüksiyon generatörler ise sincap kafesli ve sargı rotorlu olmak üzere ikiye ayrılır. Her iki tipte de senkron generatörlere göre maliyet açısından daha uygun olması sebebi ile büyük güçlü türbinlerde tercih sebebidir (Patel, 2006). Generatörde üretilen elektrik enerjisi konvertör aracılığı ile şebekeye bağlanır.



Şekil 3.1. Rüzgâr türbinlerinde mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü (Hansen ve ark., 2001).

3.1. Türbin Elemanlar

Rüzgâr türbinlerinin güçlerine göre türbin elemanları değişiklik gösterir. Bu bölümde kurulmak istenin bir rüzgâr türbininin elemanları incelenecektir. Rüzgâr türbininin en temel bileşenleri Şekil 3.2’de gösterildiği gibi rüzgâr türbinleri kule, kanat, nasel ve rotor olmak üzere dört ana başlıkta incelenmiştir (Yeter, 2011).



Şekil 3.2.Rüzgâr türbini bileşenleri

3.1.1.Kule

Kuleler kanat ve nasel (kabin) bölümlerini taşıyan genellikle çelik veya beton yapılarıdır. Türbinlerin kara üstü (onshore) veya deniz üstü (offshore) olmalarına göre kule malzemeleri ve yapısı farklılık gösterir. Türbin güçleri artırılması, kule boylarının yüksekliği ile doğrudan bağlantılıdır ancak belirli bir yükseklikten sonra rüzgâr hızındaki değişimler azalmaktadır. Bu bağlamda türbin gücü ve maliyetler dikkate alınarak optimum yükseklik belirlenmelidir (Taşcıkaraoğlu, 2008).

3.1.1.1.Kule'nin rüzgâr gücüne etkisi

Rüzgâr türbinlerinde gücü etkileyen en önemli parametre rüzgâr hızıdır. Rüzgâr hızı ise kule yüksekliği ile doğru orantılı olarak artar. Her 1 metrelik kule yüksekliği artışında, rüzgâr hızında % 1 oranında bir artış görülür. Ancak 100 metreden sonra rüzgâr hızındaki değişimler bu oranın altına düşmektedir. Kurulması planlanan rüzgâr türbininin yüksekliğinde yapılacak rüzgâr ölçümleri maliyetleri artmasına sebep olur. Bu yüzden genellikle 10 metre yüksekliğinde rüzgâr ölçümleri alınarak istenilen yüksekliğe taşınır (Masters, 2004; Özdamar,1999).

Ölçüm alınan yüksekliklerdeki rüzgâr hızlarının istenilen yüksekliğe taşınması Hellman katsayısı ile gerçekleştirilir. Türbinde elde edilmesi beklenen güç hesabında, birim rüzgâr hızı aralığında seçimi ve Hellmann katsayıları doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Hellman katsayılarının belirlenmesi ölçüm yerinin özelliklerine bağlıdır. Bu özelliklere bağlı olarak Hellmann katsayısının belirlenmesi Tablo 3.1’de belirtilmiştir (Hapel,1990; Özdamar,1999),

Tablo 3.1. Ölçüm yerinin özelliklerine bağlı olan Hellman katsayısının değişimi (Hapel, 1990).

Ölçüm Yerinin Tanımı	μ (Hellmann Katsayısı)
Açık deniz,kıyı şeridi	0,14
Açık alan ve tarlalar	0,18
Ağaçlık alan ve şehir	0,28
Yüksek binalı kentsel alan	0,4

Hellmann katsayısı yardımı ile belirli bir yükseklikte ölçülen rüzgâr hızı, aşağıdaki Formül kullanılarak başka yüksekliğe aktarılabilir. Hellmann katsayısı en genel ifadesi ile Formül 3.1’de verilmiştir.

$$V = V_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\mu \quad (3.1)$$

Formül 3.1’de ;

V : hesaplanmak istenen yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s),

V_0 : ölçüm sonuçları bilinen yükseklikteki rüzgâr hızı (m/s),

h : hesaplanmak istenen noktanın yerden yüksekliği (m),

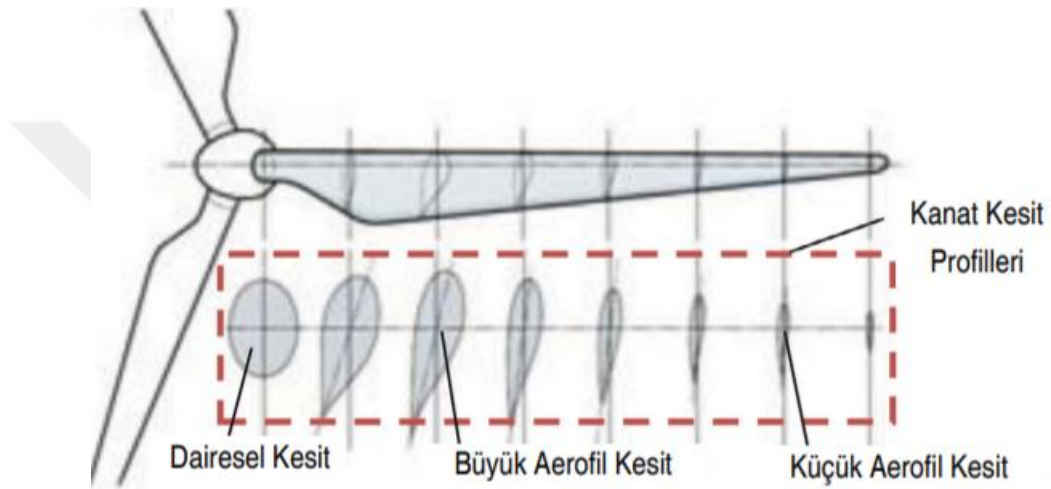
h_0 : ölçüm sonuçları bilinen noktanın yerden yüksekliği (m),

μ : Hellmann katsayısı olarak ifade edilmiştir.

İstenilen yükseklikteki rüzgâr hızları Formül 3.1 yardımı ile bulunduktan sonra, kule yüksekliği ile rüzgâr hızları karşılaştırılarak, optimum maliyet ile kule yüksekliği seçimi yapılır.

3.1.2.Kanat

Rüzgâr türbininde kanatlar, kinetik enerjinin mekanik enerjiye dönüşmesinde rol olan bileşendir. Türbin kanatları kök, orta ve uç bölge olmak üzere üç kısımdan meydana gelir (Şekil 3.3). Tıpkı bir uçak kanadı gibi kamburluğu olan türbin kanatları, kanadın alt ve üst yüzeyi arasında basınç farkını ortaya çıkartarak, kanadın alt kısmından üst kısmına doğru kaldırma kuvveti oluşmasını sağlarlar. Bu kuvvet sayesinde türbinlerde enerji üretimi gerçekleştirilir (Kaya ve Koç, 2015).



Şekil 3.3.Kanadı oluşturan kesitler (Kaya ve Koç, 2015).

3.1.2.1.Türbin kanatlarının rüzgâr gücüne etkisi

Rüzgârın oluşması havanın yoğunluğuna bağlıdır bu yüzden rüzgâr gücü havanın yoğunluğuna göre değişkenlik gösterir. En genel ifade ile havanın yoğunluğu Formül 3.2'de verilmiştir.

$$\rho = \frac{P \times m}{n \times R \times T} \quad (3.2)$$

Formül 3.2'de;

ρ : havanın yoğunluğunu (kg/m),

P : basınç (N/m^2),

m : kütle (kg),

n : Avagadro sayısı (mol),

R : ideal gaz sabiti ($J.mol^{-1}.K$),

T : sıcaklık ($^{\circ}K$) olarak ifade edilmiştir.

Formül 3.2'de görüldüğü gibi basınç ile hava yoğunluğu doğru orantılıdır. Yani deniz seviyesinde yukarılara çıkıldıkça azalan basınç doğrudan hava yoğunluğunun düşmesine sebep olacaktır.

Ancak havanın yoğunluğu en ideal koşullarda olsa bile güç üretimi türbin kanatlarının taradığı alan ile doğru orantılıdır. Taranan alan türbin çapının karesi ile doğru orantılı olarak değişir. En genel ifade ile türbin kanatlarının taradığı alan Formül 3.3'te verilmiştir.

$$A = \frac{\pi}{4} \times R^2 \quad (3.3)$$

Formül 3.3'te;

A : kanatların süpürme alanını (m^2),

R : kanat çapı (m) olarak ifade edilmiştir.

Türbine akan toplam rüzgâr enerjisi, oldukça basit rüzgâr enerjisi Formülü ile tanımlanabilir. Türbin kanatlarına giren güç, rüzgâr hızının küpü, hava yoğunluğunun ve türbin kanatları süpürme alanının bir fonksiyonudur. Rüzgâr enerjisi Formülünün basit bir versiyonu Formül 3.4'te gösterilmiştir.

$$P_{in} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \quad (3.4)$$

Formül 3.4'te;

P_{in} : rüzgâr gücünü ($Watt$)

ρ : hava yoğunluğunu (kg/m),

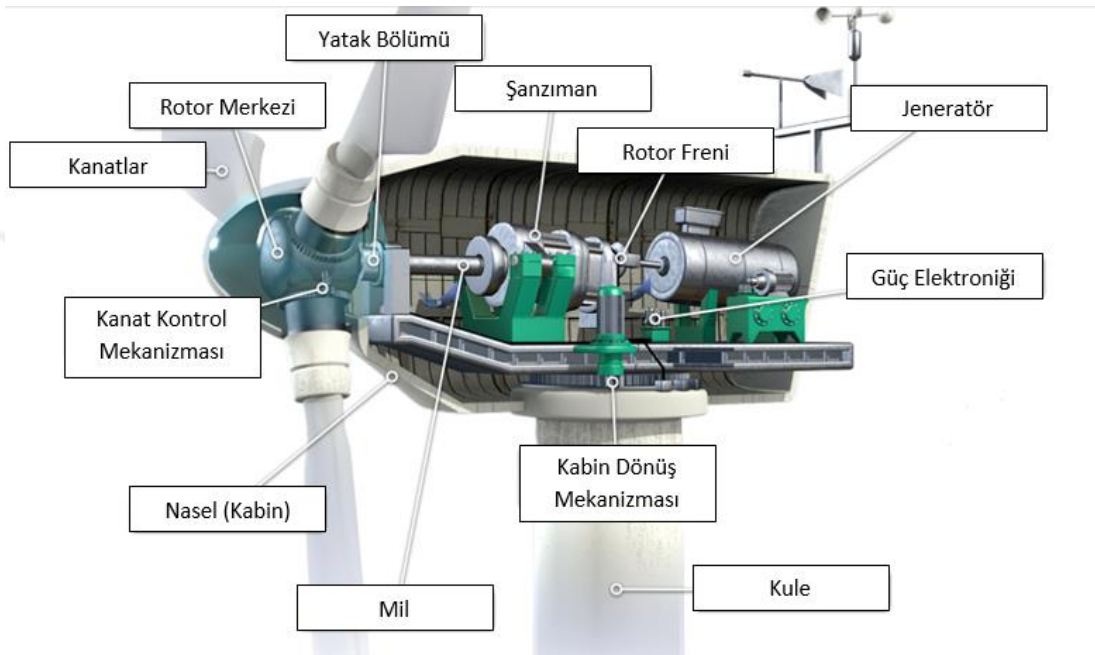
A : kanatların süpürme alanını (m^2),

V : rüzgâr hızını (m/s) olarak ifade edilmiştir.

Bu durumda kanatlar rüzgâr gücüne doğrudan kanatların süpürme alanı ile doğru orantılı olarak etki etmektedir.

3.1.3.Nasel

Türbinde elektriksel elemanların bulunduğu çelik bir yapı ile korunan kabin bölümü nasel olarak adlandırılır (Turek,2013). Şekil 3.4'te nasel bölümüne yer verilmiş ve rüzgâr türbini elemanları ve yerleri incelenmiştir.



Şekil 3.4.Rüzgâr türbini elemanları ve yerleri (Yeter,2011).

- **Generatör**

Endüstriyel anlamda en sık kullanılan asenkron generatörler, çoğunlukla rüzgâr türbinlerinde de tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra türbinlerde DC generatörler ve senkron generatörlere de yer verilmektedir.

- **Doğru Akım Generatörleri**

DC çıkış elde etmek istenildiğinde ve küçük güçlü türbin kullanımlarında tercih edilmektedir. DC generatörleri uyarmak için çıkış gücünün % 5'i kadar güce ihtiyaç duyulur. Bu durum yüksek güçlerde çok tehlikeli bir durumu sebep olabilir. Hız kontrollerinin kolay olması DC generatörleri avantajlı yapsa da bakım maliyetleri yüksektir (Rashid, 2001).

- **Senkron Generatörler**

Rüzgâr türbinlerinin yaygınlaşmaya başlamasından bu yana, üç fazlı senkron makinelerin kullanılması için önemli çabalar sarf edilmiştir. Senkron generatörler, enerji üretimi için yüksek performans sağlamasından ve uzun süreler yaygın olarak kullanılmasından dolayı kendini kanıtlanmış bir makine teknolojisidir. Genellikle bu generatörler sabit mıknatıslı senkron generatörler olarak bilinir ve maliyetlerinden dolayı düşük güçlü rüzgâr türbinlerinde sıklıkla kullanılır (Baroudi ve ark., 2006).

- **Asenkron Generatörler**

Geleneksel enerji üretimlerinde senkron makineler kullanırken, modern rüzgâr enerjisi sistemleri uygulamalarında endüksiyon makinelerini yaygın olarak kullanır. Asenkron generatörlerin en büyük avantajı maliyeti ve bakım masraflarıdır. Uyarma devresine ihtiyaç duymayan asenkron motorlar bir diğer tercih sebebidir (Patel, 2006).

- **Yön Saptırma (Yaw) Mekanizması**

Rüzgâr enerjisinden maksimum düzeyde yararlanabilmek için türbinlerin rüzgârı dik bir şekilde alması gereklidir. Türbin üzerindeki sensörler sayesinde rüzgâr yönü tespit edilerek gövde otomatik olarak hareket etmesi sağlanır. Bu sayede hem güç kontrolü rahatlık ile yapılabilir hem de daha fazla güç elde edilebilir.

- **Güç Elektroniği Elemanları**

Rüzgâr türbinlerinde üretilen DC gerilim AC gerilime güç elektroniği elemanları ile dönüştürülür. Aynı zamanda güç elektroniği elemanları AC gerilimde istenilen gerilim, frekans ve genlik değerleri uygun seviyeye getirilerek enerjinin şebekeye bağlantısı uygun hale getirilir.

- **Anemometre**

Anemometreler, rüzgâr türbinlerinde yaw mekanizmasının çalışması için önemli elemanlardan birisidir. Rüzgâr hızını ölçen anemometreler aldığı verilere göre türbinin gövde yönünü ayarlamasını sağlar. Aşırı artan rüzgâr hızı durumunda türbinin zarar görmemesi için kilitlenmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda rüzgâr hızı anlık olarak ölçen anemometreler kaliteli elektrik enerjisi üretmemize yardımcı olur.

- **Frenleme Düzeni**

Frenleme sistemi mekanik ve aerodinamik olmak üzere iki farklı şekilde yapılmaktadır. Aerodinamik frenleme rotor kanatlarının 90 derecelik dönüş yapması ile gerçekleşir. Mekanik frenleme ise elektriksel hataların meydana gelmemesi için aerodinamik frenlemeye yardımcı olarak kontrollü frenleme görevini görür.

- **Dişli Kutusu**

Türbin rotorlarının dönmesi ile oluşan mekanik enerji, generatörlere dişli kutusu vasıtasıyla aktarılır. Generatörlerde elektrik üretilmesi için dişli kutusunda önce devir sayısı artırılmalıdır. Genellikle 1:40 ila 1;80 arasında değişen oranlarda yüksek devir sayıları elde edilir ve generatör tarafında elektrik enerjisi üretebilecek seviyeye getirilir.

3.1.4.1. Elektriksel elemanların rüzgâr gücüne etkisi

Rüzgâr enerjisi, elektrik enerjisine dönüşüm süreci; aerodinamik, mekanik ve elektrik olarak üç aşamadan geçer. Her adımda bir miktar enerji kaybı oluşur ve nihai elektrik gücü başlangıçtaki rüzgâr gücünden daha azdır. Bu kayıpların belirli bir minimum sınırı vardır. Mükemmel mühendislikte yapılmış olsa Betz Teorimi'ne göre gelen rüzgâr gücünün yalnızca % 59,3'ü mekanik shaft gücüne dönüştürülür. Uygulamada ise bu oran daha düşüktür (Emeksiz, 2014).

Güç katsayısı (C_p) terimi, türbinlerde güç sisteminin verimliliğini belirlemek için kullanılır. Formül 3.5'te görüldüğü üzere rüzgâr türbini tarafından üretilen elektrik gücünün, türbindeki rüzgâr gücüne oranlanması ile bulunur.

$$C_p = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{\text{Üretilen Elektriksel Güç}}{\text{Türbine Giren Rüzgar Gücü}} \quad (3.5)$$

Formül 3.5'te ;

$P_{\text{giriş}}$: türbin giriş gücü (*Watt*),

$P_{\text{çıkış}}$: türbin çıkış gücü (*Watt*),

C_p : türbin güç katsayısı olarak ifade edilmiştir.

C_p katsayısı rüzgâr hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu durumda C_p 'yi belirli bir rüzgâr hızında bilirsek $P_{giriş}$ ile çarpabiliriz. Bu da bize türbin sistemi tarafından üretilen elektrik gücünün, istenilen rüzgâr hızındaki çıkış gücünü verecektir.

Güç katsayısı, türbinde oluşan tüm kayıpların çarpımı ile elde edilir. Türbinde oluşan kayıplar Formül 3.6'da verilmiştir.

$$C_p = \eta_t \times \eta_m \times \eta_e \quad (3.6)$$

Formül 3.6'da ;

η_t : türbin aerodinamik verimlilik,

η_m : mekanik verimlilik,

η_e : elektriksel verimlilik olarak ifade edilmiştir.

Türbinin güç katsayısı belirlendikten sonra elektriksel gücünü Formül 3.7'de belirtildiği gibi giriş gücü ile çarpılarak hesaplanabilir.

$$P_{çıkış} = C_p \times P_{giriş} \quad (3.7)$$

3.1.4.Rotor

Rüzgâr türbinlerinde rotor dört temel bileşenden meydana gelir bunlar; kanatlar, kanat kökü, göbek ve kanat açısı ayarlama sistemidir.

Kanatlar; kompozit teknolojisi ile üretilen cam ile güçlendirilmiş yapılardır. Rotor kanatları bağlı olduğu mili döndürerek dişliler yardımıyla, hareketini jeneratöre aktarır. Bu şekilde rüzgâr enerjisi, kinetik enerjiden mekanik enerjiye, jeneratör sayesinde de elektrik enerjisine dönüşür. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte rotor kanatları aerodinamik açıdan türbin verimliliğine ciddi katkılarda bulunmaktadır (Karabağ, 2011).

Kanat kökü; kanatların yüksek hızlarda aerodinamik yapısını bozmayacak şekilde göbeğe bağlamasını sağlayan çelik yapılardır.

Kanat açısı sistemi; rüzgâr hızından optimum düzeyde faydalanabilmek için kanatların açısı hidrolik bir sistem ile hareketini sağlayan sistemdir.

Göbek; kanatların ve kanat köklerinin mil ve rulmanlar yardımıyla nasele (kabin) bağlandığı noktadır (Turek,2013).

3.2.Türbin Tipleri

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte, rüzgâr enerjisi önem kazanmış ve her geçen gün farklı türbinler geliştirilerek maksimum düzeyde elektrik enerji elde etmek amaçlanmıştır. Günümüzde birçok parametreye bağlı olarak geliştirilmiş rüzgâr türbinleri bu başlık altında incelenmiştir.

3.2.1.Kanat sayılarına göre türbin tipleri

Türbin kanatlarında en önemli parametre aerodinamiktir. Aerodinamik katı bir nesnenin özelliklerini iade eder ve etrafındaki hava ile etkileşime girer. Bu özellikler öz önüne alınarak türbin kanatları, uçak kanatlarına benzer şekilde tasarlanmıştır.

Genel olarak, rüzgâr türbinlerinin çoğu üç bıçakla çalışır. Bu konu hakkında çalışma yapan mühendisler üç bıçak tasarımında uzlaşmışlardır.

Düşük sürtünme nedeniyle, enerji verimliliği söz konusu olduğunda bir bıçak optimum sayı olacaktır. Ancak, bir bıçak türbinin dengesiz olmasına neden olabilir ve bu türbinin stabilitesi için uygun bir seçim değildir.

Benzer şekilde, iki bıçak üçten daha fazla enerji verimi sunacak, ancak bazı sorunları beraberinde getirecektir. İki kanatlı rüzgâr türbinleri, jiroskopik durgunluk olarak bilinen ve sallanma ile sonuçlanan bir duruma daha yatkındır. Doğal olarak, bu yalpalama, bir bütün olarak türbin için daha fazla stabilite sorunu yaratacaktır. Bu aynı zamanda türbinin bileşen kısımlarına da baskı uygulayarak zamanla yıpranmasına sebebiyet verecektir.

Üçten büyük herhangi bir sayıda bıçak ise daha fazla rüzgâr direnci oluşturarak elektrik üretimini yavaşlatacak ve böylece üç kanatlı türbinden daha az verimli hale gelecektir.

Bu nedenlerden dolayı, üç kanatlı olarak tasarlanan türbinler, yüksek enerji verimi, türbinin daha yüksek stabilite ve dayanıklılık sağlamasından dolayı tercih nedeni olmaktadır (Ackermann, 2005).

3.2.2.Eksenlerine göre türbin tipleri

Türbinler dikey ve yatay eksen olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Dikey eksenli rüzgâr türbinleri düşük verimlerinden dolayı günümüzde tercih edilmemektedir. Yere yakın konumda çalışan dikey eksenli türbinler düşük hızlarda çalışmak durumunda kalırlar. Bu durum sarsıntılı çalışmalara sebebiyet vermektedir. Dikey eksenli türbinlerin avantajı ise rüzgâra karşı dönmek için herhangi bir mekanizmaya ihtiyaç duymamalarıdır.

Yatay eksenli türbinlerde ise rotor kanatları rüzgâra paralel olarak konumlandırılır ve rüzgâra karşı konumunu ayarlamak zorundadır. Günümüzde rüzgâr enerjisinde en çok tercih edilen türbin türü rüzgârı önden alan yatay eksenli türbinlerdir. Rüzgârı arkadan alan yatay eksenli türbinler ise rüzgâr yönüne göre, rüzgârı en iyi şekilde alabilmek için kendiliğinden döner. Ancak rüzgârı arkadan alan türbinler gölgeleme sorunu ile karşı karşıya kaldıkları için verimleri rüzgârı önden alan türbinlere göre daha düşüktür. Ayrıca gölgeleme sorunu bu türbinlerin daha gürültülü çalışmasına ve çıkış gücünde dalgalanmalar oluşturmasına neden olur (Masters, 2004; Patel, 2006).

3.2.3.Türbin hızlarına göre türbin tipleri

Hızlarına göre türbinler sabit ve değişken olarak iki farklı kategoride incelenebilir. Sabit hızlı türbinlerin yapısı basit ve dayanıklıdır. Belirli bir rüzgâr hızında çalışan bu türbinler rüzgâr hızındaki değişimlerde elektriksel dalgalanmalara yol açmaktadır. Asenkron motor kullanan ve şebekeye direk bağlanan sabit hızlı türbinlerde bu elektriksel dalgalanmalar zayıf şebekelerde ciddi sorunlar doğurabilir.

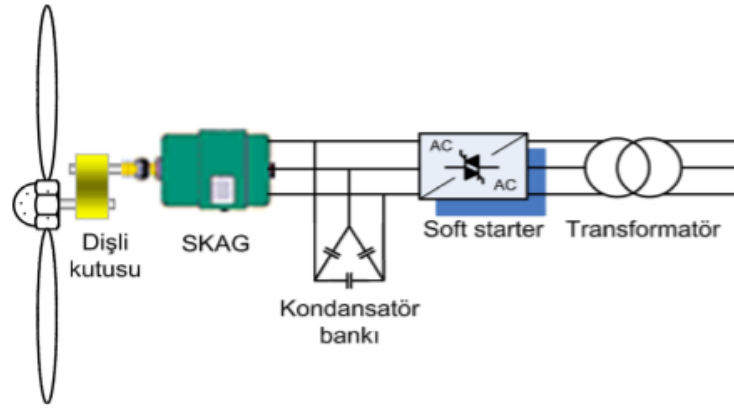
Değişken hızlı türbinler ise daha büyük güçlerde tercih edilmektedir. Geniş bir rüzgâr hızı aralığında çalıştıkları için sabit hızlı türbinlere göre daha avantajlıdır. Düşük hızlarda bile çalışabilmesinden dolayı gürültü seviyesi sabit hızlı türbinlere göre daha iyidir. Kanat hızı ve rüzgâr hızı sürekli ölçülerek kanat-uç hız oranı oluşturulur ve optimum seviyede güç elde edilmesi sağlanır. Bu tip türbinler şebekeye güç konverteri aracılığıyla entegre edilirler. Ancak bu durum maliyetleri artırır. Şekilde değişken hızlı bir rüzgâr türbininin elektriksel şeması görülmektedir (Masters, 2004).

3.3.Türbin Dizaynlarına Göre Türbin Tipleri

Türbinlerin üretim güçlerine göre birçok farklı çeşit vardır. Genellikle en büyük fark generatör sisteminden kaynaklanmaktadır ve en çok kullanılan dört tip türbin dizaynı bu başlık altında incelenmiştir.

3.3.1.Sabit hızlı rüzgâr türbinleri (Tip 1)

Sabit hızlı türbinlerin, bir transformatör yardımıyla şebekeye doğrudan bağlantısı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Direkt bağlı sincap kafes endüksiyon generatörlü sabit hızlı rüzgâr türbinini (Samancıoğlu, 2014).

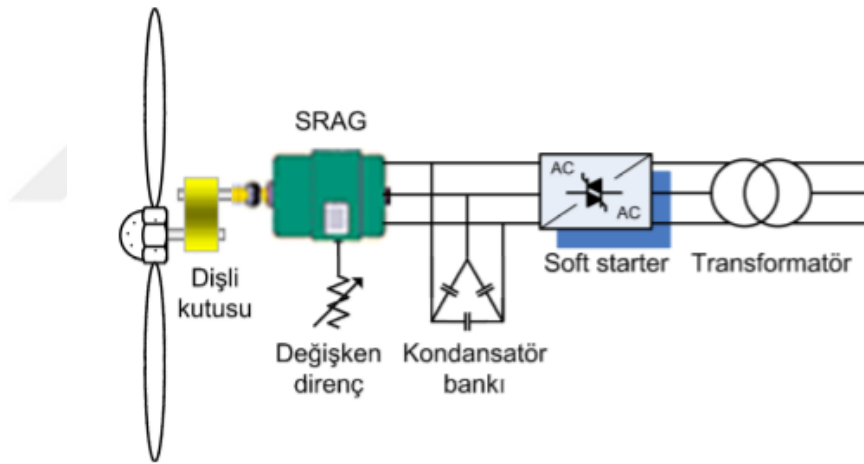
Sabit hızlı bir rüzgâr türbinini, rüzgâr hızı ne olursa olsun, çalışma sırasında daima sabit rotor hızında döner. Böylece, uç-hız oranı rüzgâr hızı ile değişir ve rotor aerodinamik performansı sadece belirli bir rüzgâr hızında optimum seviyeye gelir. Tip-1

türbinler, değişken rüzgâr hızlarında mekanik dalgalanmalara ve ardından elektriksel dalgalanmalara yol açar. Bu durum güç kalitesi üzerinde olumsuz etkilere yol açmaktadır. Ayrıca Tip-1 türbinlerde hız kontrolünün yapılamaması bu olumsuzlukların artmasına sebep olur. Ancak basit, sağlam ve ucuz olması sebebi ile düşük güçlerde tercih sebebi olmuştur (Ackermann, 2005).

3.3.2.Değişken hızlı rüzgâr türbinleri

3.3.2.1.Değişken rotor direncine sahip türbinler (Tip 2)

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde, rotor hızı rüzgâr hızına bağlı olarak değişir ve bu sayede optimum performans sağlar. Şekil 3.6'da değişken rotor direncine sahip türbinin dizaynı verilmiştir.



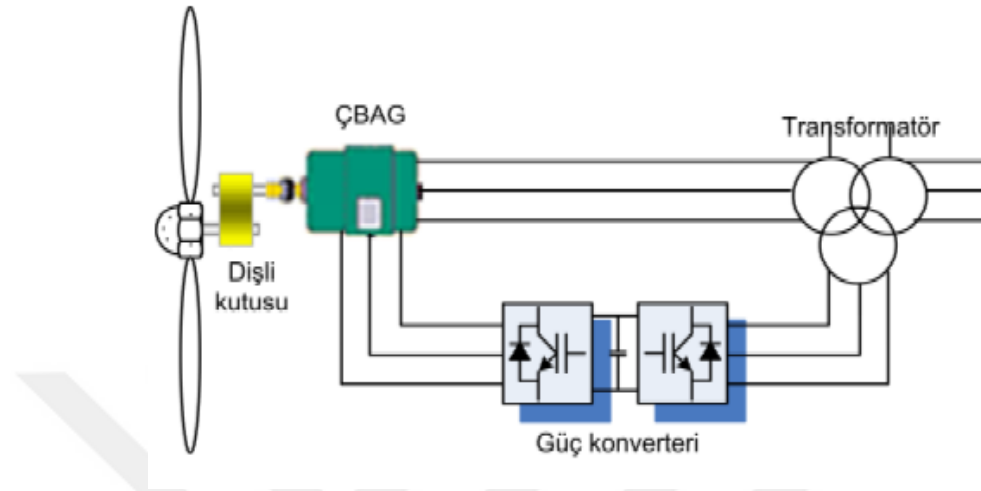
Şekil 3.6.Değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini (Samancıoğlu, 2014).

Rotor direncinin değiştirilmesi ile rotordaki kayma oranı değiştirilmesi sağlanır ve bu sayede sistemdeki güç çıkışı ayarlanabilir. Burada kullanılan kayma halkaları sebebi ile maliyetler artmaktadır (Ackermann, 2005).

3.3.2.2.Kısmi ölçek frekans konverterine sahip türbinler (Tip 3)

Çift beslemeli asenkron generatöre sahip Tip 3 türbinler, değişken hıza sahip olmalarından şebekeye doğrudan bağlanırlar. Çift beslemeli asenkron generatör her iki

yönde de güç transferine imkan tanıdığı için (rotordan şebekeye ve şebekeden rotora) direkt olarak bağlı bir AC/AC konvertör kullanılabilir. Tip 3 türbinlerin yapısı Şekil 3.7'deki gibidir.

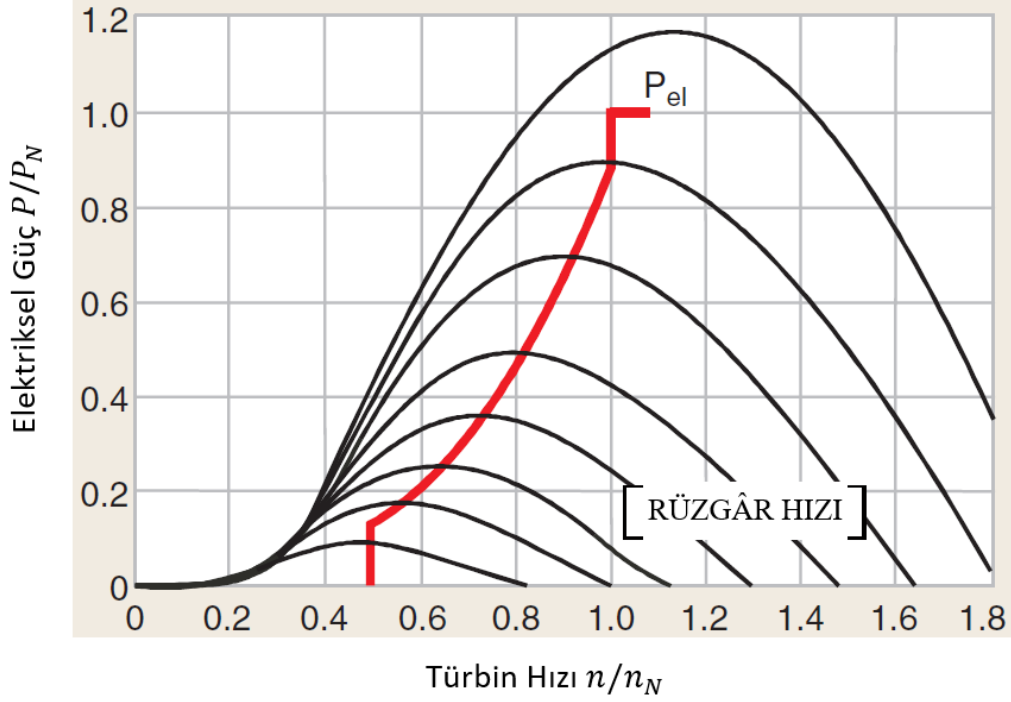


Şekil 3.7. Kısmi ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini (Samancıoğlu, 2014).

Tip 2 türbinlerdeki kayma halkaları bu tipte de kullanılması şebeke arızalarında koruma sorunları oluşturmaktadır. Ancak daha güçlü frekans çeviricilerin kullanılması bu tip türbinleri daha avantajlı hale getirmektedir (Ackermann, 2005). Çift beslemeli asenkron generatörün bazı avantajları vardır;

- Yapısındaki konverter sistemi sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yaradığı için toplam sistem gücünün % 25'i kadar güçte bir inverter kullanılmasına imkân sağlar. Bu da sistemde kullanılacak olan inverter maliyetini azaltır.
- İnverter harmonikleri, sistemdeki toplam harmoniklerin çok küçük bir bölümünü temsil eder.
- Harici bozucu etkilere karşı kararlı ve dayanıklı bir yapıya sahiptirler.

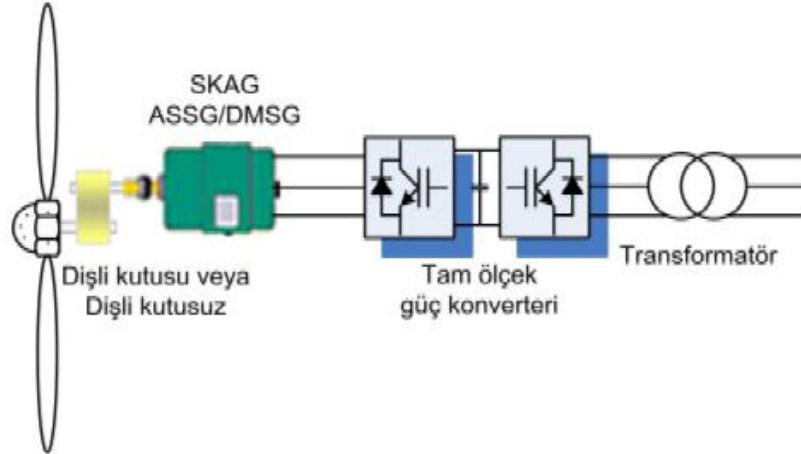
Bu avantajlara karşı çift beslemeli asenkron generatörün en büyük dezavantajı ise yapısında bulunan bilezik tertibatının periyodik olarak bakıma ihtiyaç duymasıdır. Çift beslemeli asenkron motorun türbin hızına bağlı olarak çıkış gücü Şekil 3.8'de verilmiştir. Kırmızı renkte gösterilen eğri ile maksimum güç noktası, siyah renkte gösterilen eğri ile de rüzgâr hızı temsil edilmiştir.



Şekil 3.8. Türbin hızına bağlı olarak elektriksel çıkış gücü.

3.3.2.3. Tam ölçek frekans konverterine sahip türbinler (Tip 4)

Tip 4 türbinler geniş bir rüzgâr aralığında, şebekeye doğrudan bağlanarak konverter yardımı ile kontrol edilirler. Tip 4 türbinlerin yapısı Şekil 3.9'daki gibidir.



Şekil 3.9. Tam ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgâr türbini (Samancıoğlu, 2014).

Türbin tipleri açısından en verimli olan Tip 4 türbinler, kayar bilezik olmadığından maliyet ve güvenlik bakımından da tercih edilme sebebidir. Diğer türbin çeşitleri açısından en uzun süre devrede kalma süresi Tip 4 türbinindedir (Ackermann, 2005). Bu kapsamda türbin tiplerinin karşılaştırılması Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2.Rüzgâr türbini tiplerinin sistem karşılaştırılması (Ackermann, 2005).

SİSTEM	TİP 1	TİP 2	TİP 3	TİP 4
Değişken Hız	HAYIR	HAYIR	EVET	EVET
Aktif Güç Kontrolü	SINIRLI	SINIRLI	EVET	EVET
Reaktif Güç Kontrolü	HAYIR	HAYIR	EVET	EVET
Reaktif Kompanzasyon	EVET	EVET	HAYIR	HAYIR



4. RÜZGÂR HIZI TAHMİNİ

Rüzgâr enerjisi önceden tahmin etmek, daha fazla RES'in şebekeye sorunsuz bir şekilde entegre olmasına çok önemli katkı sağlar. Bu tahminin doğruluğu rüzgâr enerjisinden azami derecede elektrik üretimi yapılmasına çok büyük derecede katkı sağlar. Bilindiği üzere elektrik piyasası gün öncesi alacağı enerji miktarı için önceden teklifler alarak gün sonrası enerji talebini karşılamaya çalışır. Yatırımcıların gün öncesi üretebileceği elektrik enerjisini doğru bir şekilde tahmin etmesi gün öncesi elektrik piyasasına yapacağı teklif değerlerinin belirlenmesi açısından da çok önemlidir. Rüzgâr santrallerinin elektrik enerjisi üretebilmesi için rüzgâr hızının belli sınırlar arasında olması gerekir. Elektrik üreten rüzgâr santralleri rüzgâr türbinin tipine bağlı olmak üzere minimum 4 m/s maksimum 25 m/s sınırlarında olması gerekir (Ackermann, 2005). RES'ni seçerken bölgenin rüzgâr hızına uygun değerlerde olması gerekir. Bu kriterler göz önüne alınarak inşa edilmiş bir RES'de gün içerisinde değişkenlik gösteren rüzgâr enerjisi üretimini tahmin edebilmek için öncelikle bölgenin hız tahmininin gereken sınırlar dâhilinde doğru yapılması gerekir. Rüzgâr hızının tahmin edilmesinde rüzgârı oluşturan ve rüzgâr hızının gün içi değişiminde etkili olan sıcaklık, nem ve basınç değerlerinin bilinmesi gereklidir. Bu tez çalışmasında kısa devre analizinin, aşırı rüzgâr hızından dolayı elektriksel ekipmanlara zarar verme durumu göz önüne alınarak maksimum rüzgâr hızı tahmini yapılmıştır. Maksimum rüzgâr hızı, gün içerisindeki ortalama sıcaklık, nem, basınç ve ortalama rüzgâr hızı dikkate alınarak dört farklı parametreye bağlı olarak en doğru şekilde tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışmasında bu tahmin işleminin yapay sinir ağları kullanılarak nasıl yapılabileceği araştırılmıştır. Bu amaçla bu bölümde Konya'nın Altınekin ilçesi, Ardıçlı RES mevkiinin rüzgâr hızı tahmini işleminin yapay sinir ağları kullanılarak nasıl yapılabileceği tahmin edilme çalışması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada tahmin işlemini yapay sinir ağları (YSA) ile gerçekleştirilmesinin sebebi ağın öğrenme yeteneğidir. Tahmin işlemi gerçekleştirilmesinde YSA ile oldukça başarılı sonuçlar elde edilebilmektedir (Saltan, 2019). Burada önemli olan husus ağın eğitilmesinde ve test edilmesinde kullanılacak verilerin sayısıdır. Ağın eğitilmesinde kullanılan veriler ne kadar fazla olursa eğitim sonucunda elde edilecek sonuçlarda o kadar başarılı olacak şekilde sonuçlar vermesi sağlanabilmektedir. Yapılan bu tez çalışma da ilgili bölgenin

2019 yılına ait 365 günlük ölçüm sonucu elde edilmiş metroloji verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

YSA'ların öğrenme algoritmaları aşağıda belirtildiği gibi;

- Danışmanlı öğrenme,
- Danışmansız öğrenme,
- Destekleyici öğrenme gibi üç farklı şekilde değişkenlik gösterir.

Danışmanlı öğrenmede ağ öğrenimi danışman sayesinde öğrenir. Ağa girdi ve çıktı sonuçları danışman tarafından verilerek ağ eğitilir ve hiç görmediği değerleri doğru tahmin etmesi beklenir.

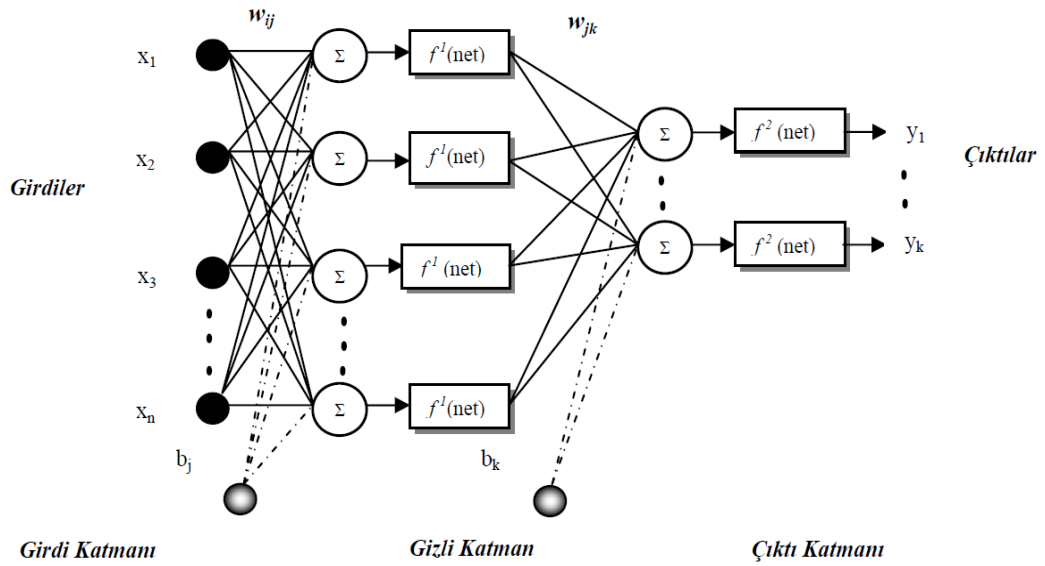
Danışmansız öğrenmede, ağa sadece girdi değerleri verilerek çıktı değerini ağın kendi öğrenmesi beklenir.

Destekleyici öğrenme algoritmasında ise, danışman ağa girdi değerlerine karşılık çıktı değerleri vermez sadece ağdan dönen değerlerin hatalı olup olmadığı belirtecek bir sinyal gönderir ve ağın öğrenmesini bekler.

Yapılan bu tez çalışmasında, kullanılacak verilerin de hem girdi hem de çıktı değerlerinin bulunmasından dolayı bu duruma en uygun olan danışmanlı öğrenme algoritmasının kullanılmıştır (Öztemel, 2012).

4.1.Yapay Sinir Ağları

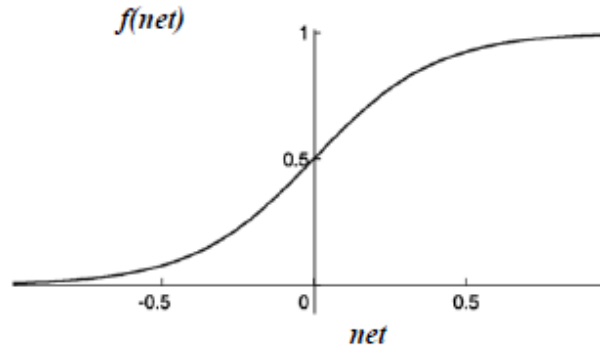
Yapay sinir ağları, insanlardaki sinir sistemine benzeyen bir yapıda geliştirilen bir bilgisayar sistemidir. Sinir sistemine benzetilen bu yapı tıpkı hücrelerin bir araya gelmesi gibi bir ağ mimarisine sahip olup genellikle 3 katmanlı olarak tanımlanmaktadır (Skapura, 1996). Yapay sinir ağının genel yapısı Şekil 4.1'deki gibidir.



Şekil 4.1.Çok tabakalı yapay sinir ağının mimarisi (Okkan ve Mollamahmutoğlu, 2010).

Üç temel katmanın ilk katmanı giriş katmanı, son katmanı ise çıkış katmanı olarak ve iki katman arasındaki katmanlar ise gizli katmanlar olarak adlandırılmaktadır. Yapay sinir ağında birden fazla ara katman olabilmektedir. Ara katmanın sayısı probleme göre değişiklik göstermektedir. Ara katman sayısının belirlenmesinde genel bir teorem bulunmamakta ancak deneme-yanılma yolu ile doğru sonuçlar elde edilebilmektedir (Haykin, 1996 ; Öztemel, 2012).

Şekil 4.1 incelendiğinde yapay sinir ağlarında temel katmanların dışında girdiler, ağırlıklar, net fonksiyon, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar olmak üzere beş temel eleman dikkat çekmektedir. Ağın girdi ve çıktı katmanlarında yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılacak veriler bulunmaktadır. Giriş katmanında bulunun veriler belirli ağırlıklarda bulunmakta olup bu durum ağın zekâsını ve öğrenme performansını doğrudan etkilemektedir. Bu ağırlıkların toplamı, girdilerin hücre üzerindeki etkilerini belirlemekte ve net fonksiyon olarak adlandırılmaktadır. Aktivasyon fonksiyonu ise hücrelere gelen bu net girdileri çıkışa aktarır. Aktivasyon fonksiyonunda step, tanjant, hiperbolik, lineer gibi farklı fonksiyonlar kullanılırken genellikle uygulamada tanıma aralığı 0-1 arasında olan sigmoid fonksiyon tercih edilmektedir. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu Şekil 4.2’de gösterilmiştir (Kamruzzaman ve ark.,2013; Öztemel, 2012).



Şekil 4.2. Sigmoid aktivasyon fonksiyonu (Okkan ve Mollamahmutoğlu, 2010).

$$f(net) = \frac{1}{1 + \exp[-(net)]} \quad (4.1)$$

Yapay sinir ağlarında mimarinin önemi kadar ağın öğrenmesinde kullanılan yöntemde çok önemlidir. Bu bağlamda ağın öğrenmesinde ileri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı algoritması sıklıkla tercih edilir. Algoritmanın mantığı ileri doğru ve geriye doğru hesaplama olmak üzere iki aşamada işlem yapmasıdır.

İleri doğru hesaplama aşamasında girdilerin ağa sunulması ile başlar. Yukarıda belirtildiği gibi ağa sunulan girdiler gizli katmandaki hücrelere gelerek net girdileri hesaplanır. Hesaplanan net girdiler aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek gizli katman çıktısı elde edilmektedir. Bu işlem girdi verilerinin tüm elemanları için yapılmakta ve çıktı katmanındaki tüm çıktılar elde edilince işlem tamamlanmaktadır. İleri doğru hesaplama yapan yapay sinir ağının çıktılara dönüşme aşaması Formül 4.2’de ifade edilmiştir (Haykin, 1996 ; Öztemel, 2012).

$$y_k = f_2 \left\{ \sum_{j=1}^k [f_1 \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} + b_j] w_{jk} + b_k \right\} \quad (4.2)$$

Formül 4.2’de;

x_i : ağın girdileri ($i = 1, 2, \dots, n$)

w_{ij} : girdi katmanı ile gizli katman arasındaki ağırlıklar,

b_j : girdi katmanı ile gizli katman arasındaki eşik (bias) terimlerini,

f_1 : girdi katmanı ile gizli katman arasındaki aktivasyon fonksiyonunu,

- f_2 : çıktı katmanı ile gizli katman arasındaki aktivasyon fonksiyonunu,
 j : gizli katmanına ait hücre sayısı,
 n : girdi katmanına ait hücre sayısı,
 k : çıkış katmanına ait hücre sayısı,
 w_{jk} : gizli katman ile çıktı katmanı arasındaki ağırlıklar,
 b_k : gizli katmanı ile çıktı katman arasındaki eşiktir (bias).

Yapay sinir ağına verilen bu verilerin tamamı ağın öğrenmesi için kullanılmamaktadır. Ağın eğitilmesinden sonra öğrenme oranının belirlenebilmesi için belirli bir kısmı test amaçlı kullanılmaktadır. Bazı durumlarda ağın öğrenmesi mükemmelere yakın olurken yapılan testte doğru tahminleme işlemi yapılamamakta ve öğrenmek yerine ezberleme mantığı ile çalıştığı görülmektedir. Bu gibi durumları önlemek amaçlı ağa test amaçlı yeni veriler verilir veya girdi verilenin bir kısmı test amaçlı kullanılır.

Geriye doğru hesaplama aşamasında ise çıktılar gerçek değerler ile karşılaştırılır. Çıktı ile gerçek değerler arasındaki fark hata değeri olarak adlandırılır ve bu hata istenilen hata seviyesine düşürülene kadar ağın ağırlık değerleri değiştirilerek yeniden öğrenmesi sağlanır. Ortalama hesabına bağlı olarak performans fonksiyonu veya hata kareler toplamına bağlı olarak geriye doğru hesaplama işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Formül 4.3'te yapay sinir ağının geriye doğru hesaplaması ifade edilmiştir (Cigizoglu ve Kisi, 2005; Uzun ve Özcan, 2020).

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2(w) \quad (4.3)$$

Formül 4.3'te;

- $E(w)$: performans fonksiyonu,
 w : ağın ağırlıklarını,
 n : girdi katmanına ait hücre sayısı,
 $e(w)$: beklenen değerler ile çıktı değerler arasındaki farkı ifade etmektedir.

Burada belirtilen ileri beslemeli geri yayımlı klasik algoritmaları yanında çok daha hızlı sonuç veren Newton ve Levenberg-Marquardt (LM) algoritması sıklıkla tercih

edilmektedir(Kisi, O.,2004). Bu bağlamda yapılan tez çalışmasında rüzgâr hızı tahmin etme işlemi için LM algoritmasından faydalanılmıştır.

LM algoritmasında, Hessian matrisi $H(w)$ adı verilen karışık bir matrisin yaklaşık değeri baz alınmaktadır. Bu yöntem Formül 4.4'te ifade edilmiştir.

$$H(w) \cong J^T(w)J(w) + \mu I \quad (4.4)$$

Formül 4.4'te;

μ : Marquardt parametresi,

T : Hessian matrisinin transpozitesi

I : birim matris olarak ifade edilmiştir.

Ağın geri yayılmasında Jakobien matrisinin transpozuzu alınır ve ağda oluşan hatalardan faydalanılarak ise ağın gradyaneni hesaplanmaktadır. Bu yöntem Formül 4.5'te belirtilmiştir.

$$\nabla E(w) = J^T(w) e(w) \quad (4.5)$$

Gradyeni alınan ağ, ağırlıklarındaki değişimin hesaplamasında Formül 4.6'da kullanılır. Hessian matrisinin tersi ile ağın gradyeni çarpılarak hesaplama işlemi gerçekleştirilir. Ağ ağırlıklarının güncelleme işlemi ise Formül 4.7'de belirtilmiştir.

$$\Delta_w = -[H(w)]^{-1} \nabla E(w) \quad (4.6)$$

$$w_{yeni} = w_{eski} + \Delta w \quad (4.7)$$

4.2.Uygulama Bölgesi ve Verilerin Hazırlanması

Yapılan bu çalışmada, YSA ile yıl içerisinde oluşabilecek maksimum rüzgâr hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır. YSA ile yapılan bu çalışmada girdi verileri; günlük ortalama rüzgâr hızı, sıcaklık, basınç ve nem iken çıktı verisi; maksimum rüzgâr hızı olarak ele alınmıştır. Konya'nın Altınekin ilçesi, Ardıçlı RES mevkiine ait dört farklı giriş

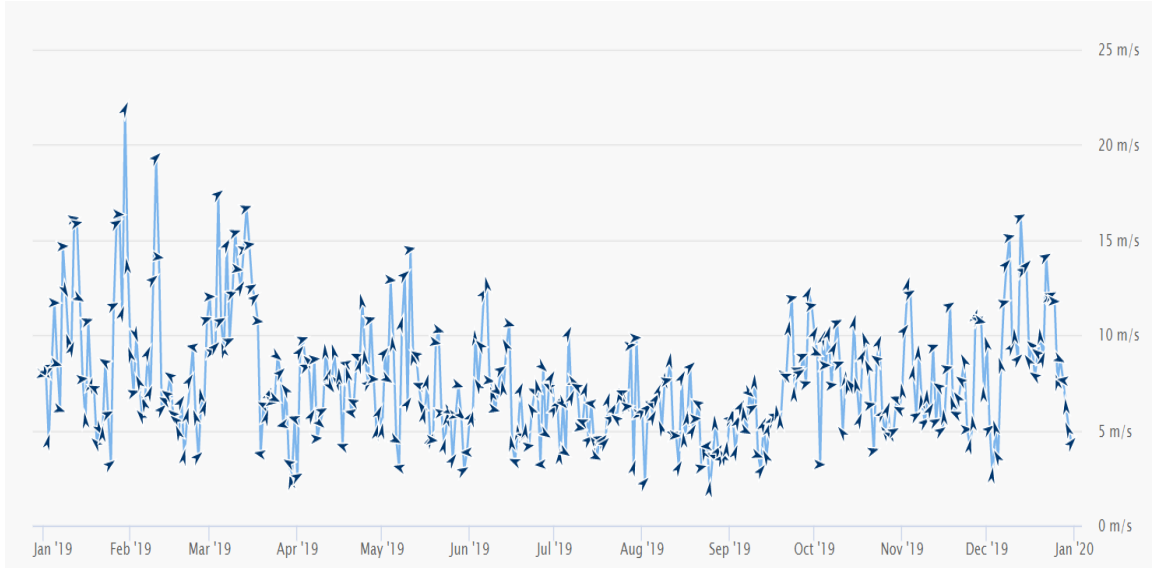
değişkenine bağlı olarak, maksimum rüzgâr hızını en doğru şekilde tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda geçmiş yıllara ait veriler MeteoBlue şirketinden alınmıştır. Çalışmada kullanılan verilerin bir kısmı Tablo 4.1’de diğer tüm verilerin tamamı ise EK-1’de verilmiştir.

Tablo 4.1.YSA’da kullanılan girdi ve çıktı katmanı verileri

Gün	Günlük Ortalama Rüzgâr Hızı (10m)	Günlük Ortalama Sıcaklık	Günlük Ortalama Nem	Günlük Ortalama Basınç	Günlük Maksimum Rüzgâr Hızı (10m)
1	3.7	4.8	85.25	1033.57	7.91
2	4.0	2.2	79.17	1036.07	8.02
3	1.3	0.1	75.71	1038.88	4.40
4	2.4	1.2	79.50	1038.18	8.30
5	7.9	1.9	85.25	1033.55	11.72
6	5.0	3.0	82.08	1032.93	8.52
7	2.2	2.8	80.75	1033.59	6.11
8	9.6	4.3	82.08	1022.75	14.70
9	8.6	2.6	76.75	1016.70	12.32
10	6.5	0.4	82.88	1022.93	9.71
.
.
.
364	1.4	3.5	53.79	1034.50	5.08
365	1.5	5.2	69.50	1032.70	4.31

YSA’nın eğitilmesi Tablo 4.1’de gösterildiği gibi 2019 yılına ait veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Verilerin bir kısmı YSA’nın eğitimi amaçlı bir kısmı ise test amaçlı kullanılmış böylece eğitimin, öğrenme oranı tespit edilmiştir. Veriler Matlab programına doğrudan aktarılmış, veri çok büyük sayılar içermediği için normalizasyon işlemine ihtiyaç duyulmamıştır.

MeteoBlue firmasından alınan verilerde 10 metre yükseklikte ölçülen, 2019 yılına ait günlük maksimum rüzgâr hızı Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3.Konya Ardıçlı RES bölgesinde 2019 yılına ait 10 metredeki maksimum rüzgâr hızı (MeteoBlue,2019).

Çıktı verisi olarak kullanılan maksimum rüzgâr hızı, YSA eğitimi sonrasında sonuçların doğrulamasında kullanılmış bu sayede yapılan çalışmanın başarı oranı tespit edilmiştir.

YSA'da kullanılan verilerin aldığı bölge, konum olarak Şekil 4.4'te verilmiştir.

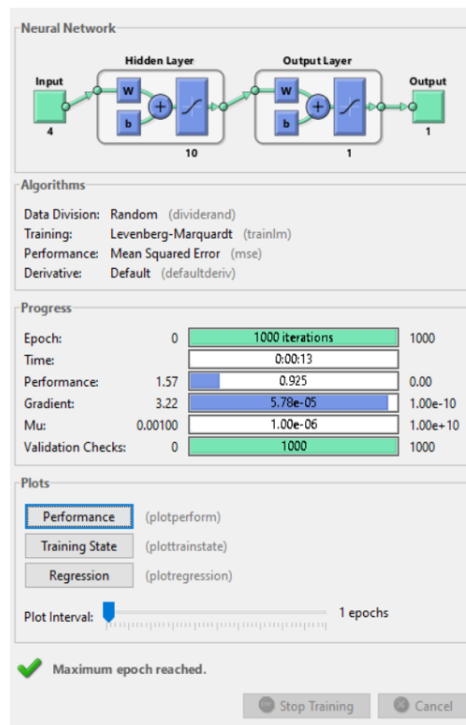


Şekil 4.4.YSA'da kullanılan verilerin aldığı bölge

4.3.YSA ile Modelleme

Yapılan çalışmada, en uygun YSA modelinin belirlenmesi deneme-yanılma yolu ile bulunmuş gizli katman parametreleri birçok kez değiştirilmiştir. YSA’da en iyi gizli katman parametrelerini belirlenmesinde halen bir Formül geliştirilememiş ancak deneme-yanılma yolu ile bulunabilmektedir (Okkan ve Mollamahmutoğlu, 2010). Hem YSA’nın eğitimi aşamasında hem de test aşamasında en düşük hata ile tahmin gerçekleştiren model belirlenmiştir. Diğer modellere göre daha hızlı sonuç veren hem de doğrusal olmayan verilerde başarı oranı çok yüksek olan ileri beslemeli geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Veri setinin eğitilmesi amacıyla birçok algoritma denenmiş ancak en yüksek başarı oranı; “trainlm” eğitim fonksiyonu, learnqdm öğrenme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu olarak da tanjant sigmoid (tansig) fonksiyonu kullanılarak YSA modeli tasarlanmıştır.

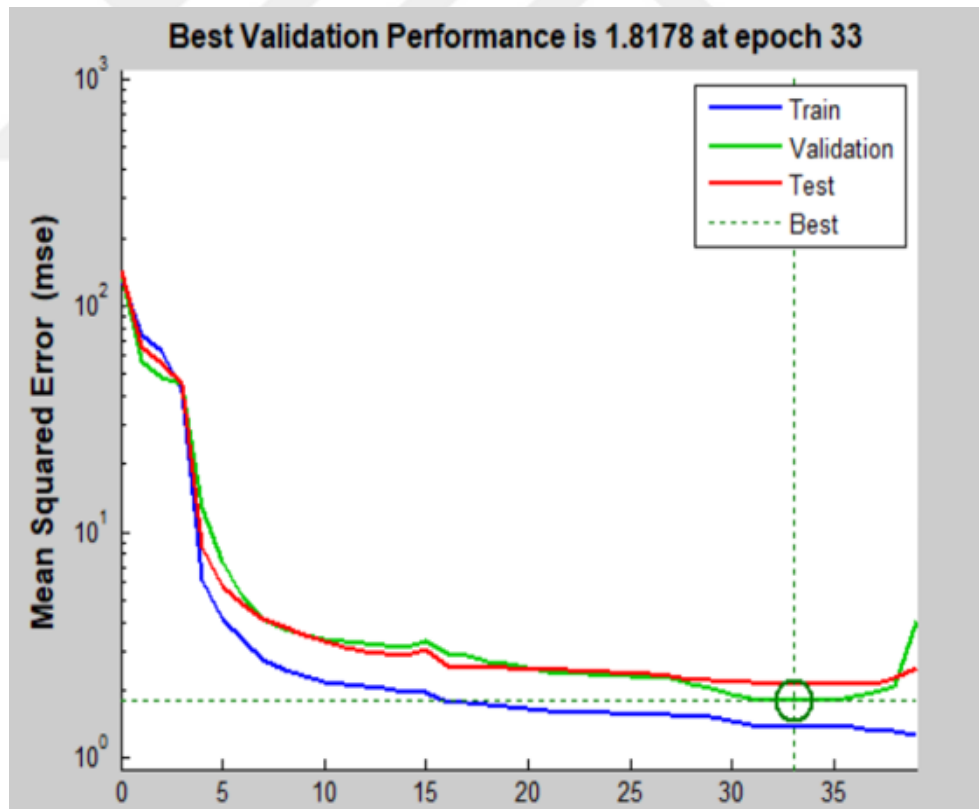
YSA’nın eğitimde durma sınırı 1000 iterasyon gibi yüksek bir değer olarak belirlenmiştir ancak YSA öğrenimi erken tamamlamış verilen 1000 iterasyona gelmeden durmuştur. Buna bağlı olarak $1e-10$ gradient değeri ve 1000 doğrulama değeri sisteme verilmiştir. Eğitim 13 saniyede 1000 iterasyona ulaşarak tamamlanmıştır. Matlab programında gerçekleştirilen YSA ara yüzüne girilen veriler Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.5.Kullanılan Matlab YSA ara yüzü

4.4.YSA'nın Eğitimi ve Testi

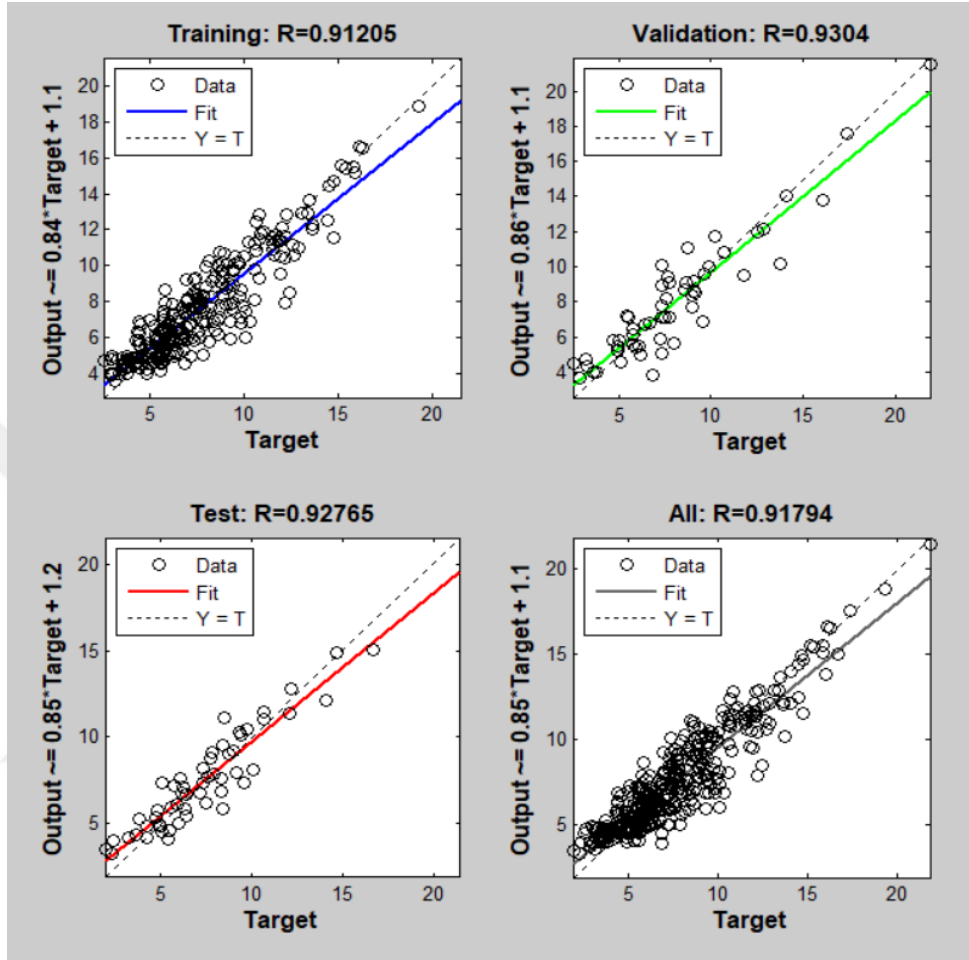
Maksimum rüzgâr hızını tahmin etmek için YSA modeli oluşturulduktan sonra eğitim ve test aşamaları gerçekleştirilmiştir. Doğru tahmin yapmak için en küçük hata değerine ulaşmak hedeflenmiştir. Eğitim aşamasında kullanılan veriler, tekrar test aşamasında kullanılırsa bu durumda YSA'nın eğitim aşamasındaki öğrenim oranını kesin olarak tespit edemez. Bazı durumlarda YSA öğrenmek yerine ezberleme yapabilir bu durumda aynı veriler sisteme verildiğinde test aşamasında gerçek öğrenme oranı bilinemez. Bu durumda iki alternatif vardır; öncelikle verilerin bir kısmı eğitim, bir kısmı test için ayrılabilir veya verilerin tamamı eğitim için verilir ve YSA'ya daha önce hiç tanıtılmamış veriler ile test işlemi gerçekleştirilir. Bu şekilde YSA'nın test aşamasında gerçekten öğrenme oranı tespit edilebilir. Eğitim aşamasında hata değeri incelendiğinde en düşük hata değerinin 33.iterasyonda gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada iterasyon sayısına bağlı olarak hata oranları Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6.Eğitim, doğrulama ve test verilerine ait eğitim aşamasındaki performans fonksiyonunun değişimleri

Eğitim ve test aşaması tamamlanan YSA'nın çıkış değerlerinin gerçek değerler ile karşılaştırılması sonucunda sistemin tahmin yüzdesi hesaplanır. Yapılan çalışmada

eğitim, doğrulama ve test aşamalarına ait tüm verilerin regresyon eğrileri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Regresyon değerinin 1’e yaklaşması modelin gerçek değerlere çok yakın değerler tahmin ettiğini anlamına gelmektedir.



Şekil 4.7.Eğitim, doğrulama ve test aşamalarında tüm verilerin sonuçlarına ait regresyon eğrileri

YSA ile doğru tahmin gerçekleştirmek verilerin sayısına ve tahmin modellerine bağlıdır. Kullanılan modeller hız, doğruluk, sağlamlık ve leklenebilme açısından karşılaştırılabilir. YSA’da kullanılan temel performans değerlendirmeleri R^2 , MSE, RMSE ve MAE olarak gösterilebilir (Skapura, 1996).

Bu tez çalışmasında Tablo 4.2’de verilen hata ölçüleri kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu performans ölçüleri arasında R^2 , modelin doğruluk karar verme katsayısını temsil etmektedir. Bu katsayının yüksek olması tahmin işleminin iyi olduğunu göstermektedir. MSE, RMSE ve MAE ise hata ölçülerini temsil etmesinden dolayı düşük değerler tahmin işlemlerindeki başarı oranlarının yüksek olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.2. YSA'da kullanılan yöntem sonuçlarının karşılaştırılması

Açıklaması	Ölçüt Formülü	Performans Değerleri
R^2	$R^2 = 1 - \frac{V_E}{V_Y}$	0.93
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_t - p_t)^2}$	0.06
MSE	$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_t - p_t)^2$	0.24
MAE	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_t - p_t $	0.05

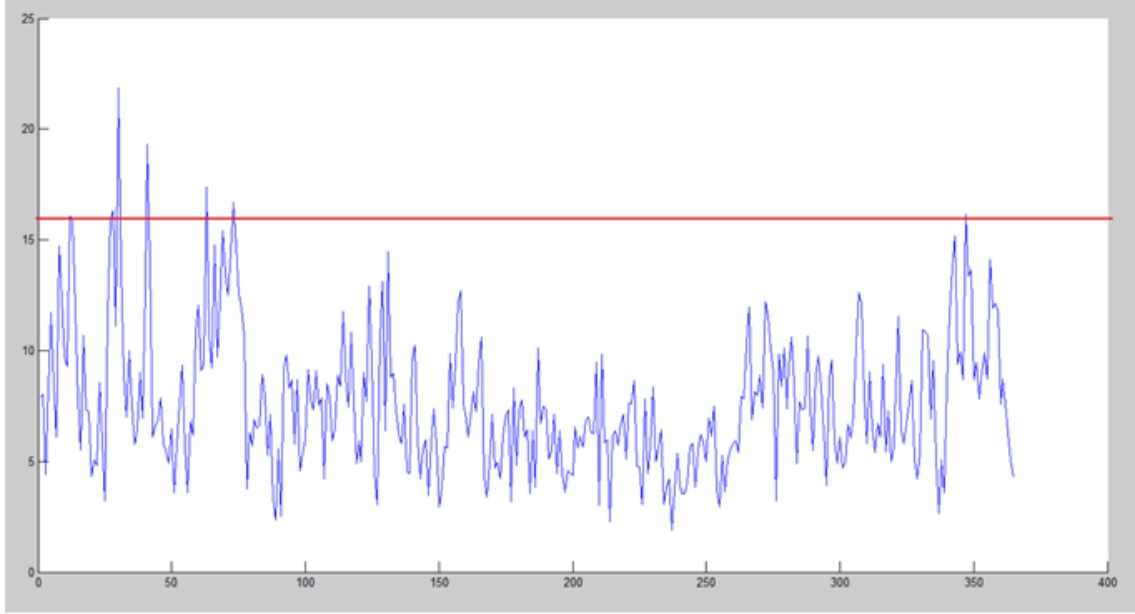
YSA'da kullanılan modellerin performans değerlendirmelerinde R^2 , RMSE, MSE ve MAE esas alınmıştır. Tablo 4.2'de verilen değerlerde R^2 değerinin 1'e yaklaştığı RMSE, MSE ve MAE değerlerinin ise 0'a yaklaştığı gözlenmiştir. Bu değerler sayesinde YSA ezberleme yapmadan en başarılı model parametreleri ile gerçekleştirilmiştir.

4.5.YSA Modeli ile Maksimum Rüzgâr Hızının Tahmin Sonuçları

Yapay sinir ağları ile yapılan çalışmada yıl içerisinde maksimum rüzgâr hızı hesaplanmıştır. Elde edilen maksimum rüzgâr hızı 10 metre yüksekliğinde gerçekleştirilmiştir. 3.3 MW güce sahip bir rüzgâr santralının kule yüksekliği 100 metredir. Bu bağlamda elde edilen maksimum rüzgâr hızı 100 metre yüksekliğine Hellman katsayısı ile taşınmıştır. Rüzgâr santralının hem mekanik hem de elektriksel olarak zarar görmemesi için 25 m/s ve üstünde türbinde frenleme yapılarak durdurulur (Ackermann, 2005).

Yılın belirli günlerinde rüzgâr hızının aşırı artarak, elektriksel ekipmanlara zarar vermesi sonucu kısa devre arızası oluşmasına neden olabilir. Frenleme sistemi maksimum rüzgâr hızında devreye girememesi, bu gibi durumlara sebebiyet verir. Yapılan çalışmada maksimum rüzgâr hızı önceden tahmin edilerek, türbinin maksimum rüzgâr hızına ulaşmadan hemen önce durdurulması sağlanır. Böylece oluşabilecek mekaniksel ve elektriksel arızalar önlenir.

YSA çıkışında elde edilen sonuçlar Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Bir yıl içerisinde rüzgâr santraline zarar verebilecek yüksek hızda rüzgârlı gün sayısı 14 olduğu görülmektedir. Bu durum bölgenin rüzgâr enerji santrali içinde uygun bir bölge olduğunu göstermektedir.

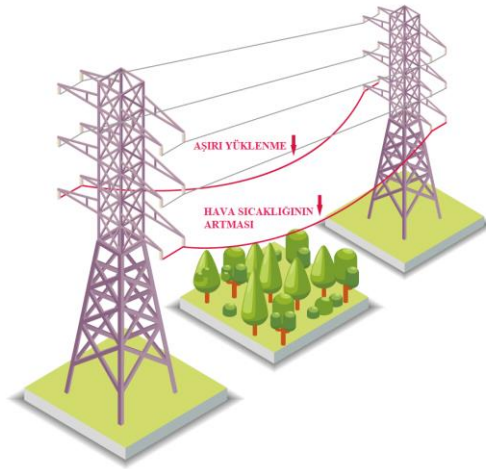


Şekil 4.8. YSA çıkışında elde edilen günlük maksimum rüzgâr hızı (10 metredeki rüzgâr hızı verileri)

Konya'nın Altınekin ilçesi Ardıçlı RES mevkiinde yıllık maksimum rüzgâr hızı Matlab programında YSA ile tahmin edilmiş ve eğitim aşamasında % 91.20 oranında doğru tahmin işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu oran test aşamasında % 92.76 seviyesine çıkarak YSA'nın öğrenme oranının çok başarılı olduğu ortaya çıkmıştır (Daha önce verilen Şekil 4.7). Sistemin daha önce hiç karşılaşmadığı veriler karşısında doğru kararlar verebildiği görülmüştür.

5. KISA DEVRE

Kısa devre adından da anlaşılacağı gibi, akımın elektrik devresinde ki döngüsünü mevcut durumdan daha kısa bir mesafede tamamlamasına denir (Erim, 2015). Elektriksel sistemlerde yıldırım düşmesi veya elektriksel anahtarlamalar da bir problem olması durumunda; aşırı gerilim yüklenmesi, izolasyon malzemelerinin bozulması veya mekanik etkiler sonucunda elektriksel yalıtım delinerek kısa devreye sebebiyet verebilir. Kısa devre iç ve dış etkenlere bağlı olarak iki farklı sebepten oluşabilir. İç etkenler malzeme yorulması, eskimesi ve yıpranması sonucu kısa devreye sebep olurken, dış etkenler havai hatlara ağaçların düşmesi, buz yükünden dolayı iletkenlerin sehiminin artması veya kopması, kuş sürülerinin faz iletkenleri arasında uçuşması gibi nedenler sebep olabilir. Benzer şekilde yeraltı kablolarına iş makineleri tarafından kazı esnasında yapılan yanlış çalışmalar bir diğer dış etken nedeni olarak karşımıza çıkmaktadır. 2003 yılında İtalya’da iletim hatlarında fazla yüklenme sonucunda iletkenlerin ısınma sonucu uzaması neticesinde sarkarak altında bulunan ağaç dallarına temas ederek gerilim atlaması gerçekleşmiş ve sonuçta kısa devre arızasına neden olmuştur. Oluşan bu olay sonucu kısa devre arıza zincirini başlatarak sonuçta beş ülkenin elektriğinin kesilmesine neden olan etkiye yol açmıştır. Sonuçta dört kişinin de ölümüne neden olan bu arıza, ülkenin 5 ila 9 saat elektrik enerjisiz kalmasına ve 57 milyon insanın elektrik kesintilerinden etkilenmesine neden olmuştur (UCTE, 2003; Atputharajah ve Saha, 2009). İletim hatlarındaki meydana gelen bu sehim işlemi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Yaz aylarında hava sıcaklığı sonucu veya aşırı yüklenme sonucu sarkma yapan iletkenler (Anonim, 2020).

İletim hatlarında kısa devre arızasına sebebiyet verebilecek bir diğer etken izolatör değişimidir. Yeni yapılan enerji hatlarında sıklıkla silikon izolatör kullanılmakta ancak mevcut eski enerji hatlarında porselen izolatör karşımıza çıkmaktadır. Mevcut eski hatlarda izolatör değişimi, rüzgâr-ağırlık hesabı yapılmadan silikon izolatör ile değişimi yapılabilmektedir. Silikon izolatörler, porselen izolatörlere göre çok hafif olduğu için iletkenlerin rüzgârlı havalarda salınımı artırarak direğe temas etmesine ve kısa devre arızasına yol açmasına sebep olabilmektedir.

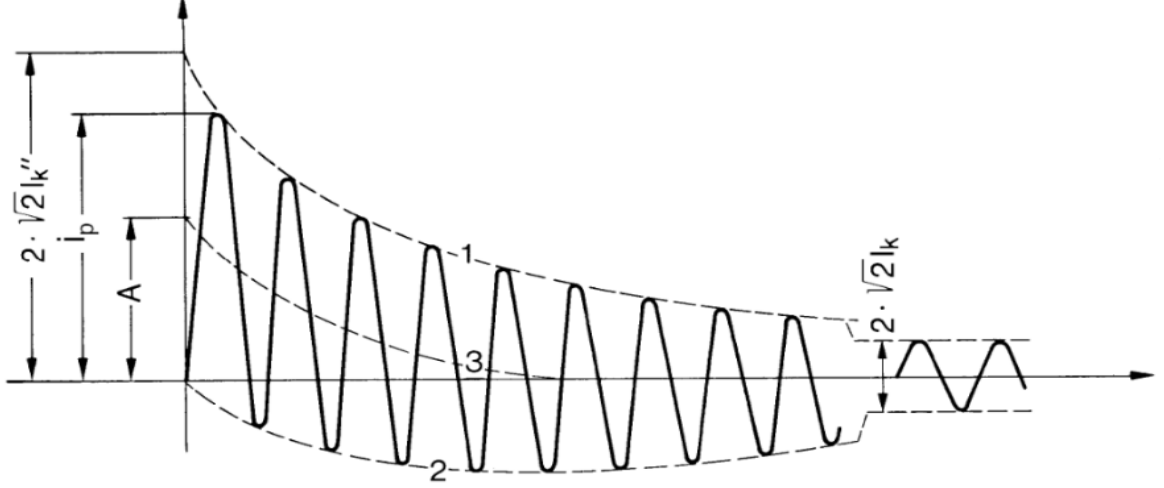
Kısa devre sonucunda oluşan kısa devre akımının büyüklüğü, arıza noktasına ve sistem empedansına bağlı olarak değişiklik gösterir. İletim sistemlerinde şebeke empedansının düşük olması, trafo merkezlerinde meydana gelen gerilim düşümünü engellerken sonuçta ise trafo merkezi barasında veya bu hat fiderinde oluşacak kısa devre akımı değerlerinin yüksek olmasına sebep olur. Kısa devre akımı nominal akımın kat ve kat üzerinde olabilir. Bu olayın uzun sürmesi ve devrede kullanılan elemanlar seçilirken bu etkinin oluşması durumu göz önüne alınmaması şebekelerde bertarafı mümkün olmayan elektriksel ve mekaniksel zararlar oluşmasına neden olabileceği gibi bazen de yangına sebebiyet vermektedir. Kısa devre oluşması sonucunda oluşabilecek hasarı en aza indirmek veya bu tür hasarlara sebebiyet vermemek için kısa devre arızasına neden olan arızalı kısmın sistemden hızlı bir şekilde çıkarılması gerekir. Bu tip arızalarda elemanların doğru seçilmemesi sistemde oluşacak arızanın mevcut şebeke hattına yansiyarak orta veya yüksek gerilim kısmında bulunan kesicilerin devreyi açarak oluşan arızanın etkisinin ortadan kaldırılmasını sağlar (Glover ve ark., 2008). Bu durum hiç istenmeyen durumlara sebebiyet vererek oluşacak arızadan etkilenmemesi gereken alıcıların da etkilenmesine neden olmaktadır.

5.1.Kısa Devre Akımı Karakteristiği

Kısa devre akımında, kısa devre sürecinin zamana bağlı olarak geçici değişimi (stabil olmayan) Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Generatöre yakın oluşan kısa devre durumundaki akımın değişimini temsil eden grafikte, akım yüksek bir başlangıç değeri olan I_k'' başlangıç kısa devre (subtransiyent) alternatif akımı ile başlamakta ve zamana bağlı olarak I_k sürekli kısa devre alternatif akımı değerine kadar düşmektedir.

Şekil 5.2 incelendiğinde, akımın azalan bir alternatif bileşene sahip olduğu görülmektedir. Bu durumun etkisi yüksek gerilim elektrik şebekelerinde görülürken, azalan

bileşene sahip olmayan durumların etkisi alçak gerilim elektrik sistemlerinde dikkate alınmayacak kadar küçük genlikte olmaktadır (Kaşıkçı, 2007).



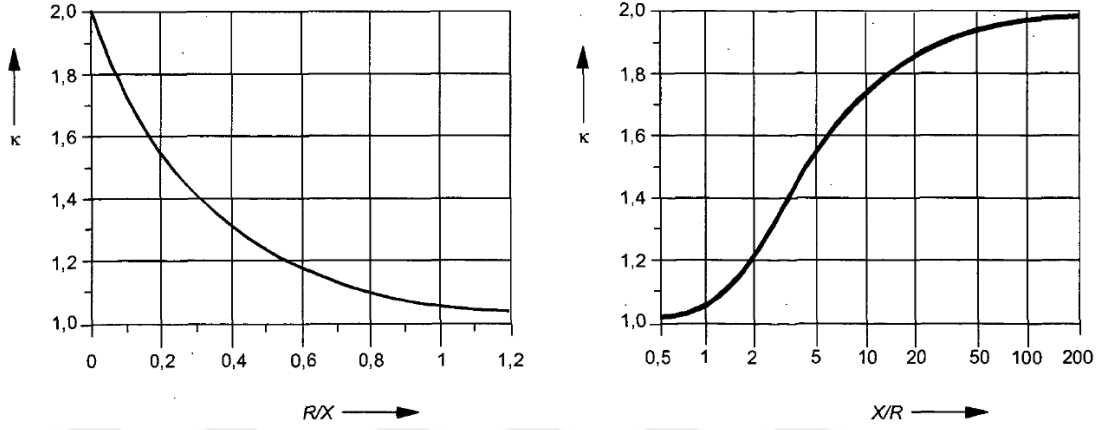
Şekil 5.2. Generatöre yakın kısa devre sürecinin zamana bağlı grafiği (Küçük, 2005).

Şekil 5.2’de gösterildiği üzere darbe kısa devre akımı yüksek bir değerden I_k'' başlayarak sürekli kısa devre akımı olan I_k akımı değerine ulaşarak akımın değeri sabit kalmaktadır. Böylece kısa devre akımı belirli bir süre sonra sürekli hale gelmekte ve geçiş durumunda ki akım I_k' (transiyent) kısa devre akımı olarak adlandırılmaktadır. Kısa devre akımı içerisinde hem doğru akım hem de alternatif akım bileşenleri bulunmaktadır. Bu bileşenler zıt işaretli olmakla birlikte kısa devrenin başlangıcından itibaren azalan bir değişim göstermektedir. Söz konusu bu kısa devre oluşum anından akımın değerinin kararlı bir hale gelinceye kadar geçen zamanda oluşan başlangıç, darbe ve sürekli kısa devre akımının değişimi incelenmesi devre elemanlarının kısa devre anından düzgün bir şekilde çalışmasının sağlanması büyük önem arz etmektedir.

- **Darbe kısa devre akımı (I_p)**

Cihazların mekanik zorlanmalarında ölçü teşkil eden kısa devre akımı darbe kısa devre akımı olarak adlandırılır. Darbe akımının değeri daima darbe akımının tepe değeri üzerinden ifade edilir. Yani bunun değeri kısa devre olayının başlangıcındaki süreçte, akımın ulaşabileceği en büyük ani değerine eşittir. Darbe kısa devre akımının değeri de

besleme gerilimine ve kısa devre noktasının olduğu noktaya bağlı olarak değişmekle birlikte kısa devre yerinin R/X (ya da X/R) oranına bağlı olarak değiştiği kabul edilir. Bu değişimlerin şekli Şekil 5.3'te gösterilmiştir (Erim, 2015).



Şekil 5.3. Darbe kısa devre akımının R/X ve X/R oranına göre değişimi (IEC 60909-0).

Darbe kısa devre akımı Formül 5.1 ve 5.2 kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (5.1)$$

$$\kappa = 1.02 + 0.98 e^{-3R/X} \quad (5.2)$$

Formül 5.1 ve 5.2'de;

I_p : Darbe kısa devre akımı (*Amper*),

I''_k : Başlangıç kısa devre (subtransiyent) alternatif akımı (*Amper*),

κ : Darbe kısa devre akımı katsayısı,

R : Direnç (*ohm*),

X : Endüktans (*Henry*) olarak ifade edilmiştir.

- **Başlangıç kısa devre akımı (I''_k)**

Kısa devrenin meydana geldiği andaki akımın etkin değeri başlangıç kısa devre akımı olarak ifade edilir (Erim, 2015). Başlangıç kısa devrenin değeri Formül 5.3'te hesaplanabilir.

$$I''_k = \frac{E}{X''_d} \quad (5.3)$$

Formül 5.3'te;

I''_k : Başlangıç kısa devre (subtranzient) alternatif akımı (*Amper*),

E : Yüksüz bir senkron generatörün arıza öncesi faz-toprak geriliminin efektif değeri (*Volt*),

X''_d : Başlangıç geçici reaktans (*ohm*) olarak ifade edilmiştir.

- **Sürekli kısa devre akımı (I_k)**

Sürekli kısa devre akımı, kısa devrenin kararlı hale gelmesinden sonra geriye kalan, sönümsüz kısa devrenin etkin değeridir. Generatör en yüksek uyarım akımı ile çalışırken I_k en büyük değerine ulaşırken, boшта çalışma esnasında en küçük I_k değeri görülür. En büyük ve en küçük kısa devre akımları Formül 5.4 ve Formül 5.5'teki verildiği şekilde hesaplanabilir (Yılmaz O.,2014).

$$I_{kmax} = \lambda_{max} \times I_N \quad (5.4)$$

$$I_{kmin} = \lambda_{min} \times I_N \quad (5.5)$$

Formül 5.4 ve 5.5'te;

I_{kmax} : Sürekli kısa devre akımının maksimum değeri,

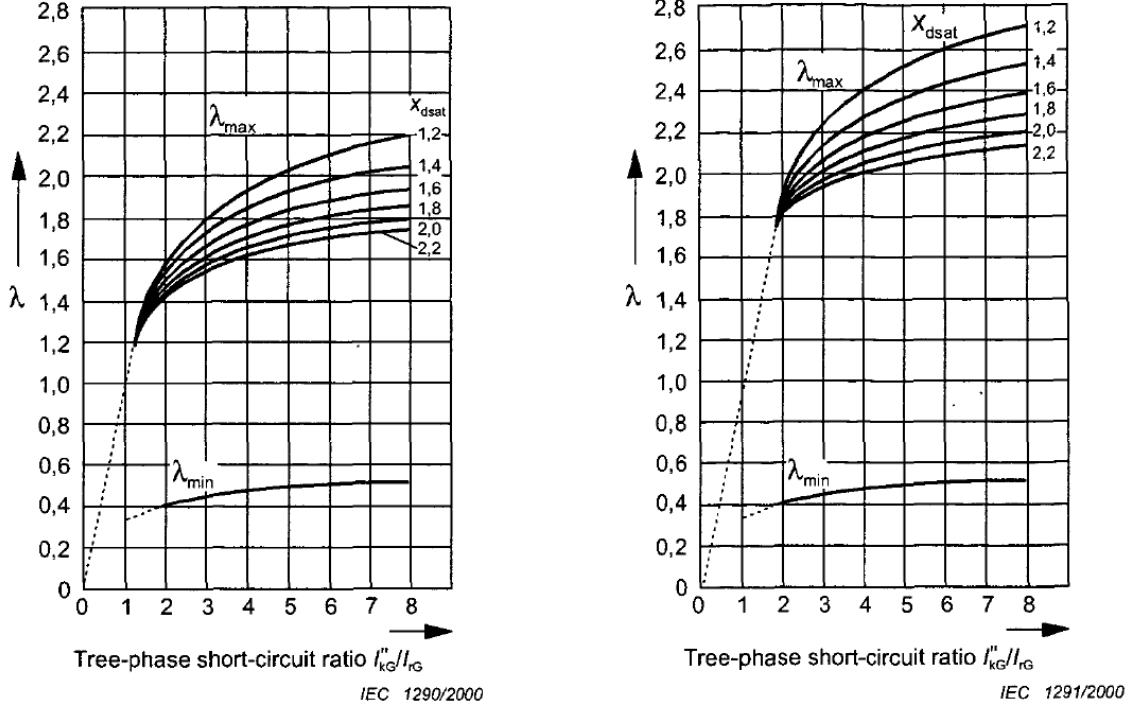
I_{kmin} : Sürekli kısa devre akımının minimum değeri,

I_N : Anma akımı,

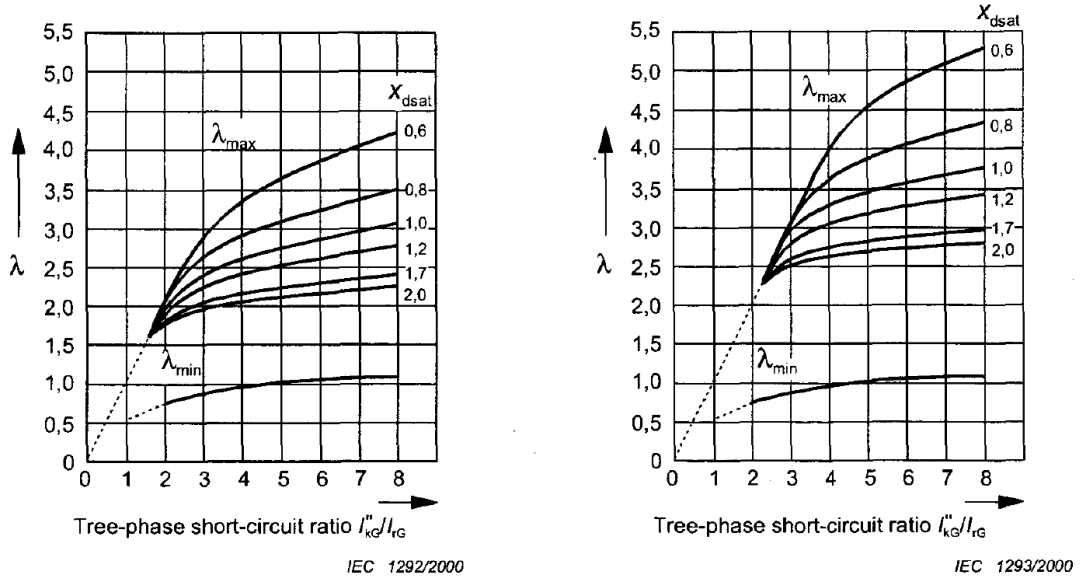
λ_{max} : Generatör tipine göre güç katsayısının maksimum değeri,

λ_{min} : Generatör tipine göre güç katsayısının minimum değeri olarak ifade edilmiştir.

Formüllerdeki λ değerleri Generatör tipine göre Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'ten alınır.



Şekil 5.4. Senkron reaktans değeri 1.0 ve 2.0 olan silindirik generatörlerin λ değerleri (IEC 1291/2000).



Şekil 5.5. Senkron reaktans değeri 1.0 ve 2.0 olan çıkık kutuplu generatörlerin λ değerleri (IEC 1291/2000).

- **Kısa devre açma akımı (I_b)**

Anahtarlama sırasında kesicinin kontaklarının ayrılması anında kutuplar içinden geçen akımın efektif değeri kısa devre açma akımı olarak tanımlanır. Kesicinin özellikleri ve kısa devre akımının süresi kısa devre açma akımının büyüklüğünü belirler. Ayrıca akımın büyüklüğü, pozitif ve negatif dalgaların simetrisini değiştiren doğru akım (DC)

dengeleme bileşenine bağlıdır. Oluşan bu simetrisizlik kısa devre açma akımını I_a (simetrik açma akımı) ve $I_{a_{asym}}$ (asimetrik açma akımı) olarak iki farklı kısa devre açma akımı olarak ayırılır. Kısa devre açma akımı Formül 5.6'dan hesaplanabilir.

$$I_a = \mu \cdot I_k'' \quad (5.6)$$

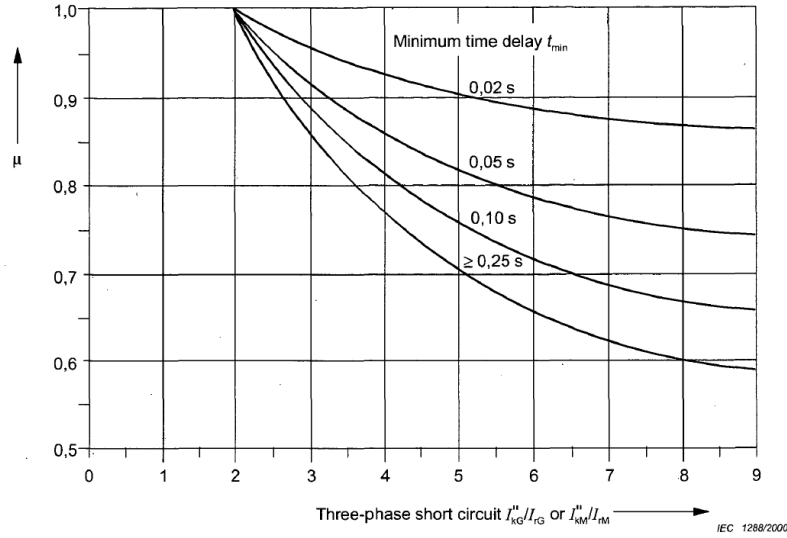
Formül 5.6'de;

I_a : Kısa devre açma akımı (*Amper*),

I_k'' : Başlangıç kısa devre (subtranziyent) alternatif akımı (*Amper*),

μ : En küçük açma gecikme çarpanı olarak ifade edilmiştir.

En küçük açma gecikme süresi, μ çarpanı ve I_k'' / I_{NG} oranına bağlı olarak Şekil 5.6'da verilen grafikten alınır. Burada I_{NG} kısa devreyi besleyen generatörlerin toplam gücüne karşı düşen anma akımıdır. Simetrik açma akımı kesicinin kontaklarının açılması sırasında $I_a = I_k'$ değerine eşittir ve bu durumda $\mu = 1$ 'dir.



Şekil 5.6. Kısa devre açma akımındaki μ parametresinin grafiksel değişimi (IEC 1288/2000).

- **Kısa devre açma gücü (S_b)**

Elektrik sistemlerinde meydana gelen kısa devre, mekaniksel olarak zorlamalara neden olmakta bu durumun incelemesi için açma akımı (I_b) ile birlikte açma gücü de (S_b) bilinmesi malzeme seçiminde daha uygun olmaktadır.

Minimum açma gecikmesi ($t \geq 0.1$ saniye) olması durumunda simetrik ve asimetrik devre açma akımları arasındaki fark ihmal edilebilecek kadar az olmaktadır (Erim B.,2015). Bundan dolayı üç fazlı sistemlerde simetrik kısa devre açma gücü kullanılmaktadır. Bu hesaplamalar Formül 5.7, Formül 5.8 ve Formül 5.9’da belirtildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$S_k'' = \sqrt{3} \times U \times I_k'' \quad (5.7)$$

$$S_a = \sqrt{3} \times U \times I_a \quad (5.8)$$

$$S_{a_{asm}} = \sqrt{3} \times U \times I_{a_{asm}} \quad (5.9)$$

Formül 5.7, 5.8 ve 5.9’da;

S_k'' : Başlangıç kısa devre gücü,

I_k'' : Başlangıç kısa devre (subtranziyent) alternatif akımı,

S_a : Simetrik açma gücü,

I_a : Kısa devre açma akımı,

$S_{a_{asm}}$: Asimetrik açma gücü,

$I_{a_{asm}}$: Asimetrik kısa devre açma akımı,

U : Kısa devre sonrası kesici kontakları arasındaki hat gerilimi olarak ifade edilmiştir.

5.2. İletim Nakil Hatlarında Meydan Gelebilecek Kısa Devre Çeşitleri

Alternatif akım güç sistemlerinde oluşabilecek arızaların çok büyük bir kısmı dengesiz olup, çok az bir kısmı ise dengelidir. Sistemin normal şartlar altında işletilmesi dengelidir, ancak sistemde bir kısa devre arızası, normal koşulları geçici olarak bozmaktadır (Kakilli, 2013). Arızalar pratikte, arızanın oluşma noktasına ve sistemin yapısına göre değişmekle birlikte oluşma sıklığı genellikle aynıdır.

Bir araştırmaya göre bu sıklık güç sistemlerinde;

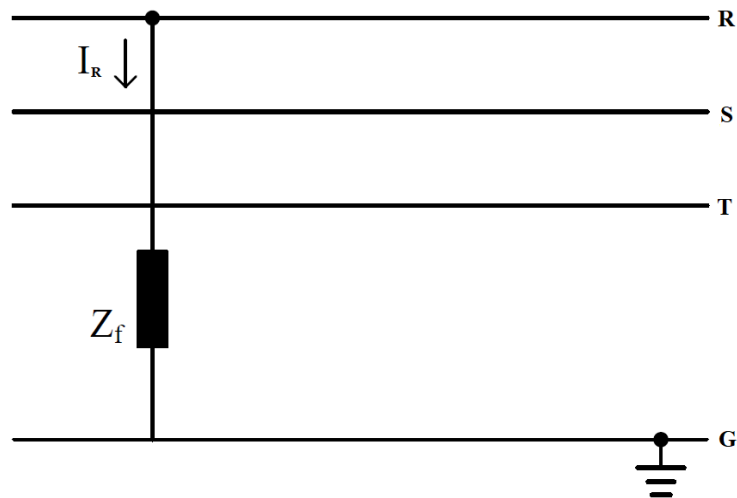
- Üç fazlı simetrik kısa devre için % 5
- Çift faz-toprak kısa devresi için % 10

- Faz-faz kısa devresi için % 15
- Faz-toprak kısa devresi için % 70

olarak belirlenmiştir (Erim, 2015). Bu veriler doğrultusunda üç fazlı sistemlerde kısa devre arızasının diğer arıza tiplerine nazaran daha az olduğu görülmektedir. Üç fazlı sistemlerde yaşanan kısa devre arızaları genellikle operasyonel hatalar sonucu meydana gelmektedir. Ancak güç sistemlerinde oluşan arızalar başlangıçta farklı tip bir kısa devre arızası olsa da, oluşan kısa devrenin süresine bağlı olarak en sonunda üç fazlı kısa devreye dönüşebilir. Üç fazlı simetrik kısa devre arızalarının hesaplamaları sadece doğru bileşen değeri bilinerek kolayca yapılabildiği halde, diğer kısa devre arıza çeşitleri hesaplamak için arıza tipine göre tüm bileşen empedanslarının belirlenerek, hesaplama yapılması gerekir (Erim, 2015).

5.2.1. Faz-toprak arasında meydana gelen kısa devre durumu

Faz iletkenlerinin herhangi birinin izolasyon delinmesi veya hatalı manevralarda atlama sonucu toprağa, nötr iletkenine veya toprak temaslı bir metalik gövdeye dokunması sonucunda faz-toprak kısa devresi meydana gelir. İletim sistemleri incelendiğinde en sık karşılaşılan kısa devre arızası faz-toprak kısa devre arızasıdır (Erim, 2015; Yılmaz, 2014). Şekil 5.7’de temsili olarak R fazının toprak teması sonucu oluşabilecek kısa devrenin sembolik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.7. Faz-toprak kısa devre genel gösterimi

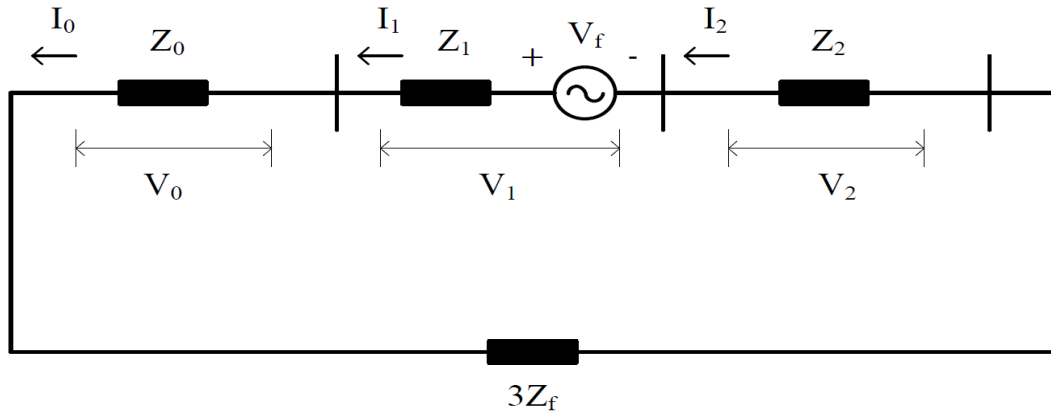
Şekilde 5.7’de verilen Z_f arıza empedansını ifade etmektedir. Diğer fazlarda arıza olmadığı için S ve T fazlarında arıza akımları sıfırdır. Z_f arıza empedansı kullanılması ile Formül 5.9, Formül 5.10 ve Formül 5.11 kullanılarak hesaplanabilir bu sayede sistemdeki akım ve gerilim değerleri incelenebilir.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & r & r^2 \\ 1 & r^2 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_R \\ I_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & r & r^2 \\ 1 & r^2 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = Z_f (I_0 + I_1 + I_2) \quad (5.11)$$

Formüllerde ifade edildiği şekilde tüm bileşen akımlar birbirine eşit ve bu üç bileşen akımın toplamı I_r akımına ulaşmaktadır. Bu sayede bir faz-toprak kısa devrenin kısa devre devresi çizilerek Şekil 5.8’de verilmiş ve arıza akımı hesaplamaları Formül 5.12 ve Formül 5.13’teki gibi hesaplanabilir.



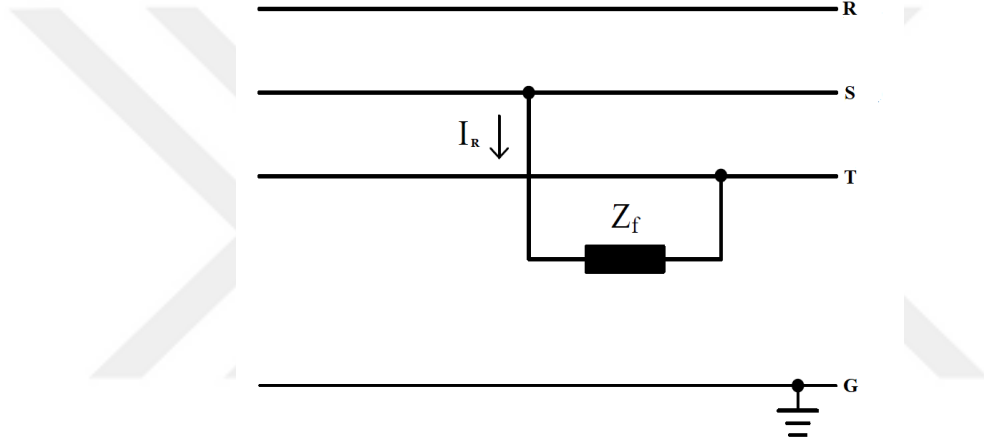
Şekil 5.8.Faz-toprak kısa devre bileşen devre gösterimi

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (5.12)$$

$$I_R = I_0 + I_1 + I_2 = \frac{3V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3Z_f} \quad (5.13)$$

5.2.2. Faz-faz arasında meydana gelen kısa devre durumu

İki iletkenin birbirine teması veya hatalı manevralar sonucu oluşan faz-faz arası meydana gelen kısa devre durumu, uygulamada faz-toprak arası meydana gelen kısa devre durumundan sonra en sık karşılaşılan ikinci kısa devre arızası olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 5.9'da S ve T fazları arasında meydana gelen kısa devre arıza durumu bu arıza tipini göstermek için kullanılmıştır.



Şekil 5.9. Faz-faz arası kısa devre genel gösterimi

S ve T fazlarında oluşan Faz-Faz kısa devresinde, bu iki fazın akımı mutlak büyüklük olarak birbirine eşit iken akım yönleri birbirine terstir. Arızaya dâhil olmayan R fazında ise akım değeri sıfırdır. Bu durum Formül 5.14'te belirtilmiştir.

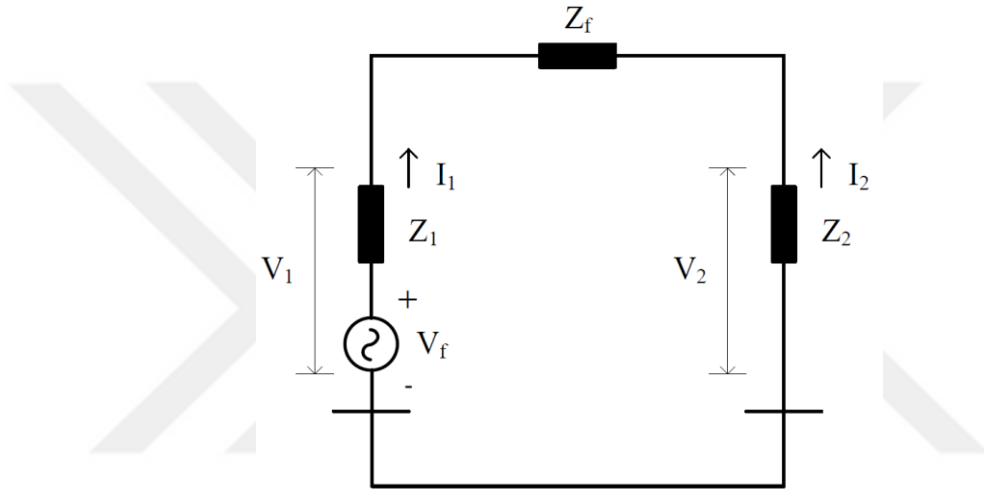
$$\begin{aligned} I_S &= -I_T, I_R = 0 \\ V_{Sg} - V_{Tg} &= Z_f I_S \end{aligned} \quad (5.14)$$

Faz-faz kısa devre arıza empedansı (Z_f) kullanılması ile simetrik bileşenler Formül 5.15 ile hesaplanabilir bu sayede sistemdeki akım ve gerilim değerleri incelenebilir.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & r & r^2 \\ 1 & r^2 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_s \\ -I_s \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(r - r^2)I_s \\ \frac{1}{3}(r^2 - r)I_s \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Formül 5.15'ten faydalanarak, I_s akımını değeri Şekil 5.10'da gösterilen devresinden Formül 5.16'da gösterilen matematiksel ifade elde edilebilir.

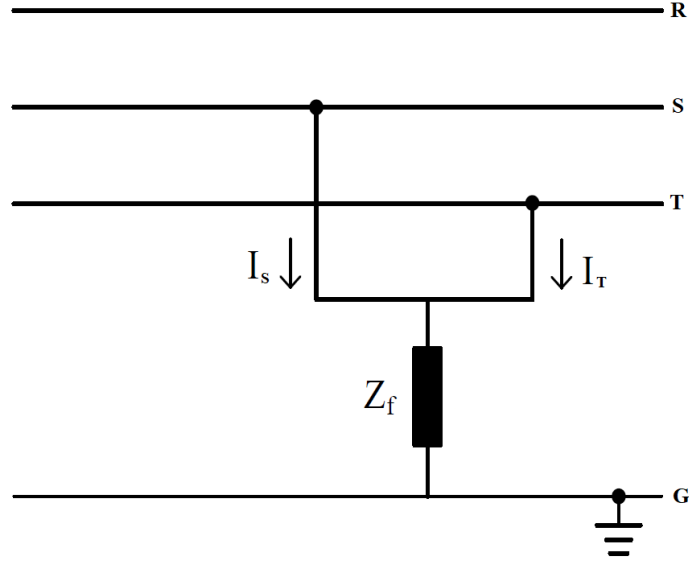
$$I_s = \frac{-j\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_f} \quad (5.16)$$



Şekil 5.10.Faz-faz kısa devre bileşen devre gösterimi

5.2.3. İki faz-toprak arasında meydana gelen kısa devre durumu

İki iletkenin toprakla veya toprakla irtibatlı iletkene temas etmesi sonucu iki faz-toprak kısa devre olayı meydana gelir. Pratikte çok nadir olarak meydana gelmektedir. S ve T fazlarının birbirine ve toprağa temasa sonucu oluşabilecek bir kısa devre durumu sembolik olarak Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



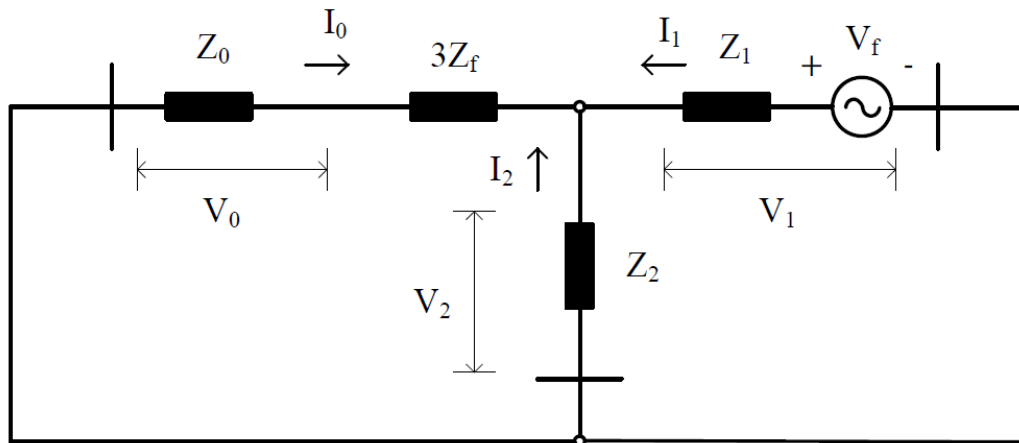
Şekil 5.11. İki faz-faz kısa devre genel gösterimi

Şekil 5.8’de gösterilen iki faz-toprak kısa devresinin genel ifadeleri Formül 5.17 ve Formül 5.18’de verilmiştir.

$$V_{Sg} = V_{Tg} = Z_f (I_S + I_T) \quad (5.17)$$

$$I_R = I_0 + I_1 + I_2 = 0 \quad (5.18)$$

S ve T fazlarında kısa devre arızasında toprağa karşı gerilimleri birbirine eşittir. Bu sayede Şekil 5.12’de gösterildiği gibi iki faz-toprak kısa devresini çizerek tüm bileşen akımları hesaplanabilir.



Şekil 5.12. İki faz-toprak kısa devre bileşen devre gösterimi

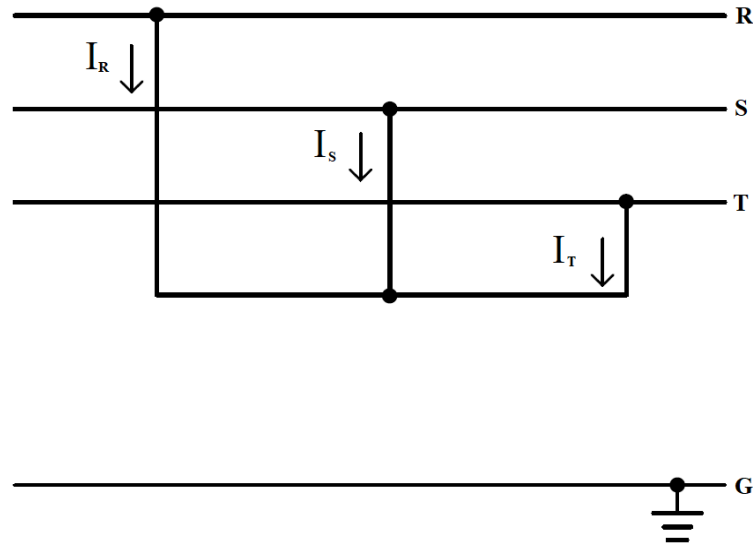
$$I_1 = \frac{V_f}{Z_1 + [Z_2(Z_0 + 3Z_f)] / (Z_2 + Z_0 + 3Z_f)} \quad (5.19)$$

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0 + 3Z_f}{Z_0 + 3Z_f + Z_f} \quad (5.20)$$

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{Z_0 + 3Z_f + Z_2} \quad (5.21)$$

5.2.4. Üç faz arasında meydana gelen kısa devre durumu

Simetrik bir arıza olan üç fazlı kısa devre arızası pratikte en az karşılaşılan bir kısa devre çeşidi olarak uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Ancak bazı kısa devre durumları başlangıçta farklı bir kısa devre çeşidinde başlayarak, sonuçta üç fazlı kısa devre arızasına dönüşmektedir. En yüksek kısa devre akımı da üç faz kısa devrede durumunda meydana gelmektedir. Üç fazın birbirine teması sonucu oluşabilecek kısa devre durumu sembolik olarak Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13.Üç faz kısa devre genel gösterimi

Üç fazlı kısa devre arızasında faz gerilimleri birbirine eşit ve sıfırdır. Bu sayede bileşen akımları da Formül 5.22 ve Formül 5.23'te ifade edildiği şekilde hesaplanabilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & r & r^2 \\ 1 & r^2 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

$$I_R = \frac{V_f}{Z_1} \quad (5.23)$$

I_R faz iletkeninde meydana gelen iç faz kısa devre akımının değeri olup tüm fazlarda meydana gelen kısa devre akımının mutlak değerleri birbirine eşittir ($I_R = I_S = I_T$).

5.3. Kısa Devre Akımının Neden Olabileceği Termik Etki

Kısa devre akımının büyüklüğü arızanın tipine, süresine, arıza noktasına ve şebekenin tipine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu yüzden işletmedeki kontrol ve şalt cihazları, kısa devre tipine bağlı olarak beklenen ısınma sıcaklığının kat ve kat üzerinde ısı etkisine maruz kalarak malzemelerin sıcaklığı çok yüksek sıcaklıklara ulaşmasına sebep olabilir. Şebekelerde kullanılan şalt ve kontrol cihazlarının taşınması gereken kısa devre akımlarının aynı standartlarda seçilebilmesi için anma kısa süre akımı veya bir saniyelik akım olarak da bilinen I_{th} değeri belirlenerek referans alınması gerekir. Anma kısa devre akımı (I_{th}), işletme cihazlarının bir saniyede zarar görmeden dayanabileceği akımın etkin değeri olarak bilinir. I_m , kısa devre akımının doğru ve alternatif akım bileşenleri ile devrenin toplam açılma süresi zarfında meydana getireceği ısı miktarını bir saniyede meydana getirebilen akımın etkin değeri olarak tanımlanabilir (Kaşıkçı, İ. 2007). Bu bağlamda işletmedeki cihazların anma kısa devre akımı (I_{th}) değeri, kısa devre akımının termik tesirli ortalama değeri I_m 'den büyük olmalıdır. Ardı ardına gerçekleşen kısa devre olaylarında I_m hesaplaması ise Formül 5.24'te verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$I_m = \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + \dots + I_{mn}^2} \quad (5.24)$$

I_{th} 'ın değerinin hesaplanabilmesi I_k'' değerinin bilinmesi gereklidir. I_k'' 'ın değeri Formül 5.25'teki verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$I_k'' = \sqrt{(m + n) \frac{t}{1s}} \quad (5.25)$$

Formül 5.25'te;

m : Doğru akım bileşeninin etkisi,

n : Alternatif akım bileşeninin etkisi,
 t : toplam açma süresi (saniye) olarak ifade edilmiştir.

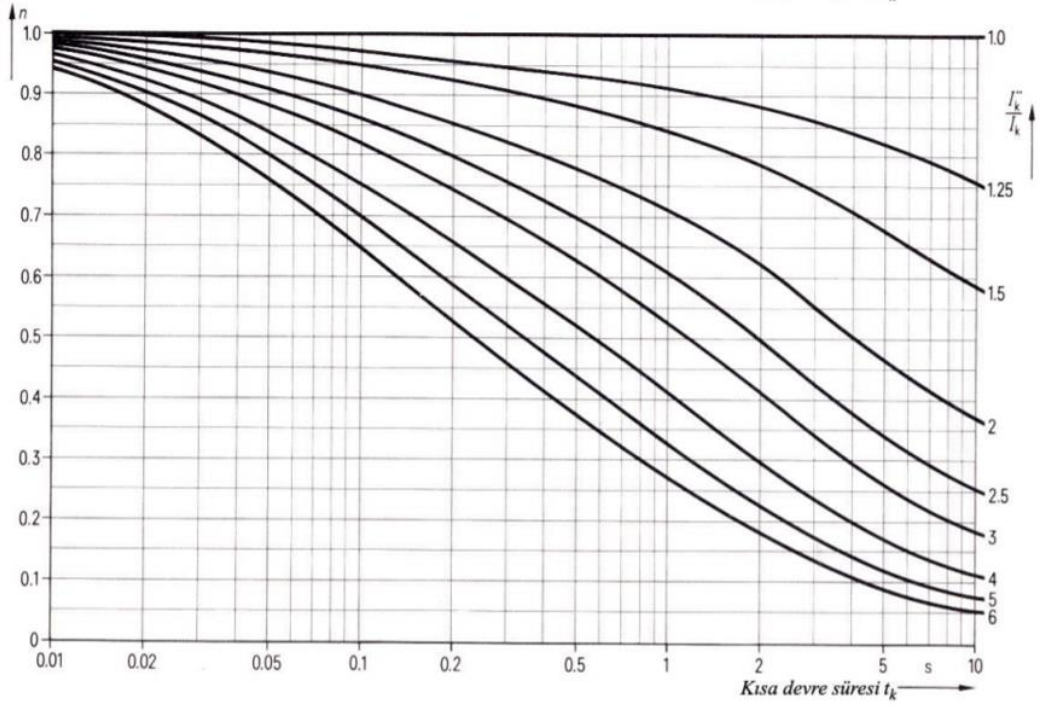
Anma akımı değeri I_{th} hesaplanırken doğru akım bileşen (m faktörü) ve alternatif akım değeri (n faktörü) hesaba katılır. I_{th} hesabı Formül 5.26'da ifade edilmiştir.

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m + n)} \quad (5.26)$$

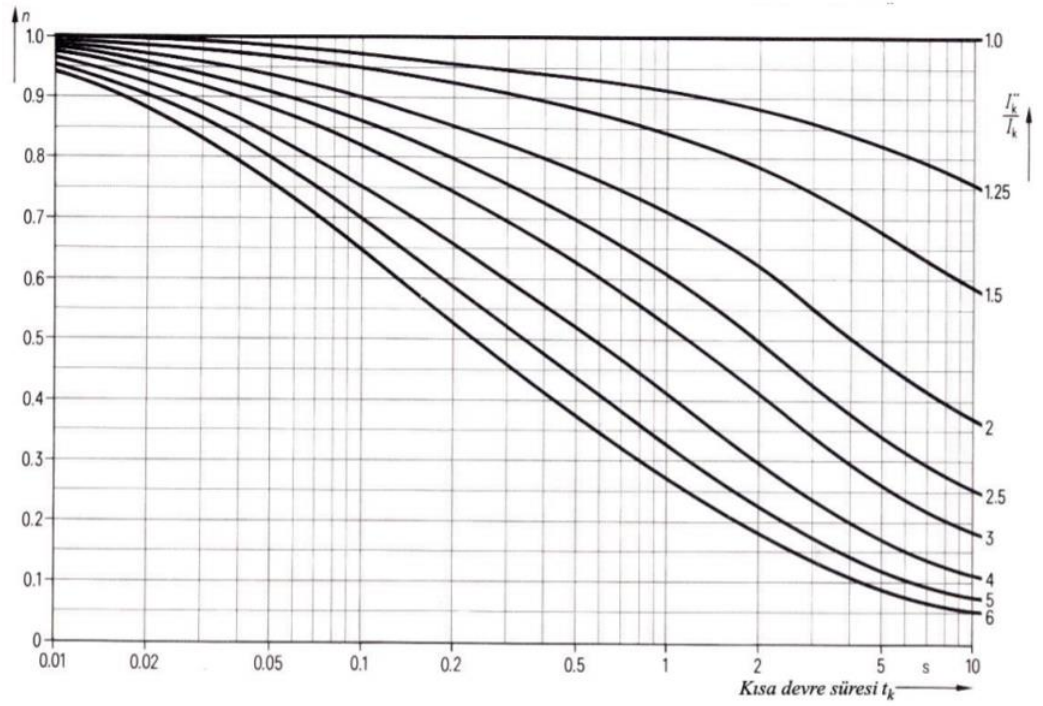
Generatörden uzata meydana gelen kısa devre durumunda oluşacak akım $I_k = I_k''$ olduğundan Şekil 5.14'te gösterildiği üzere $n=1$ 'dir. Bu sayede I_{th} hesaplaması generatörden uzak kısa devre için Formül 5.27'de verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{(m + 1)} \quad (5.27)$$

Doğru akım bileşeni (m faktörü) ve alternatif akım bileşeni (n faktörü) ortaya çıkabilecek bir kısa devre akımının değeri ve kısa devre süresine bağlı olarak değişimi Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te gösterilmiştir.



Şekil 5.14. Tepe faktörü (κ) ve kısa devre süresi (t_k)'nin bir fonksiyonu olan m faktörü (Erim, 2015).



Şekil 5.15. Kısa devre süresi (t_k) ve I_k'' / I_a oranının bir fonksiyonu olan n faktörü (Erim, 2015).

5.4. Elektrik Enerji Tesislerinin ve İşletme Cihazlarının Maruz Kalabilecekleri Mekanik Etkiler ve Dayanımlarının Belirlenmesi

Elektrik enerjisi iletim ve dağıtımda kullanılan şebekelerde bulunan işletme cihazları şebekede meydana gelebilecek bir kısa devre durumu, ani olarak yük akımında meydana gelebilecek dalgalanmalar ve şebekenin maruz kalacağı ortamda bulunan hava koşullarının durumuna bağlı olarak (ortamın nemliliği, ortamın sıcaklığı {-35 °C ile +40 °C}, Kar ve Buz Yükü, Rüzgâr ve Fırtına vb..) değişimi gibi sebeplerden dolayı mekanik olarak zorlanmalara maruz kalırlar. AC (alternatif akım) işletmelerinde oluşan bir kısa devre arızası baralar da ve iletkenlerde rezonans olayına sebep olur. Bundan dolayı elektrodinamik kuvvetlerin temel frekansları, elektrik enerjisindeki teçhizatın öz frekanslarından daima büyük olmalıdır (Kaşıkçı, İ. 2007). Kısa devre sonucu baraların bükülmeye karşı zorlanmasına ilişkin hesaplama; ana baralar üzerinde oluşan bükme gerilmesi Formül 5.28, tali baralar üzerinde oluşan bükme gerilmesi ise Formül 5.29'dan hesaplanabilir.

$$\sigma_m = V_\sigma \times V_r \times \beta \times \frac{F_m \times L_m}{8 \times Z_m} \quad (5.28)$$

Formül 5.28'de;

σ_m : Ana baralar üzerinde oluşan bükme gerilmesi (N/m^2),

V_σ : Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (*Katsayı*),

V_r : Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (*Katsayı*),

β : Mesnetleme şekli ile ilgili çarpan (*Katsayı*),

F_m : Ana baralar arasında meydana gelen kuvvet (N),

L_m : Ana baraların iki mesnet noktası arasındaki uzaklık (m),

Z_m : Ana iletkenlerin kesit atalet momenti olarak ifade edilmiştir (m^3).

Üç faz sistemlerde kapama yapılmıyor ise V_σ ve V_r 'nin katsayı değerleri 1, kapama yapılıyor ise 1.8 olarak alınır. Bu katsayı DC tesislerde 2, AC tesislerde ise 1 olarak kabul edilmektedir (Sallam ve Malik, 2019). Mesnetleme çarpanı (β) değeri baralar izolatör üzerinde kayacak şekilde yerleştirilirse $\beta = 0.73$, baralar izolatör üzerine sabitlenmesi durumunda ise $\beta = 0.5$ olarak alınır (IEC 60296 ; EAE 2020).

$$\sigma_s = V_{\sigma_s} \times V_{r_s} \times \frac{F_s \times L_s}{16 \times Z_s} \quad (5.29)$$

Formül 5.29'da;

σ_s : Tali baralar üzerinde oluşan bükme gerilmesi (N/m^2),

V_{σ_s} : Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (*Katsayı*),

V_{r_s} : Dinamik zorlanmalara ilişkin çarpanlar (*Katsayı*),

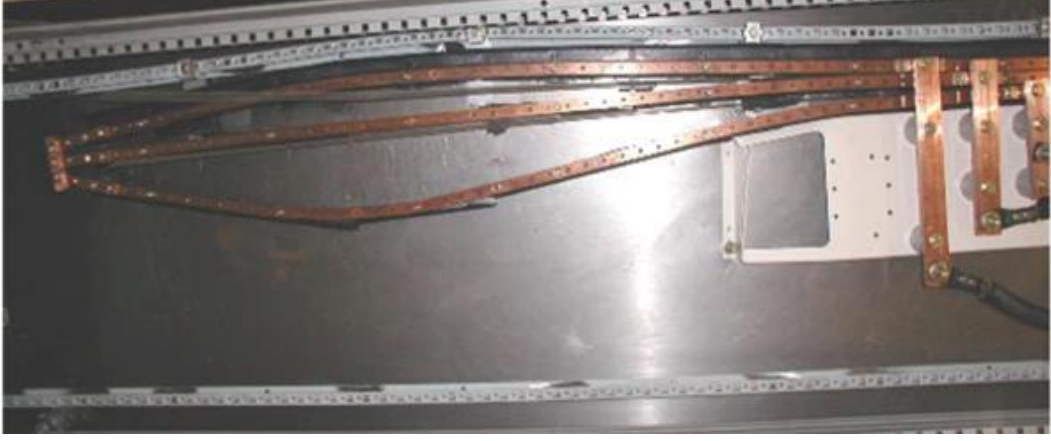
F_s : Tali baralar arasında meydana gelen kuvvet (N),

L_s : Tali baralar arasında kullanılan iki komşu ara destek elemanı arasındaki en büyük mesafe (m),

Z_s : Tali iletkenlerin kesit atalet momenti olarak ifade edilmiştir (m^3).

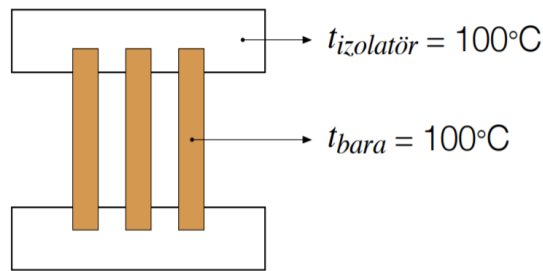
Ana baralar da olduğu gibi tali baralarda da benzer durum söz konusudur. Üç faz sistemlerde kapama yapılmıyor ise V_{σ_s} ve V_{r_s} 'nin katsayı değerleri 1, kapama yapılıyor ise 1.8 olarak alınır. Bu katsayı DC tesislerde 2, AC tesislerde ise 1 olarak kabul edilmektedir (Sallam ve Malik, 2019).

Meydana gelebilecek mekanik zorlama kuvvetlerine sistemde bulunan baraların ve mesnet izolatörlerin dayanması gerekir. Bundan dolayı elektrik tesislerinde cihazlar ölçülendirilirken ve seçilirken bunların kurulu olduğu yerlerde oluşabilecek en büyük kısa devre darbe akımı (I_p) göz önüne alınarak bu akımın meydana getirebileceği mekanik zorlanmalara dayanacak şekilde şebeke elemanlarının seçilmesi gerekir. Özellikle sistemde kullanılan plastik malzemelerin sistemde oluşacak ısı ve mekanik zorlanmalara dayanacak şekilde seçilmeleri gerekir. Yine sistemde kullanılan şalt cihazlarının kontaklarının bu zorlanma akımında kendiliğinden açmasına dikkat edilmelidir. Şalt kontaklarının tekrar açılmasına müsaade edilmesi durumunda kontakların birbirine tamamen kaynamasına sebep olabilecek arızalar durumlarının da önlenmesi gerekir. Mekanik zorlamalar sonucu baralar da oluşabilecek şekil değişimlerine örnek olması açısından bir kısa devre arızası sonucu baralar da meydana gelen şekil değişimleri Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Şekil 5.16.Baraların mekanik zorlamalara maruz kalması sonucu birbirlerine doğru eğilmesi (EAE,2020).

Baralar da oluşan bu eğilmelerin önlenmesi için baraların montajı esnasında kullanılacak mesnet izolatörlerinin yeri ve aralarındaki açıklık mesafe değerlerinin çok iyi tespit edilmesi gerekir. Bunun için oluşabilecek bir kısa devre durumunda akımın baralar arasında oluşturabileceği mekanik kuvvetler ve ısı etkisi dikkate alınır. Kısa devre akımının baralar üzerinde oluşturabileceği ısının neden olabileceği sıcaklık değerinin azaltılması için gerekli tedbirler (Baralar arası minimum seçilmesi gereken mesafe vb..) alınmalıdır. Bu yüzden baralar ile temas halinde olan tüm ekipmanların (izolatör, akım trafosu vs.) ısıl dayanımları da göz önünde bulundurulmalıdır. Elektrik şalt dolaplarında bulunan elektrik ekipmanlarının sıcaklıkları ile ilgili durum Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17.Elektrik şalt dolaplarında baraların sıcaklığı 100 °C’yi geçmemelidir (EAE, 2020).

Baraların ısıl dayanımlarının yanı sıra, bara ile temas halinde olan izolasyon malzemesinin dayanımı da önem arz etmektedir. İzolasyon ısınmaları kısa sürelidir bu yüzden izolasyon malzemelerinde kısa süreli ısıl dayanımları yüksek olmalıdır.

6. RÜZGÂR ENERJİ SANTRALİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZ ÇALIŞMASI

Bu bölümde örnek bir RES üzerinde farklı senaryolar sonucu sistemdeki yük akışları ve kısa devre analizleri incelenmiştir. Ele alınan örnek RES santrali Digsilent PowerFactory v15.1 programı ile modellenmiştir. RES kısa devre modelleme senaryosu çalışmasında kullanılan Digsilent PowerFactory v15.1 programının çalışmamız için gereken kısımları alt başlıklarda belirtilmiştir.

Öncelikle bu bölümde rüzgâr santrallerinin şebekeye bağlanmasındaki kriterlere değinilmiştir. Özellikle büyük güçteki rüzgâr santrallerinin ulusal şebeke üzerinde önemli etkileri olabilir. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlantı ölçütlerinin iyi derecede etüt edilmesi çok büyük önem arz eder. Bu ölçütleri aşağıdaki konu başlıkları ile sıralamak mümkündür;

1. Frekans ve aktif güç
2. Kısa devre gücü ve gerilim değişimleri/dalgalanmaları
3. Reaktif güç kontrolü
4. Gerilim kırışması
5. Harmonikler
6. Kararlılık

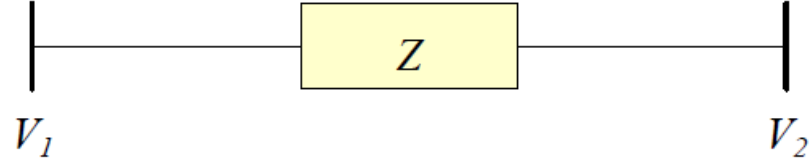
Rüzgâr türbinleri dağıtım ve iletim sistemlerine genellikle bir transformatör aracılığı ile bağlanır. Bir arıza oluşması durumunda rüzgâr türbininin şebekeden ayırmak için koruma sistemlerine ihtiyaç duyulur. Koruma sistemi şebeke gerilimini ve frekansı korumak amacıyla aşağıdaki durumlar biri oluşmadan sistemi açmalıdır;

1. Gerilim yükselmesi tek faza ilişkin gerilim seviyesinin % 15'ine ulaşmadan önce,
2. Gerilim düşümü % 30 seviyelerine ulaşmadan önce,
3. Frekans sapması 2 Hz seviyesine ulaşmadan önce.

Aynı zamanda rüzgâr türbinleri bazı durumlarda gerilim dalgalanmalarına sebebiyet verir ki bu oran % 2'lik seviyeyi geçmemelidir.

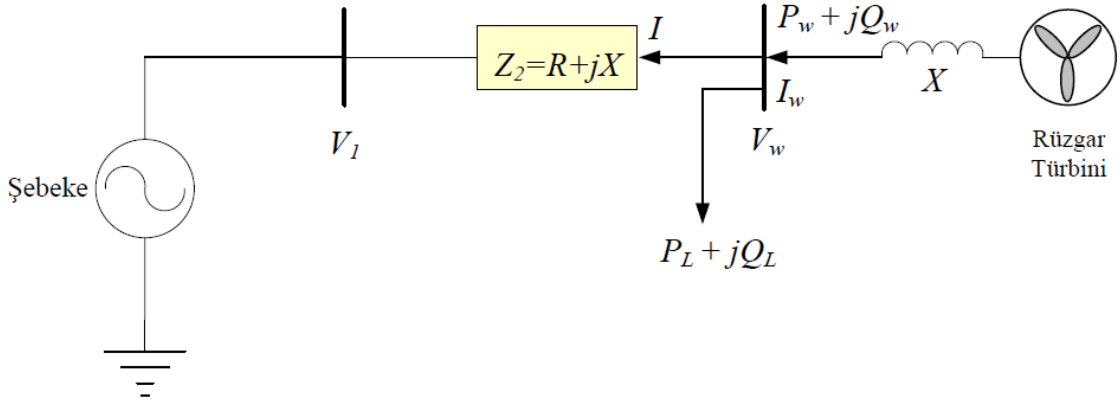
Güç sistemleri analiz edilirken yükler, iletim hatları ve transformatörler Z empedansı ile temsil edilir. Bu empedans üzerinden bir akım artışı söz konusu ise

empedansın öncesinde ve sonrasında oluşan gerilim V_1 ve V_2 ile Şekil 6.1'deki gibi gösterilebilir.



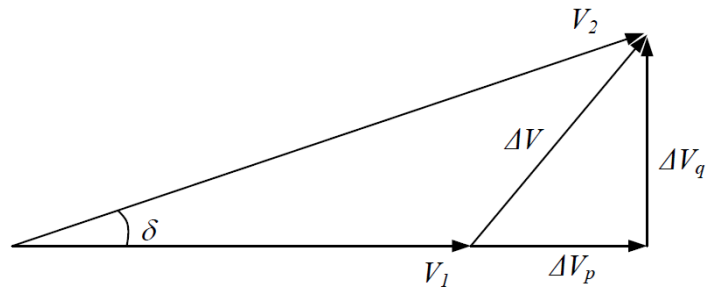
Şekil 6.1. I akımı altında Z empedansının her iki ucundaki gerilimler

Şekil 6.1'de Z empedansı üzerinden gerilim düşümü $V_1 - V_2 = Z \cdot I$ şeklinde hesaplanabilir. Şekil 6.2'de bir rüzgâr türbininin şebeke ile paralel çalışması durumunda yapı modellenmiştir.



Şekil 6.2. Bir rüzgâr türbinine ilişkin şebeke bağlantısı

Şekil 6.3'te ise bir rüzgâr türbinine ait şebeke bağlantısı fazörel olarak gösterilmiştir. Burada şebeke empedansı Z , gerilim kaynağını ise V_1 ile temsil edilmiştir. Aynı zamanda rüzgâr türbininin bağlandığı noktadan yüklerde beslenmektedir.

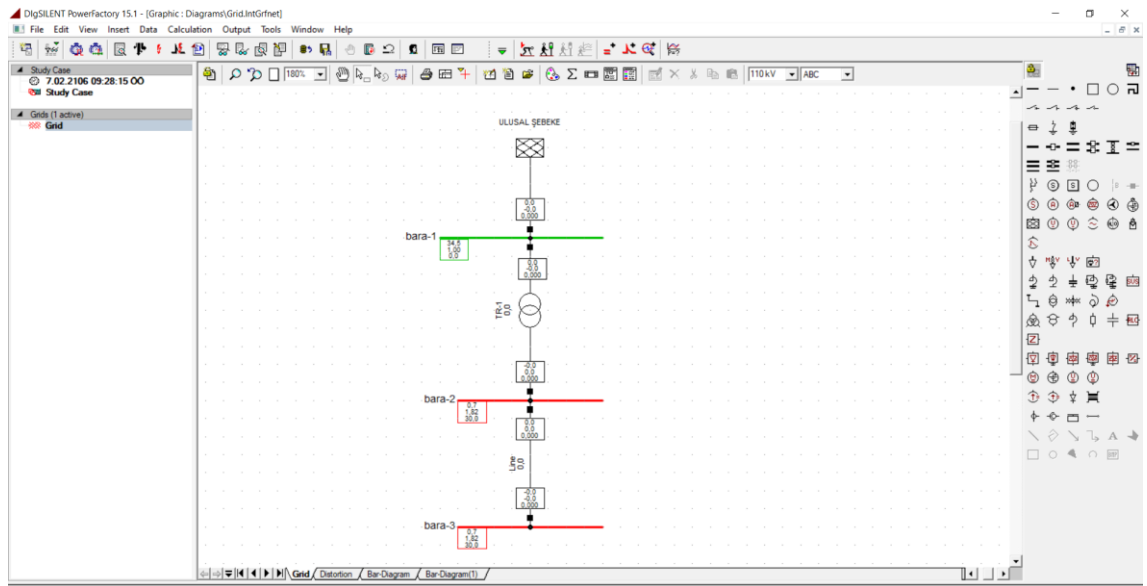


Şekil 6.3. Rüzgâr türbin sistemi ile şebeke bağlantısının fazörel olarak gösterilmesi

Elektrik şebekelerinde kısa devre gücü şebekenin performansının bir ölçüsünü gösterir. Aynı zamanda kısa devre gücü, gerilim kalitesi üzerinde de etkisi söz konusudur. Rüzgâr hızındaki değişiklik, güç üretimindeki değişikliğe, güç üretimindeki değişiklik ise Z empedansı üzerinden akan akımın miktarındaki değişikliğe sebebiyet verir. Bu akımın değişimi V_2 gerilimde değişikliğe neden olur. Kısa devre gücü küçük olan bir şebeke de (zayıf şebeke), Z empedansı büyük ise gerilim dalgalanmaları da büyük olur. Kısa devre gücü büyük olan bir şebeke de ise (güçlü şebeke), Z empedansı küçük ise gerilim dalgalanmaları da küçük olur. Bu durumda şebekenin bozucu etkilere karşı kararlılığını sürdürebilme kabiliyeti kısa devre gücü ile doğrudan ilgilidir.

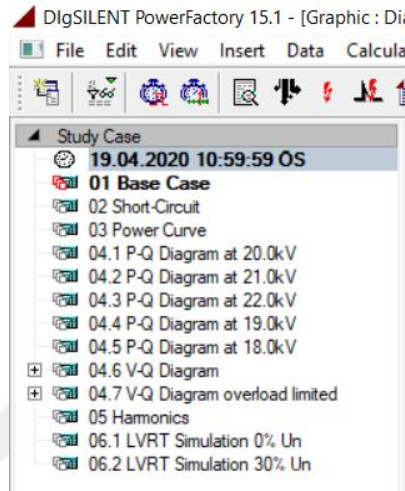
6.1. Digsilent PowerFactory Programı Tanıtımı

Digsilent programı sayesinde güç sistemlerinin çalışması için sistem açısında kritik ve önemli olan sistem parametrelerinin belirlenmesi için gereken parametre değerlerinin belirlenmesi işlemi bu simülasyon programı ile doğru seçilip seçilmediği işlemi test edilebilmektedir. Simülasyon programına girilen güç sistemi verileri sayesinde yük akış analizi, kısa devre analizi gibi çalışmalar çok kolay bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunun için öncelikle simülasyon programına güç sistemi modellenmesi için gerekli olan veriler girilir. Programın örnek bir grafik arayüzü Şekil 6.4'te verilmiştir.



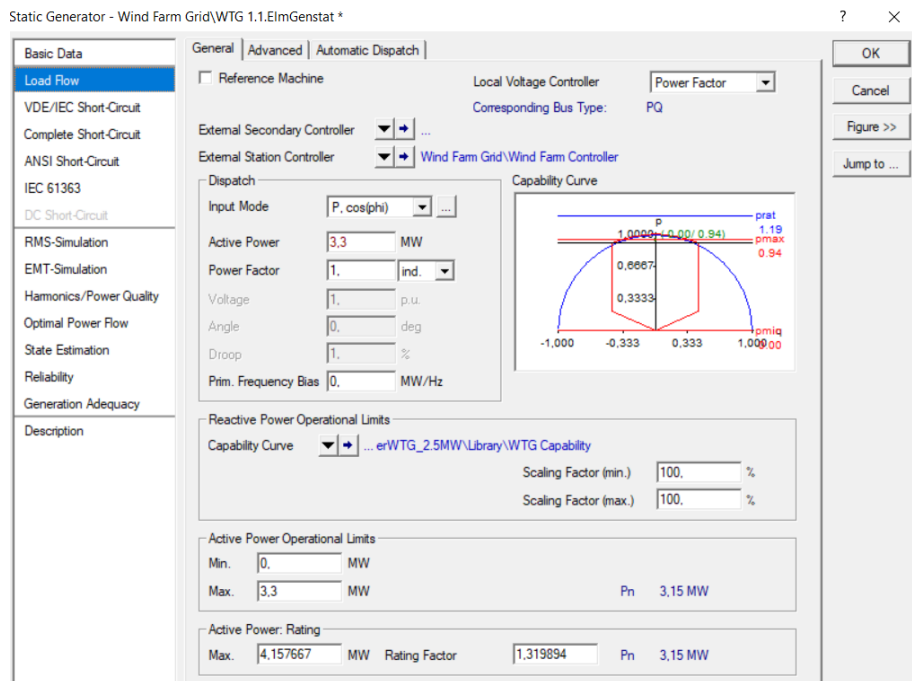
Şekil 6.4. PowerFactory programı grafik arayüzü

Programda bir projenin oluşturulması modellenecek güç sisteminin yapısına ve kullanıcının tercihine bağlıdır. Kullanıcı sistem karmaşıklığını önlemek için güç sistemin gruplar halinde şebekenin altına oluşturabileceği gibi şebeke altına direk olarak da tanımlayabilir. Örnek bir çalışma alanının nasıl oluşturulacağı Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



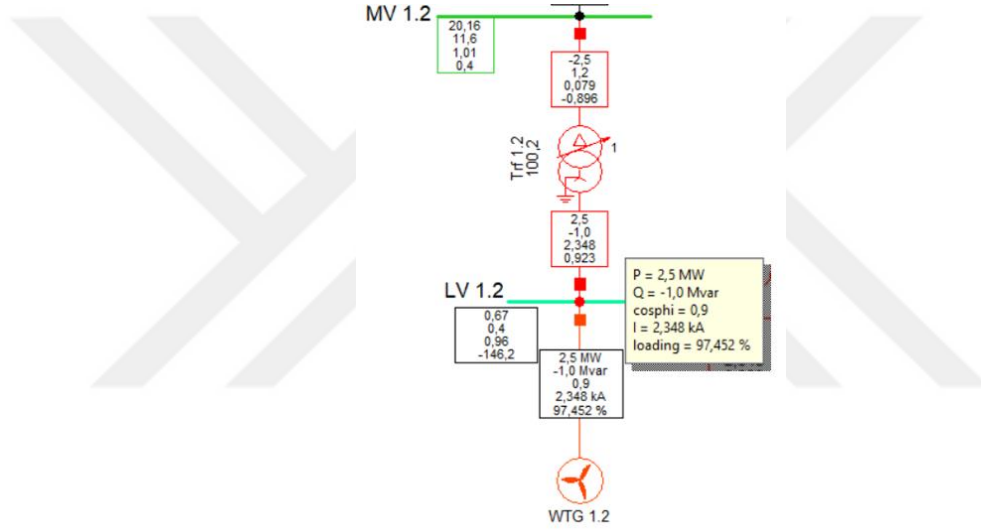
Şekil 6.5.PowerFactory programı proje çalışma alanı oluşturulması

Şekil 6.5'te gösterildiği gibi projeler oluşturulduktan sonra, projelerin altına sistem bileşenleri tanımlanabilir. Sistemde bulunan hatlar, transformatörler, kesiciler, ayırıcılar gibi bileşenler eklenebilmektedir. Sistem bileşenlerinin oluşturulması ve verilerin girildiği bölüm Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6.PowerFactory programı veri giriş ana penceresi

PowerFactory programında yapılabilecek simülasyon hesaplamalarından biriside sistem yük akışı analizinin yapılabilmesidir. Bilindiği üzere yük akış hesabı güç sistemlerinin kararlı durumda çalışmalarını sağlamak için gerekli analizlerin yapılmasında kullanılır. Güç sistemlerinde kararlı durum, güç sistemindeki değişkenlerin, analiz boyunca değişmediği sabit olarak kaldığı durumu temsil eder. Yük akış analizinde trafoların, baraların ve kabloların yükleme yüzdesi, aktif ve reaktif güç değerleri, gerilim değeri, akım değeri görülebilir. Programda yük akış analizi yapılırken tüm sistemin yük akış analizi veya sistemin gereken bir bölgesinin yük akışı analizi de yapılabilir. Örnek bir tek hat şemasının yük akış analizi için hazırlanan simülasyon şeması Şekil 6.7’de verilmiştir.

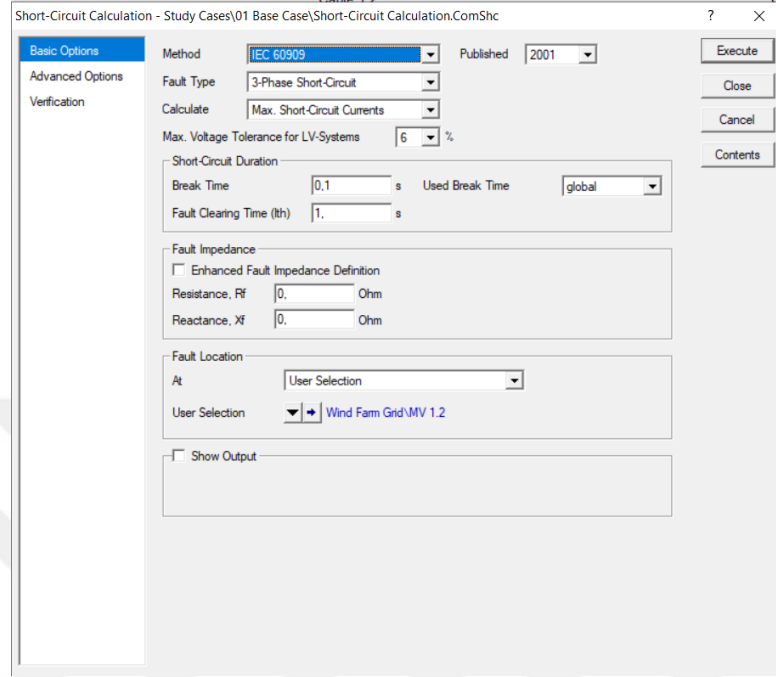


Şekil 6.7. PowerFactory programı örnek bir yük akış analizi

PowerFactory programında yapılabilecek diğer bir hesaplama da kısa devre hesaplama analizleridir. Programda yapılabilecek kısa devre hesaplamaları bazı standartlar esas alınarak hesaplanacak şekilde ele alınmıştır. Bu standartlar sırası ile VDE 0102, IEC 60909, ANSI, IEC 61363, IEC 61660 (DC), ANSI/IEEE 946 (DC) standartlarından oluşmaktadır. Devre analizi hesaplamalarında kullanılan Superpozisyon yöntemiyle devre çözüm yönteminin kolay olması sebebiyle bu esası kullanan IEC 60909 standardı hesaplamalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Berizzi, 1994).

Güç sistemi modellendikten sonra, sistemin istenilen noktadaki bir kısa devre analizi çok kolay bir şekilde yapılabilir. Simülasyon programında istenen noktadaki kısa devre akımının değerinin ne olacağını görmek için tek hat şeması üzerinde belirlenen noktaya gidilir ve fare tuşundaki sağa tuşa tıklanır ve orada açılan pencere menüden “Calculate” seçeneğine seçilir ve karşımıza oradan açılan pencere menüsünden “Short

Circuit” seçeneğine tıklanır. Şekil 6.8’de gösterilen menü penceresinden hesaplama metodu olarak IEC 60909 seçilir ve menüde “Execute” butonuna tıklanarak hesaplama işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 6.8. PowerFactory programı örnek bir kısa devre analizi hesaplama ekranı

6.2. RES’in Digsilent PowerFactory Programında Modellenmesi

Tez çalışmasının ilk aşamasında gerçekleştirilen rüzgâr hızı tahmini Konya’nın Altınekin ilçesi, Ardıçlı mevkiine ait olarak gerçekleştirilmiştir. Bölgenin rüzgâr hızı için uygun olduğu ön görülmüştür ve santral modellenmesi bu bölge için gerçekleştirecek ve yük akış ve kısa devre analizi çalışması yapılacaktır. Bu sayede santralin koruma ekipmanları daha güvenilir bir şekilde seçilmesi sağlanacak ve işletme maliyeti açısından da gerekli olan verimlilik şartı da göz önüne alınarak yatırım maliyeti için gereken verim kriterleri sağlanmış olacaktır. Bu tez çalışmasında uygulamada en fazla meydana gelen tek faz-toprak kısa devre hata durumları dikkate alınmıştır. Şebeke üzerinde bu hatanın ortaya çıkması muhtemel noktalar belirlenmeye çalışılmış ve bu hata durumu için değişik senaryolar üretilmeye çalışılmıştır. Belirlenen senaryo durumları için şebeke üzerinde güvenli bir şekilde güç akışını sağlamak üzere tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar hakkında çözüm önerilerinde bulunulmuştur.

Tez çalışması için konu olarak seçilen RES santralının modellenmesi ve kısa devre analiz çalışmasında Digsilent Powerfactory programının kullanımına karar verilmiştir. Çalışmamızda hangi programı kullanacağımıza karar verirken bu program paketinin şu özellikleri dolayısıyla seçilmiştir. Bu şebeke analiz yazılım programı, gelişmiş görselleştirme özelliğine sahip olması, şebekeye ait tertibatın kütüphane olarak çok kolay bir şekilde eklenebilmesi, kullanıcı ara yüzünün kullanıcının isteği doğrultusunda özelleştirilebilmesi gibi bir takım üstün özellikleri göz önünde bulundurulduğunda diğer şebeke analiz programlarının önüne geçen bir şebeke analiz programı olması nedeniyle bu çalışma için seçilmiştir.

Tez çalışmasına geçmeden önce çalışmamızın alt yapısı oluşturmak için rüzgâr türbin sistemi; transformatör, baralar ve yüklerden oluşturulmuş ve santral iki radyal koldan ana dağıtım barasına bağlanmıştır. Radyal kollar 4-3 olarak sıralanarak toplam 7 rüzgâr türbininden oluşturulmuştur. Modellenen örnek sistem 23.1 MW kurulu güce, 250 MVA kısa devre gücüne sahip ve 34,5 kV'luk ana dağıtım barasından beslenmekte olan toplam 17 baralı bir güç sistemidir. Rüzgâr türbinlerinin her birinde 6.3 MVA gücünde 0.69/34.5 kV yükseltici transformatör bulunmaktadır. Güç sistemi modellenirken güce uygun olarak ana dağıtım kabloları $1 \times 185 \text{ mm}^2$ XLPE kablo, rüzgâr türbini elemanlarının birbirine bağlantısında $1 \times 95 \text{ mm}^2$ XLPE kablo kullanılmıştır. Bu kapsamda üzerinde çalışma yapılan RES'e ait kurulu güç bilgileri ve RES'e ait önemli veriler Tablo 6.1'de verilmiştir.

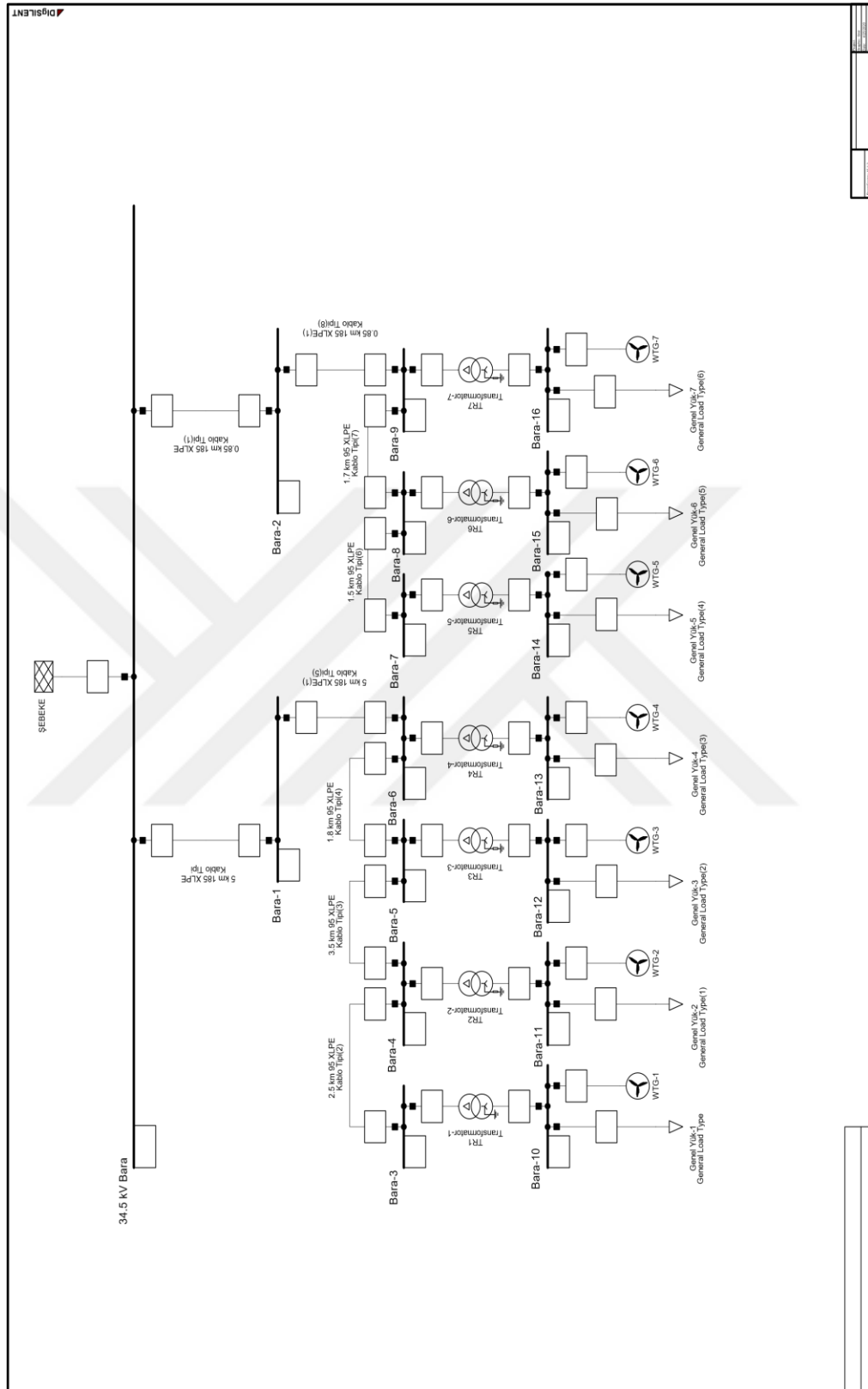
Tablo 6.1.Modellenecek rüzgâr santraline ait veriler

Cinsi	Özelliği	Sayısı
Rüzgâr santralinin kurulu gücü	23.1 MW	1
Rüzgâr türbin gücü	3.3 MW	7
Rüzgâr türbin modeli	Siemens Gamesa G132	7
Türbin devreye girme hızı	3 m/s	7
Türbin devreden çıkma hızı	25 m/s	7
Kule yüksekliği	100 metre	7
Generatör tipi	Sabit mıknatıslı doğrudan tahrikli makine	7
Ana dağıtım kablosu	$1 \times 185 \text{ mm}^2$ XLPE kablo	4
Türbin bağlantı kablosu	$1 \times 95 \text{ mm}^2$ XLPE kablo	5

Cinsi	Özelliği	Sayısı
Transformatör gücü	6.3 MVA	7
Transformatör tipi	0.69 / 34.5 kV, yükseltici	7
Şebeke kısa devre gücü	250 MVA	1

Analizleri yapılacak güç sisteminin Digsilent Powerfactory programı ile modellenmesine ait güç akış diyagramı Şekil 6.6'da gösterilmiştir.





Şekil 6.9. Digsilent Powerfactory programında çizilen RES'e ait tek hat güç akış şeması

6.2.1. Rüzgâr Türbini

Modellemesi yapılan güç sisteminde toplam 7 adet Siemens marka Gamesa G132 modeli 3.3 MW gücünde rüzgâr türbini bulunmaktadır. Türbinler ana dağıtım şebekesine orta gerilimden senkron bir şekilde 0.69 kV / 34.5 kV anma gerilimine sahip 6.3 MVA anma gücünde bir yükseltici transformatör üzerinden bağlanmıştır. RES tarafındaki çıkış gerilimi düşük 0.69 kV'luk baralara 2 radyal koldan 4-3 şeklinde bağlanmıştır. Analizlerin yapılabilmesi için gereken türbinlere ait Tablo 6.1'de karakteristik değerleri programa uygun şekilde girilmiştir. Şekil 6.10'da rüzgâr türbinlerine ait temel özelliklerin girildiği ekran pencere görüntüsü, Şekil 6.11'de ise türbinin karakteristik özelliklerinin girildiği ekran pencere görüntüsü verilmiştir.

Static Generator - Grid(WTG-1.ElmGenstat)

Basic Data

General | Zero Sequence/Neutral Conductor

Name: WTG-1

Terminal: Grid/Bara-10.Cub_3

Zone: ...

Area: ...

Technology: 3PH

Category: Wind Generator

Number of parallel Machines: 1

Ratings

Nominal Apparent Power: 3.67A MVA

Power Factor: 0.9

Model: ...

Şekil 6.10. Rüzgâr türbinlerinin temel verilerinin girişi

Static Generator - Grid(WTG-1.ElmGenstat)

Basic Data

Advanced | Automatic Dispatch

Local Voltage Controller: Power Factor

Corresponding Bus Type: PQ

External Secondary Controller: ...

External Station Controller: ...

Dispatch

Input Mode: P, cos(phi)

Active Power: 3.3 MW

Power Factor: 1, ind.

Voltage: 1, p.u.

Angle: 0, deg

Droop: 1, %

Prim. Frequency Bias: 0, MW/Hz

Capacity Curve

Reactive Power Operational Limits

Min: -1, p.u. -3.5 Mvar Scaling Factor (min.): 100, %

Max: 1, p.u. 3.5 Mvar Scaling Factor (max.): 100, %

Active Power Operational Limits

Min: 0, MW

Max: 3.5, MW Pn: 3.15 MW

Active Power Rating

Max: 3.15, MW Rating Factor: 1, Pn: 3.15 MW

Şekil 6.11. Rüzgâr türbinlerinin karakteristik özelliklerinin girişi

Türbinler, rüzgâr enerjisinin tamamını elektrik enerjisine dönüştüremezler. Bölüm 3'te bahsedildiği üzere Betz yasasına göre rüzgâr gücünün en fazla % 59,3'ü mekanik güce dönüştürülebilir. Bu oran elektriksel ekipmanların verimliliği de göz önüne alındığında türbinlerde güç katsayısı (C_p) ortalama % 35 ile % 45 arasındadır. Burada C_p katsayısı % 40 kabul edilerek türbinlerin yıl içerisinde üretebileceği ortalama güç tespit edilmiştir.

Hesaplamalar bölüm 3'te verilen formüllere göre yapılmıştır. Türbin değerleri aşağıdaki gibidir;

Kanat uzunluğu, l : 64.5 m

Ortalama rüzgâr hızı, V : 6.34 m/s

Hava yoğunluğu, ρ : 1.23 kg/m³

Türbin güç katsayısı, C_p : 0.4

Kanatların süpürme alanı Formül 6.1'deki hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} A &= \pi \times r^2 \\ &= \pi \times 64.5^2 \\ &= 13069.81 \text{ m}^2 \text{ türbin kanatlarının süpürme alanı olarak bulunur.} \end{aligned} \tag{6.1}$$

Kanatların süpürme alanının hesaplanmasının ardından Formül 6.2'deki gibi rüzgâr enerjisinden elde edilecek güç hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{1}{2} \times \rho \times A \times V^3 \times C_p \\ &= \frac{1}{2} \times 1.23 \times 13069.81 \times 6.34^3 \times 0.4 \\ &= 819.355 \text{ kW olarak bulunur.} \end{aligned} \tag{6.2}$$

1 yıl içerisinde türbinlerin ortalama çıkış gücü 819.355 kW olarak bulunmuştur. Benzer şekilde türbinlerin nominal çalışma hızlarında çıkış güçleri Tablo 6.2'de verilmiştir.

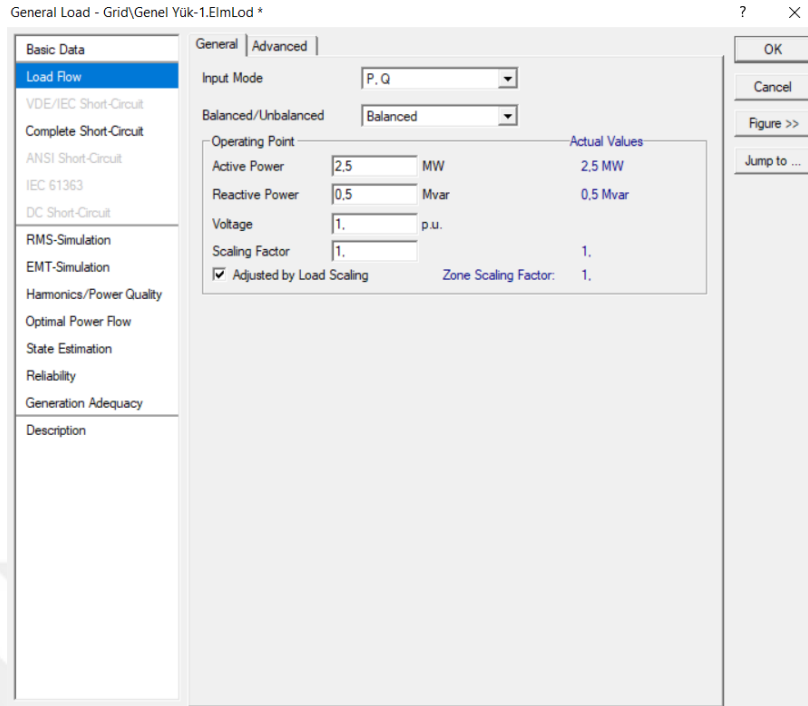
Tablo 6.2.Rüzgâr hızına bağlı olarak türbin çıkış gücü

Rüzgâr hızı	Türbin Çıkış Gücü	Rüzgâr hızı	Türbin Çıkış Gücü
0 (m/s)	0 kW	13 (m/s)	3.3 MW
1 (m/s)	0 kW	14 (m/s)	3.3 MW
2 (m/s)	0 kW	15 (m/s)	3.3 MW
3 (m/s)	86.61 kW	16 (m/s)	3.3 MW
4 (m/s)	205.77 kW	17 (m/s)	3.3 MW
5 (m/s)	401.89 kW	18 (m/s)	3.3 MW
6 (m/s)	694.47 kW	19 (m/s)	3.3 MW
7 (m/s)	1.102 MW	20 (m/s)	3.3 MW
8 (m/s)	1.646 MW	21 (m/s)	3.3 MW
9 (m/s)	2.343 MW	22 (m/s)	3.3 MW
10 (m/s)	3.215 MW	23 (m/s)	3.3 MW
11 (m/s)	3.3 MW	24 (m/s)	3.3 MW
12 (m/s)	3.3 MW	25 (m/s)	3.3 MW

6.2.2.Yükler

Modellenmesi yapılan güç sisteminde her rüzgâr türbininin bulunduğu 7 baraya, farklı güçlerde toplam 7 adet yük bağlanmıştır. Farklı güçlerdeki yükler, aktif ve reaktif güç çeken devre elemanları ihtiva etmektedir. Yüklerin her biri sisteme girip çıkarken harmonik bir yapı oluşmasına sebep olmaktadır. Özellikle devrede bulunan kesintisiz güç kaynakları (UPS), güç elektroniği devre elemanları içeren güç kaynakları ve yol vericiler, şebekelerde istenmeyen gerilim dalgalanmaları ve şebeke için istenmeyen geriliminin sinüsoidal biçimli olan dalga formunda bozucu etkilere sebep olmaktadır. Bu da şebekede faz açısı düzeltmek için kullanılan kondansatör gruplarının bazen gereksiz yere ısınmasına ve hatta üzerinde oluşan aşırı ısınma sonucu patlamasına neden olarak bu elemanların bulunduğu şalt sahasında bulunan kişilerin veya ekipmanların zarar görmesine yol açan olaylara sebep olabilmektedir.

Proje tasarımında yükleri kendi arasında gruplara ayırmak bize farklı güçlerde olan yüklerin herhangi bir transformatör üzerindeki yüklenme oranını değiştirerek, yük akış ve kısa devre analiz sonuçlarının daha doğru yorumlanmasına yardımcı olur.



Şekil 6.12.Digsilent Powerfactory programında yük özelliklerinin veri girişi

6.2.3.Hatlar

Modellenmesi yapılan sistemde farklı uzunluklara sahip iki farklı hat bulunmaktadır. 34.5 kV'luk gerilime sahip hatta $1 \times 185 \text{ mm}^2$ kablo ve $1 \times 95 \text{ mm}^2$ XLPE kablo kullanılmıştır. Sistemde kullanılan XLPE kablonun karakteristik özellikleri ve hat uzunluklarının programa girilmesi için kullanılan ekran görüntüsü Şekil 6.13'te hatların karakteristik özelliklerinin girildiği ekran görüntü penceresi Şekil 6.14'te verilmiştir.

Resulting Values	
Rated Current (act.)	1, kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0,6967554 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	46,17202 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0,4825 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0,5026548 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0, Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0, Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0, A
Earth Factor, Magnitude	0,3333333
Earth Factor, Angle	180, deg

Şekil 6.13.Digsilent Powerfactory programında hat uzunluğu veri girişi

Şekil 6.14.Digsilent Powerfactory programında hattın karakteristik özelliğinin veri girişi

6.2.4.Baralar

Modellemesi yapılan güç sisteminde 10 adet 34.5 kV'lık bara ve 7 adet 0.69 kV'lık bara bulunmaktadır. Programda baralar, terminal olarak adlandırılmıştır. Programda, sistem elemanlarında terminal seçilerek, baralar istenilen güç değeri göre ayarlanarak kullanılabilir. 34.5 kV'lık Bara-1 için örnek veri giriş ekran penceresine ait ekran görüntüsü Şekil 6.15'te verilmiştir.

Şekil 6.15.Digsilent Powerfactory programında baraların veri girişi

6.2.5.Transformatörler

Modellemesi yapılan güç sisteminde rüzgâr türbini çıkış gerilimi 0.69 kV, olup ana iletim enerji hattına ise orta gerilim bağlantısı 34.5 kV üzerinden yapılmıştır. Transformatör gücünde daha önce belirtildiği gibi türbin çıkış gücüne uygun olarak 6.3 MVA gücünde seçilmiştir. Simülasyon işlemi için kullanacağımız programa sistemde kullanılan güç transformatörü olan TR-1'e ait veri giriş ekranı görüntüsü Şekil 6.16'da verilmiştir.

Şekil 6.16.Digsilent Powerfactory programında transformatörlerin veri girişi

6.2.6. Şebeke

Dünya standartlarında sisteme bağlanabilir maksimum RES kapasitesi 2007 yılında hedeflenen talep kapasite gücü değeri olarak belirlenen % 25 kapasite artırımı gücü değerini aşarak % 28'e ulaşmıştır. Bundan dolayı Ülkemizde de 2008 yılında uygulanan yönetmeliklerle rüzgâr santrallerinin kurulu gücü ancak şebekenin kısa devre gücünün % 5'i kadar olmasına izin verilmiştir. Elektrik enerjisine olan talebin artması ile birlikte 2008 yılında yayınlanmış olan yönetmelikte 2013 yılında değişikliğine gidilerek önceden % 5 olarak belirlenen bu kısa devre gücü kriteri kaldırılmıştır. Yapılan değişiklik çerçevesinde, sisteme bağlanacak RES kurulu gücü TS EN 61400 standartına göre yapılan teknik analiz sonucunda belirlenecektir ibaresi eklenmiştir (Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği, 2013).

Orta Gerilim (OG) şebekesinde nominal gerilim değeri çok önemli bir parametredir. Kısa devre akımlarının hesaplamasında ise şebeke kısa devre gücünün ne olacağı önceden bilinmesi gerekir. 30 kV'luk OG şebekelerinde kısa devre gücü hattın empedansına bağlı olarak 100 MVA'dan 500 MVA'ya kadar değişiklik gösterebilir. Bilindiği üzere gerilim seviyesinin yükselmesi durumu kısa devre gücünde de değişiklik oluşturur. Sistemlerin modellenmesi OG şebekelerinin gerilim seviyesine ve IEC 60076-5 standardına göre kabul edilen kısa devre güç değerleri Tablo 6.2'de verilmiştir (ABB,2019). Bu kapsamda 23.1 MW kurulu güce ve 34.5 kV'luk OG şebekesine sahip rüzgâr santralının modellenmesinde şebekenin 250 MVA kısa devre gücü uygun görülerek modellenmiştir. Ardıçlı RES'e ait iletim hattından gelen 154 kV elektrik enerjinin indirici trafo merkezinde 34.5 kV'a düşürüldüğü merkez Şekil 6.17'de verilmiştir.



Şekil 6.17.Ardıçlı RES indirici trafo merkezi

Tablo 6.2.IEC 60076-5 standartı kısa devre gücü değerleri (IEC 60076-5, 2016)

OG şebeke gerilimi (kV)	Kısa devre görünür gücü (Avrupa)	Kısa devre görünür gücü (Kuzey Amerika)
7.2 kV – 24 kV arası	100 MVA	250 MVA
36 kV	250 MVA	500 MVA
52 kV – 72.5 kV arası	1000 MVA	1500 MVA

Şebeke, santralin kurulu olduğu bölgede orta gerilim hattı olan 34.5 kV'luk ana dağıtım barasına bağlıdır. Yük akışının yapılabilmesi için burada şebeke slack (SL) baraya bağlanmıştır. Baralar genel olarak kendi aralarında;

1. P-Q baralar,
2. P-V baralar,
3. Slack bara,

olmak üzere üç sınıfta toplanabilir. Baralar sınıflandırılırken göz önünde bulundurulacak teknik özellikler Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3.Bara tipleri genel özellikleri

Bara tipi	Bilinen veriler	Hesaplanabilir veriler
P-Q bara	Aktif ve reaktif güç	Gerilim ve faz açısı
P-V bara	Gerilim ve aktif güç	Reaktif güç ve faz açısı
Slack bara	Gerilim ve faz açısı	Aktif ve reaktif güç

P-Q baralar, yük barası olarakta bilinir. P-Q baralarda, üretilen aktif ve reaktif güç sıfır varsayılır. Bununla birlikte Tablo 6.3'ten de anlaşılacağı üzere yük baralarında yalnızca güç harcadığı için aktif ve reaktif güç negatif olacaktır ve bu sayede bara gerilimi ve faz açısının kolayca hesaplanabilir.

P-V baralar, üretim barası olarakta bilinir. P-V baralarda üretilen aktif güç ve bara geriliminin genliği bellidir. Bu sayede sistem P-V tip seçilmesi durumunda baranın faz açısı ve reaktif gücünün değeri önceden hesaplanabilmektedir.

Slack bara ise, salınım barası veya gevşek bara olarakta adlandırılır. Slack baralar referans olarak gerilim faz açısı 0° ve büyüklüğü üretim değerleri baz alındığı için pu (Per Unit) olarak değeri 1 alınır. Bu sayede diğer baralarda yük akışı analizinde faz açılarının tespit edilmesinde referans değer alınarak bize diğer hesaplarımızda referans değer olarak alındığı için ilgili baraya ait verilerin gerçek değerlerinin elde edilmesinde yardımcı olur. Bu özelliklerinden dolayı bu çalışmada slack bara tipi seçilerek kısa devre hesaplamalarını yapıldı. Slack baraların programda çalışma mantığı gerilim ve faz açılarını sabitleyerek, aktif ve reaktif güçlerin iterasyonlar sırasında serbestçe ayarlanabilmesini sağlamaktadır (Laughton ve Warne, 2003).

Şekil 6.18'de şebekenin temel verileri olan kısa devre gücü ve R/X oranı sisteme girilmiş, programda şebekenin sürekli kısa devre akımı ise otomatik olarak buna göre hesaplanmıştır. Şekil 6.19'da ise şebekenin bağlı olduğu baralara ait programa veri girişleri ekran görüntüsü verilmiştir.

Şekil 6.18.Digsilent Powerfactory şebekenin temel verilerinin girişi

Şekil 6.19.Digsilent Powerfactory programında şebekenin bağlı olduğu baranın veri girişi

6.3. Modellenen RES Üzerinde Yük Akış Analizi

Güç sistemlerinde, sistemin kararlı bir şekilde çalışması oldukça önemlidir. Elektrik üretim ve tüketimi işletme sınırları içinde kalarak yük akışının dengeli bir şekilde yapılabilmesi gerekir (Singh ve ark., 2015). Yük akışı analizi, sistemde bulunan baralar üzerinde meydana gelen gerilim düşümleri, hat ve transformatör yüklenme oranları gibi birçok bilgi vererek gelecek planlamasının doğru bir şekilde yapılmasına da olanak sağlar. Sistemin modellenmesi, sistem üzerinde güvenli bir şekilde güç aktarımı gerçekleştirebilmek için oldukça önemlidir. Güç sistemi üzerinde yapılmak istenen bir

değişiklik durumunda bu değişikliğin sistem üzerinde nasıl bir etkiye neden olacağını önceden kestirmek etmek oldukça güçtür ve yapılmak istenen bu değişiklik planlamaları sistem üzerinde önceden öngörülemeyen sonuçlar doğurabilir. Ancak enerji güç sistemleri önceden yapılan bir modelleme üzerinde sistemde yapılmak istenen değişiklik durumları çözüme ulaştırılırsa gereksiz yere yapılacak yatırım harcamaları ve yapılması planlanan yatırım harcamalarının neden olabileceği olumsuz durumları önceden tespit etmek mümkün olabilir. Bu sayede hatalı tasarımın sebep olabileceği işletme maliyetleri ve değişikliğin yapılması için harcanacak sürenin önüne geçilebilir. Bu tez çalışmasında sistem modellemesi için yapılabilecek hatalar ve bunların sebep olabileceği sonuçlardan da bahsedilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan RES için modellenen güç sistemi üzerinde dört adet karşılaştırılması muhtemel olan farklı senaryo düşünülmüş ve oluşması muhtemel durumlar için yük akış analizleri yapılarak elde edilecek sonuçlar değerlendirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma için meydana gelmesi muhtemel olan senaryolar;

- 1 Rüzgâr türbini ve yükler devrede değilken durum(Senaryo-1),
- 2.Yalnızca yükler devredeyken durum (Senaryo-2),
- 3.Yalnızca rüzgâr türbinleri devrede iken durum (Senaryo-3),
- 4.Rüzgâr türbinleri ve yükler devrede iken durum (Senaryo-4),

dır.

Rüzgâr türbini ve yükler devrede değilken durum (Senaryo-1): Bu durum ancak santralin genel bakımında, şebekede olan olası bir arıza durumunda santralin sistem dışı bırakılması, santralin elektrik enerjisi üretmesine uygun olamayan rüzgâr hızına maruz kalması (rüzgâr hızının 3 m/s'den düşük olması veya rüzgâr hızının 25 m/s'den yüksek olması ve türbinin otomatik olarak frenlemesi sonucu enerji üretememesi) sonucunda karşılaşılabilecek bir senaryo durumudur. Bu tez çalışmasının 4.bölümünde yapay sinir ağları kullanılarak rüzgâr santrali ile ilgili bölgenin rüzgâr hızı tahmini yapılmıştır ve türbinlerin optimum rüzgâr hızları dışında olması durumunda, santralde bu durumla karşılaşılması olasılığı bir yıl içerisinde % 12,6 olup bu oran yıl bazında 46 gün olarak bulunmuştur. Santral üretimini durdurduğunda, yüklerinde enerjiye olan ihtiyacı durmuş olarak kabul edilerek senaryo-1 için yük akış analizi yapılmıştır.

Yalnızca yükler devredeyken durum (Senaryo-2): Bu durum ilk senaryoya çok benzer şekilde gerçekleşir. İlk senaryodan farkı olarak yük tarafında enerji ihtiyacı talebi olması durumu göz önüne alınmıştır. Türbinlerin bir yıl içinde devrede olmama olasılıkları % 12.6 olup bu oran yıl bazında 46 gün olarak bulunmuştur. Ancak burada RES'in şebekeye bağlı kalması durumu önüne alınmıştır (Ters besleme durumu). Türbinlerde devrede değil iken santral tarafında bulunan yüklerin enerji ihtiyacı doğrudan şebekeden karşılanacaktır ve yük analizindeki santralde olası muhtemel olaylar dikkate alınarak gerekli analizler yapılmaya çalışılmıştır.

Yalnızca rüzgâr türbinleri devredeyken durum (Senaryo-3): Bu durum rüzgâr türbinlerinin optimum elektrik enerjisi üretmesi için uygun rüzgâr hızlarının (3 m/s ile 25 m/s arasında) olması durumunda gerçekleşecektir. Bu tez çalışmasının ilk aşamasında da yapay sınır ağları kullanılarak rüzgâr santrali ile ilgili bölgenin rüzgâr hızı tahmini yapılmış, bir yıl içinde rüzgâr santralinin olası enerji üretme oranı, bir yıl içerisindeki toplam enerjisiz kalma durumundan çıkartılarak % 87.4 bulunmuş ve bu oran yıl bazında 319 gün tespit edilmiştir. Bu senaryoda türbinler devrede iken yüklerinde elektrik enerjisine ihtiyaç duymaması durumu dikkate alınmıştır. Bu senaryoda da türbinler şebeke ve şalt elemanları üzerinde oluşması muhtemel durumlar da yük akış analizi irdelenmeye ve karşılaşılabilecek durumlar tespit edilmeye çalışılmıştır.

Rüzgâr türbinleri ve yükler devredeyken durum (Senaryo-4): Bu durum senaryo-3'e benzer şekilde optimum rüzgâr hızında, türbinlerin bir yıl içinde devrede olma oranı % 87,4 olup bu oran yıl bazında 319 gün olarak karşımıza çıkan muhtemel durumlardan biridir. Bu senaryoda yüklerin elektrik enerjisine olan ihtiyaç durumu dikkate alınmıştır. RES'te en çok karşılaşması muhtemel olan ve santralimizin çalışmasını istediğimiz senaryo durumu bu durumdur. Senaryoların tamamında baraların, transformatörlerin ve kabloların yüklenme oranları değişecektir. Bu durumlar ile karşılaşma oranlarımız yıl içinde tahmini olarak belirli olduğu için gerekli koruma önlemleri alınırken bu durumların dikkate alınması sistem modellemesi için çok büyük önem arz edecektir.

Burada belirtilen senaryolar dışında karşılaşılabilecek olası durumlar vardır. Rüzgâr türbinlerinin optimum rüzgâr hızında tam kapasite olarak enerji üretmesine karşın, yükler rüzgâr santralinden daha fazla enerji talebinde bulunması durumunda santralin olumsuz etkilenmemesi için yük atma işlemi gerçekleşir. Yük atma işlemi santralin, devreye giren

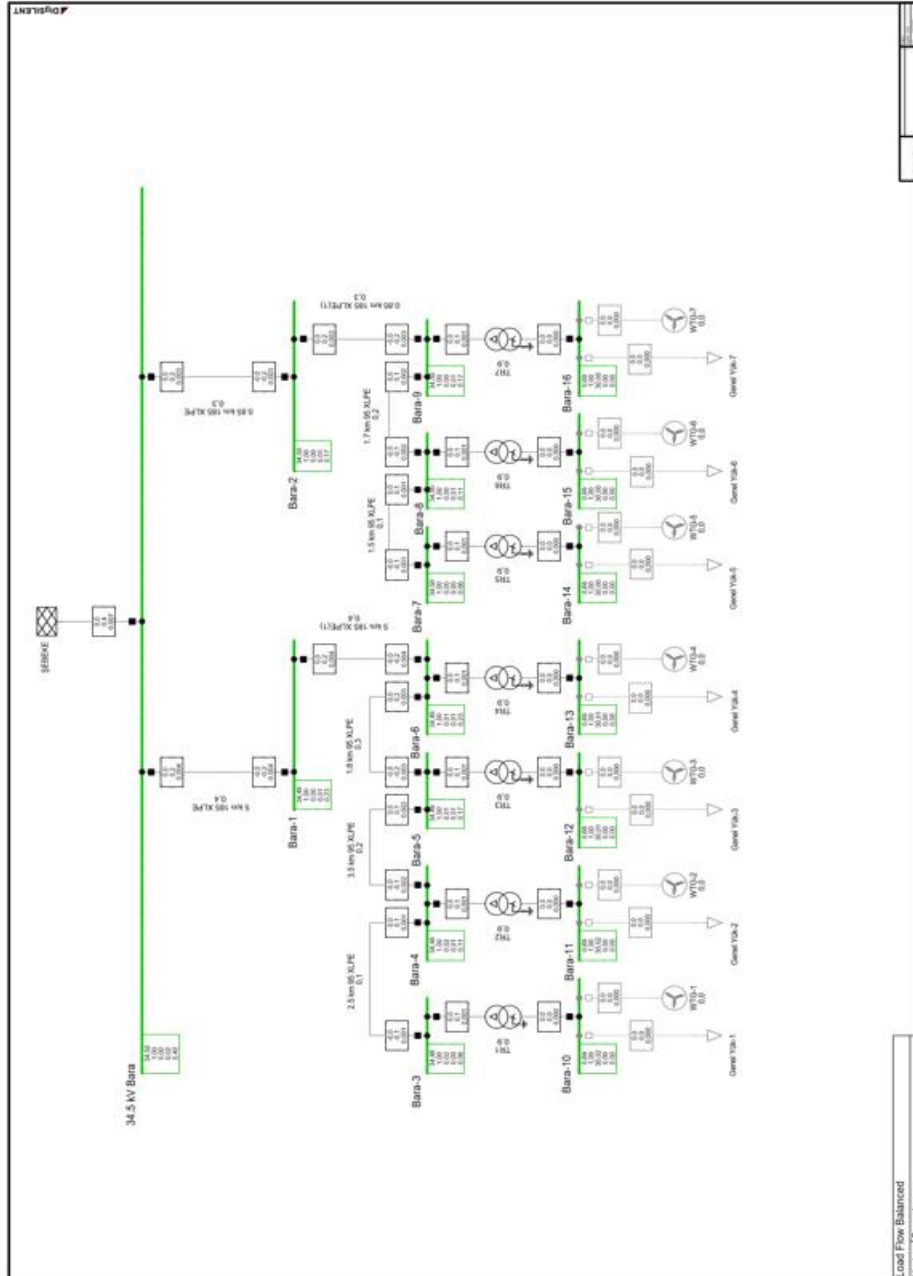
yükler için yetersiz kalması durumunda, santralin aşırı yüklenerek arızaya sebebiyet vermemesi için mümkünse yüklerin devreden kademeli olarak çıkarılması ya da mümkün değilse santralin devre dışı bırakılması ile sonuçlanabilecek bir durumdur.

Karşılaşılabilecek bir farklı durum da, santralde rüzgâr hızının aşırı artarak yani türbinlerin durma noktası olan 25 m/s hıza ulaşması durumunda türbinler elektriksel frenleme yaparak kendini durduracaktır. Bu durumda yükler enerji talebinde bulunmaması durumunda senaryo-1, yükler enerji talebinde bulunması durumunda ise senaryo-2 durumları gerçekleşecektir. Ancak yüksek hızlarda elektriksel frenlemenin arızalanması ve mekanik frenlemenin yapılamaması gibi durumlarda türbinlerde yanma ve aerodinamik bozulmalar sonucu kule devrilmesi oluşabilir. Bu gibi durumlar kısa devre arızasına sebebiyet verecek ancak alçak gerilim AG bölgede arıza oluşursa termik manyetik şalter (TMS) ile, OG bölgede arıza oluşursa ise kesiciler ile koruma sağlanmaktadır.

Bir diğer olası durumda şebeke de arıza meydana gelmesi durumunda, santralin şebekeye elektrik enerjisi verememesi durumudur. Bu durumda otoprodüktör devreye girerek şebekeye olan enerji akışını durdurulur. Otoprodüktör santrale bağlı olan yüklerin enerji ihtiyacını karşıladıktan sonra ikili anlaşmalara dayalı olarak dağıtım şirketlerine elektrik enerjisinin satıldığı bir üretim şeklidir. Otoprodüktör fiderler, içerisinde ayırıcı, kesici ve koruma sistemlerinin bir arada bulunduğu dağıtım şirketlerinin yönetmeliğine uygun tasarlanmış bir fiderdir. Sistemde arıza giderildikten sonra otoprodüktörler, otomatik olarak santralin şebekeye tekrar enerji vermesini sağlayacaktır. Sistemde otoprodüktör fiderinin bulunmaması durumu göz önüne alınarak şebekede bir arıza oluşması durumunda kesiciler ile koruma sağlanır. Kesiciler OG hattında bir kısa devre arızası olması durumunda açma işlemi yaparak koruma işlemi gerçekleştirirler. Kesiciler maksimum kısa devre akımına dayanımlı olarak seçilir ve bu noktada tez çalışmasında modelleme sonucu bulunun kısa devre arıza akımları koruma elemanlarının seçiminde kolaylık sağlayacaktır ve muhtemel bir kısa devre akımına karşı seçilen şalt cihazlarının zarar görmesi önlenecektir.

6.3.1. Rüzgâr türbini ve yükler devrede değil iken güç sisteminin yük akış analizi

Rüzgâr türbinleri ve yükler devrede değil iken güç sisteminin yük akış analizi yapılmıştır. Baralar üzerindeki gerilimler, hatların yüklenme oranı, kayıp güç ve transformatörlerin yüklenme oranları elde edilmiştir. Şekil 6.20’de senaryo-1 için yapılan yük akışı analizi gösterilmektedir.



Şekil 6.20. Senaryo-1 için yük akış analizi

Sistemde çıktı sonuçları incelendiğinde baralardaki per-unit cinsinde gerilim büyüklüğü istenilen değerlerde olmamaktadır. Bunun sebebi hat ve transformatörlerin neredeyse hiç yüklenmemesidir. Sistemde yük ve rüzgâr türbinleri devrede olmadığı için akım çekecek bir durum oluşmamaktadır. Bu durum hatlar üzerinde de görülmekte ve XLPE kablolarda kayıp güçler minimum durumdadır. Hatlarda oluşan % 1'in altındaki minimal yüklenmeler, transformatörlerdeki demir kayıpları sonucunda açığa çıkan kapasitif akımın etkisidir. Baraların gerilimleri ve yük akışındaki per-unit cinsinden gerilimleri Tablo 6.4'te verilmiştir. Per-unit değeri gerçek ve baz gerilimlerin oranlanması ile elde edilmektedir ve bu senaryoda rüzgâr türbinleri ve yükler devrede olmadığı için gerilim düşümü olmamış ve yük akışı voltajları 1 olarak bulunmuştur. Santraldeki hatların karakteristikleri belirtilerek yüklenme oranı ve kayıp güçler hesaplanmış ve Tablo 6.5'te verilmiştir. Transformatörlerin gerilim ve güçleri belirlenerek yüklenme oranları hesaplanmış ve Tablo 6.6'da belirtilmiştir.

Tablo 6.4.Senaryo-1 için baraların yük akış değerleri

Baralar	Bara Voltajları (kV)	Yük Akışı Voltajları (pu)
RES 34.5 kV (PCC)	34.5	1
Bara-1	34.5	1
Bara-2	34.5	1
Bara-3	34.5	1
Bara-4	34.5	1
Bara-5	34.5	1
Bara-6	34.5	1
Bara-7	34.5	1
Bara-8	34.5	1
Bara-9	34.5	1
Bara-10	0.69	1
Bara-11	0.69	1
Bara-12	0.69	1
Bara-13	0.69	1
Bara-14	0.69	1
Bara-15	0.69	1
Bara-16	0.69	1

Tablo 6.5.Senaryo-1 için hatların yük akış değerleri

Hat Karakteristiği	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranları (%)	Kayıp Güç (kW)
5 km 185 mm ² XLPE	34.5	0.38	0.01
0.85 km 185 mm ² XLPE	34.5	0.28	0
2.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	0.09	0
3.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	0.19	0
1.8 km 95 mm ² XLPE	34.5	0.28	0
1.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	0.09	0
1.7 km 95 mm ² XLPE	34.5	0.19	0

Tablo 6.6.Senaryo-1 için transformatörleri yük akış değerleri

Transformatörler	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranı (%)
TR1	0.69/34.5 kV 6.3 MVA	0.9
TR2	0.69/34.5 kV 6.3 MVA	0.9
TR3	0.69/34.5 kV 6.3 MVA	0.9
TR4	0.69/34.5 kV 6.3 MVA	0.9
TR5	0.69/34.5 kV 6.3 MVA	0.9
TR6	0.69/34.5 kV 6.3 MVA	0.9
TR7	0.69/34.5 kV 6.3 MVA	0.9

6.3.2.Yalnızca yükler devre iken (Senaryo-2)

Yüklerin devreye alınması durumunda hat ve transformatörlerde yüklenme oranları artış göstermiştir. Ancak her barada artış yüklerin güç oranına göre farklılık göstermektedir. Buna karşın baralarda per unit gerilim değerleri düşüş göstermektedir. Yani yüklenme durumuna bağlı olarak baralarda gerilim düşümleri olmaktadır. Şekil 6.18’de senaryo-2 için yapılan yük akışı analizi gösterilmektedir. Digsilent Powerfactory programında yapılan analiz EK 2-A’da verilmiştir.

Sistemdeki çıktı sonuçları incelendiğinde hatlarda meydana gelen aktif güç kayıplarında artış gözlenmektedir. Yüklerin çektiği akımdan dolayı hatlarda yüklenme oranının artması ve buna bağlı olarak kayıp güçlerin artması ile sonuçlanmıştır. Baraların gerilimleri ve yük akışındaki per-unit cinsinden gerilimleri Tablo 6.7’de verilmiştir. Santraldeki hatların karakteristikleri belirtilerek yüklenme oranı ve kayıp güçler

hesaplanmış ve Tablo 6.8’de verilmiştir. Transformatörlerin gerilim ve güçleri belirlenerek yüklenme oranları hesaplanmış ve Tablo 6.9’da belirtilmiştir.

Tablo 6.7.Senaryo-2 için baraların yük akış değerleri

Baralar	Bara Voltajları (kV)	Yük Akışı Voltajları (pu)
RES 34.5 (PCC)	34.5	1
Bara-1	34.5	1
Bara-2	34.5	1
Bara-3	34.5	0.99
Bara-4	34.5	0.99
Bara-5	34.5	0.99
Bara-6	34.5	0.99
Bara-7	34.5	1
Bara-8	34.5	1
Bara-9	34.5	1
Bara-10	0.69	0.98
Bara-11	0.69	0.97
Bara-12	0.69	0.98
Bara-13	0.69	0.99
Bara-14	0.69	0.98
Bara-15	0.69	0.97
Bara-16	0.69	0.99

Tablo 6.8.Senaryo-2 için hatların yük akış değerleri

Hat Karakteristiği	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranları (%)	Kayıp Güç (kW)
5 km 185 mm ² XLPE	34.5	8.33	10.32
0.85 km 185 mm ² XLPE	34.5	9.74	2.40
2.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	2.63	1.01
3.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	5.50	6.12
1.8 km 95 mm ² XLPE	34.5	7.44	5.77
1.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	3.16	0.87
1.7 km 95 mm ² XLPE	34.5	8.32	3.41

Tablo 6.9.Senaryo-2 için transformatörleri yük akış değerleri

Transformatörler	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranı (%)
TR1	0.69/34.5 6.3 MVA	24.98
TR2	0.69/34.5 6.3 MVA	28.80
TR3	0.69/34.5 6.3 MVA	19.09
TR4	0.69/34.5 6.3 MVA	8.62
TR5	0.69/34.5 6.3 MVA	29.96
TR6	0.69/34.5 6.3 MVA	49.56
TR7	0.69/34.5 6.3 MVA	13.46

6.3.3.Yalnızca rüzgâr türbinleri devre iken (Senaryo-3)

Rüzgâr türbinlerinin devreye alınması sonucunda baralardaki gerilim per-unit değerinde artmıştır. Gerilim bu şekilde ani yükselmesi, sistemde oluşan arızalar ve büyük yüklerin anahtarlaması gibi durumlarda karşımıza çıkmaktadır. Hatlarda ise yüklenme oranları artmış buna bağlı olarak aktif güç kayıplarında da artış gözlenmiştir. Benzer şekilde transformatör yüklenme oranlarında da artış gözlenmiş, rüzgâr türbinlerinin güçlerinin eşit olmasından dolayı ise tüm transformatörlerin yüklenme oranları birbirine çok yakın sonuç vermiştir. Digsilent Powerfactory programında yapılan analiz EK 2-B’de verilmiştir.

Rüzgâr türbinlerinin sisteme bağlantısında uzun mesafeli hatlar kullanılabilir. Bu noktada hattın kesitinin doğru belirlenmesi gerekir. Düşük kesitli hat seçilmesinde dağıtım ve üretim tarafında gerilim yükselmelerine sebep olabilir. Modellemenin avantajı kullanarak kablo karakteristiklerini değiştirerek en uygun kablo tespit edilebilir. En uygun kablonun bulunması sonucu maliyet açısından da olumlu yansımaları olacaktır. Verilerde hattın sınır değerini aşmadığı bu yüzden güç sistemine uygun olduğunu kanıtlar durumdadır. Baraların gerilimleri ve yük akışındaki per-unit cinsinden gerilimleri Tablo 6.10’da verilmiştir. Santraldeki hatların karakteristikleri belirtilerek yüklenme oranı ve kayıp güçler hesaplanmış ve Tablo 6.11’de verilmiştir. Transformatörlerin gerilim ve güçleri belirlenerek yüklenme oranları hesaplanmış ve Tablo 6.12’de belirtilmiştir.

Tablo 6.10.Senaryo-3 için baraların yük akış değerleri

Baralar	Bara Voltajları (kV)	Yük Akışı Voltajları (pu)
RES 34.5 kV (PCC)	34.5	1
Bara-1	34.5	1
Bara-2	34.5	1
Bara-3	34.5	1.02
Bara-4	34.5	1.02
Bara-5	34.5	1.01
Bara-6	34.5	1.01
Bara-7	34.5	1
Bara-8	34.5	1
Bara-9	34.5	1
Bara-10	0.69	1.02
Bara-11	0.69	1.02
Bara-12	0.69	1.02
Bara-13	0.69	1.01
Bara-14	0.69	1.01
Bara-15	0.69	1.01
Bara-16	0.69	1.01

Tablo 6.11.Senaryo-3 için hatların yük akış değerleri

Hat Karakteristiği	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranları (%)	Kayıp Güç (kW)
5 km 185 mm² XLPE	34.5	21.70	70.00
0.85 km 185 mm² XLPE	34.5	16.46	6.85
2.5 km 95 mm² XLPE	34.5	5.41	4.23
3.5 km 95 mm² XLPE	34.5	10.82	23.73
1.8 km 95 mm² XLPE	34.5	16.25	27.53
1.5 km 95 mm² XLPE	34.5	5.48	2.61
1.7 km 95 mm² XLPE	34.5	10.97	5.92

Tablo 6.12.Senaryo-3 için transformatörleri yük akış değerleri

Transformatörler	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranı (%)
TR1	0.69/34.5 6.3 MVA	51.32
TR2	0.69/34.5 6.3 MVA	51.39
TR3	0.69/34.5 6.3 MVA	51.56
TR4	0.69/34.5 6.3 MVA	51.69
TR5	0.69/34.5 6.3 MVA	52.03

Transformatörler	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranı (%)
TR6	0.69/34.5 6.3 MVA	52.07
TR7	0.69/34.5 6.3 MVA	52.12

6.3.4. Rüzgâr türbinleri ve yükler devrede iken (Senaryo-4)

Hem rüzgâr türbinleri hem de yükler aynı anda devreye girmiştir. Yüklerin devreye girmesi ile birlikte rüzgâr türbinlerinin bulunduğu baralardan aktif ve reaktif güç çekimi olmaktadır. Bu sayede sadece rüzgâr türbinlerinin devrede olduğu durum gibi baralarda gerilim yükselmesi durumu görülmemektedir. Bu durum hem hatlarda hem de transformatör tarafında gerçekleşmiştir. Digsilent Powerfactory programında yapılan analiz EK 2-C’de verilmiştir. Baraların gerilimleri ve yük akışındaki per-unit cinsinden gerilimleri Tablo 6.13’te verilmiştir. Santraldeki hatların karakteristikleri belirtilerek yüklenme oranı ve kayıp güçler hesaplanmış ve Tablo 6.14’te verilmiştir. Transformatörlerin gerilim ve güçleri belirlenerek yüklenme oranları hesaplanmış ve Tablo 6.15’te belirtilmiştir.

Tablo 6.13. Senaryo-4 için baraların yük akış değerleri

Baralar	Bara Voltajları (kV)	Yük Akışı Voltajları (pu)
RES 34.5 kV (PCC)	34.5	1
Bara-1	34.5	1
Bara-2	34.5	1
Bara-3	34.5	1.01
Bara-4	34.5	1.01
Bara-5	34.5	1
Bara-6	34.5	1
Bara-7	34.5	1
Bara-8	34.5	1
Bara-9	34.5	1
Bara-10	0.69	1
Bara-11	0.69	1
Bara-12	0.69	1
Bara-13	0.69	1
Bara-14	0.69	0.99
Bara-15	0.69	0.98
Bara-16	0.69	1

Tablo 6.14.Senaryo-4 için hatların yük akış değerleri

Hat Karakteristiği	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranları (%)	Kayıp Güç (kW)
5 km 185 mm ² XLPE	34.5	16.07	38.40
0.85 km 185 mm ² XLPE	34.5	12.48	3.93
2.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	3.05	1.35
3.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	6.84	9.47
1.8 km 95 mm ² XLPE	34.5	11.24	13.16
1.5 km 95 mm ² XLPE	34.5	4.70	1.92
1.7 km 95 mm ² XLPE	34.5	8.38	3.46

Tablo 6.15.Senaryo-4 için transformatörleri yük akış değerleri

Transformatörler	Bara Voltajları (kV)	Yüklenme Oranı (%)
TR1	0.69/34.5 6.3 MVA	24.94
TR2	0.69/34.5 6.3 MVA	36.86
TR3	0.69/34.5 6.3 MVA	41.79
TR4	0.69/34.5 6.3 MVA	46.72
TR5	0.69/34.5 6.3 MVA	44.57
TR6	0.69/34.5 6.3 MVA	37.37
TR7	0.69/34.5 6.3 MVA	43.91

Sistemin çıktı sonuçları incelendiğinde yüklerin sisteme olumlu katkı sağladığı söylenebilir. Bara, transformatör ve hatlardaki yüklenme oranları azalmış ve yükler rüzgâr türbini üzerinden şebekeye ihtiyaç duymadan beslenebilmiştir.

Bu dört farklı senaryo incelendiğinde rüzgâr türbinleri tek başına devrede olduğu durum dikkat çekmektedir. En yüksek yüklenme oranlarının senaryo-3'te olduğu görülmektedir ancak bu durum güç sisteminde yükler mevcut değil iken oluşmuştur. Sistemde sadece yükler var iken rüzgâr türbinlerinin de devreye girmesi birlikte bara, transformatör ve hatlarda yüklenme oranlarında ciddi düşüşler oluşmuş ve rüzgâr türbinleri sisteme olumlu etki etmiştir.

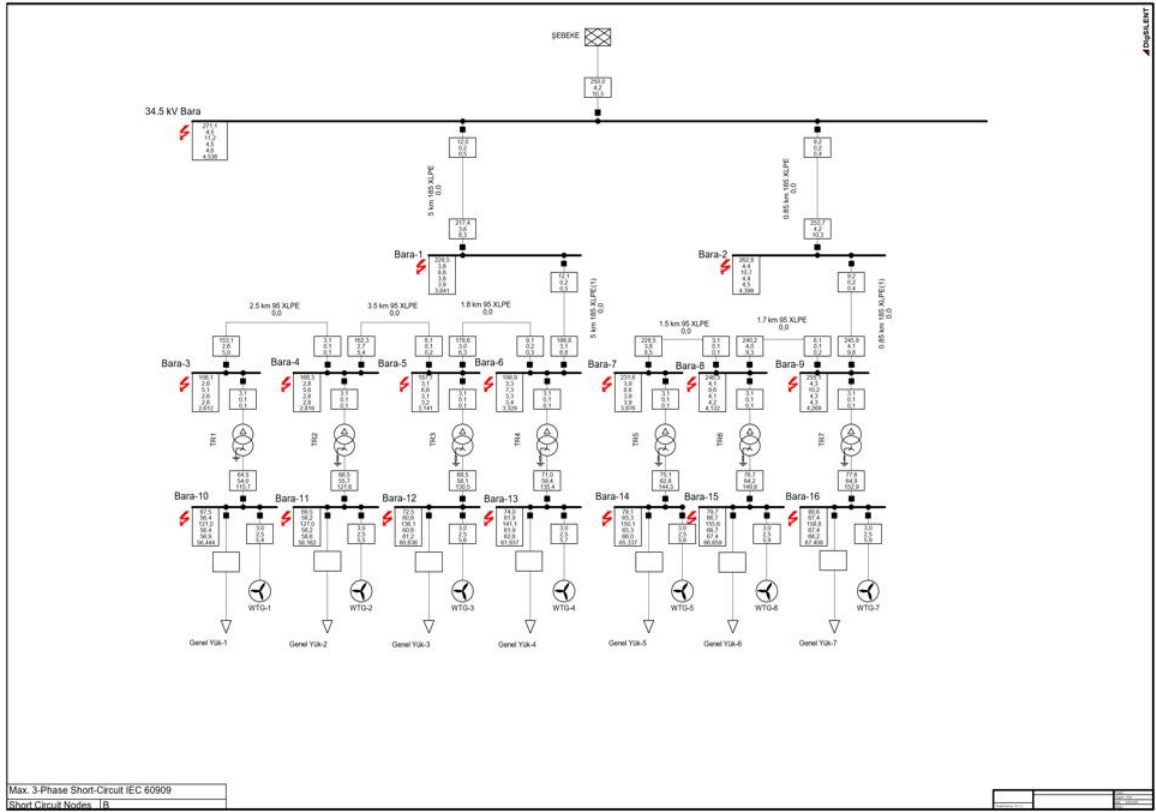
6.4.Modellenen RES Üzerinde Kısa Devre Analizi

Bu bölümde yapılan çalışmada modellenen RES üzerinde güç sisteminin kısa devre analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistemde farklı senaryolar gerçekleştirilerek üç faz, faz-faz ve faz-toprak kısa devre hesaplamaları yapılmıştır. Digsilent PowerFactory programında kısa devre hesaplanmasında IEC 60909 standardı kullanılmıştır. Bu standartta anma gerilimi 550 kV'a kadar yüksek gerilim şebekelerinde anma frekansı 50 Hz ve 60 Hz olarak kısa devre hesaplanmasına olanak sağlayabilmektedir (IEC Standard 60909,2001).

Modellenen sistem radyal bir sistemdir. Radyal sistemde yük akışı tek yönlüdür. Bu durumda arıza akımı sadece şebekeden değil rüzgâr türbinlerinde de beslenmektedir (Laughton ve Warne, 2003). Bu bağlamda rüzgâr türbinlerinin devrede olması veya devreden çıkması durumunda ortak bağlantı noktasındaki barada ve diğer baralarda oluşturduğu etkiler incelenecektir.

6.4.1.Üç faz kısa devre analizi (Senaryo-1)

Üç faz kısa devre analizi, rüzgâr türbinleri devre olduğunda ve rüzgâr türbinlerinin devreden çıkması durumunda sistemde üç faz kısa devre oluşturularak çıktı sonuçları kayıt edilmiştir. Hesaplar sonucunda darbe akımı, başlangıç simetrik kısa devre akımı, kısa devre termik akımı ve kısa devre gücü değerleri elde edilmiştir. Oluşturulan kısa devre IEC 60909 standardına göre maksimum durum için gerçekleştirilmiştir. Modellenen güç sisteminin tüm baralarında gerçekleşen üç faz kısa devre analizi Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



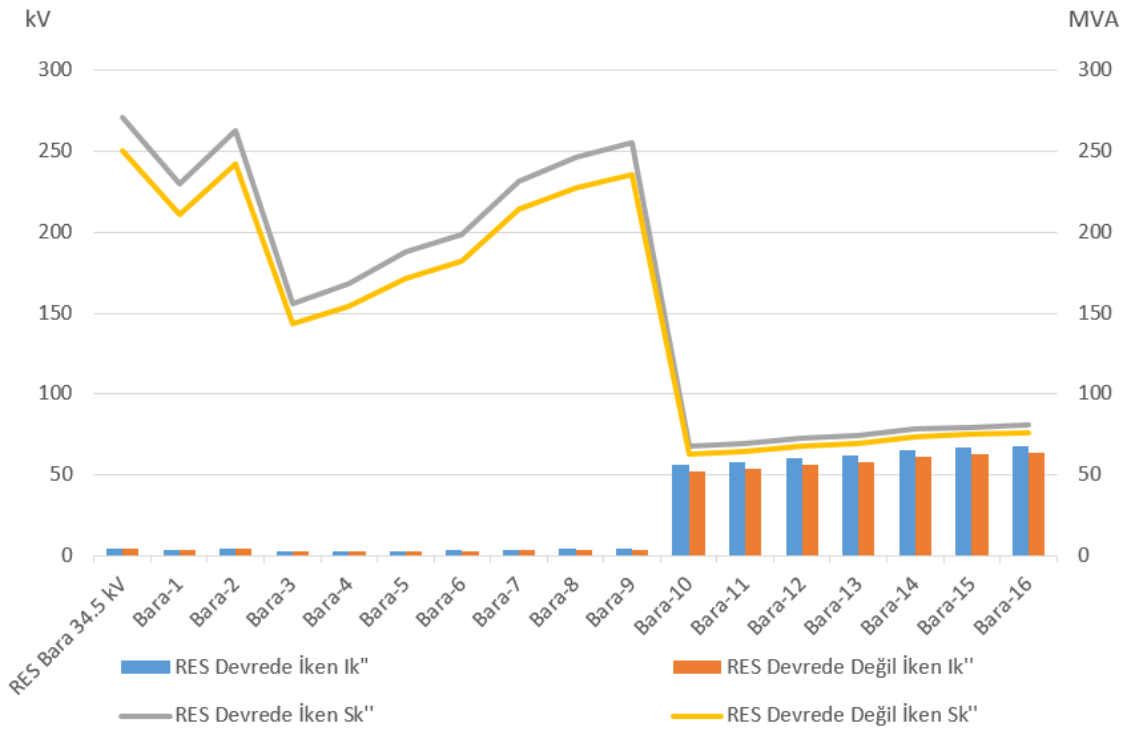
Şekil 6.21.Senaryo-1 için kısa devre analizi

Yapılan çalışmanın sonucu incelendiğinde şebekeye bağlı olan rüzgâr türbinlerinin kısa devre akımını artırıcı yönde olduğu gözlenmiştir. Kısa devre akımının değeri şebekenin kısa devre gücüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bunun etkisi transformatörler üzerinde etkisi şu şekilde olmuştur; 0.69/34.5 kV 6.3 MVA gücündeki transformatörlerin düşük gerilim tarafındaki üç faz kısa devre sonucu, yüksek gerilim tarafından daha yüksek sonuçlar vermiştir. Rüzgâr türbinlerinin etkisi burada da görülmüştür. Tablo 6.16'da üç faz kısa devrenin, tüm baralarda türbinler devrede iken ve türbinler devrede değil iken oluşan değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.16.Modellenen sistemin üç faz kısa devre değerleri

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken	
	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)
RES 34.5 kV (PCC)	4.54	271.14	4.18	250
Bara-1	3.84	229.51	3.53	210.97
Bara-2	4.40	262.88	4.06	242.46
Bara-3	2.61	156.08	2.40	143.63
Bara-4	2.82	168.26	2.58	154.28
Bara-5	3.14	187.70	2.87	171.70
Bara-6	3.33	198.70	3.05	182
Bara-7	3.88	231.58	3.59	214.59
Bara-8	4.12	246.31	3.81	227.49
Bara-9	4.27	255.08	3.94	235.32
Bara-10	56.44	67.46	52.43	62.67
Bara-11	58.16	69.51	54.05	64.60
Bara-12	60.64	72.47	56.46	67.48
Bara-13	61.94	74.02	57.76	69.04
Bara-14	65.34	78.08	61.45	73.44
Bara-15	66.66	79.67	62.72	74.95
Bara-16	67.41	80.56	63.45	75.83

Rüzgâr türbinlerinin bağlantı yeri kısa devreye arıza katkısını belirlemektedir. Bunun yanı sıra türbinlerin karakteristik değeri ile de arızaya katkı durumu değişkenlik gösterir (Eduard, 2011). Ancak burada en önemli faktör transformatörlerin bağlantı şeklinin değişmesidir. Üç faz kısa devrede ise bağlantı şeklinin değişmesi güç sisteminde bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Tablo 6.16'da verilen değerlerin rüzgâr türbinlerinin devreye girmesi ile birlikte güç sistemini nasıl etkilediğini gösteren grafik Şekil 6.22'de verilmiştir.



Şekil 6.22. Üç faz kısa devre akım ve kısa devre güç grafiği

6.4.2. Faz-faz kısa devre analizi (Senaryo-2)

Faz-faz kısa devre analizi, rüzgâr türbinleri devre olduğunda ve rüzgâr türbinlerinin devreden çıkması durumunda sistemde iki faz kısa devre oluşturularak çıktı sonuçları kayıt edilmiştir. Hesaplar sonucunda darbe akımı, başlangıç simetrik kısa devre akımı, kısa devre termik akımı ve kısa devre gücü değerleri elde edilmiştir. Oluşturulan kısa devre IEC 60909 standardına göre maksimum durum için gerçekleştirilmiştir. Modellenen güç sisteminin tüm baralarında gerçekleşen iki faz kısa devre analizi EK 3-A'da verilmiştir.

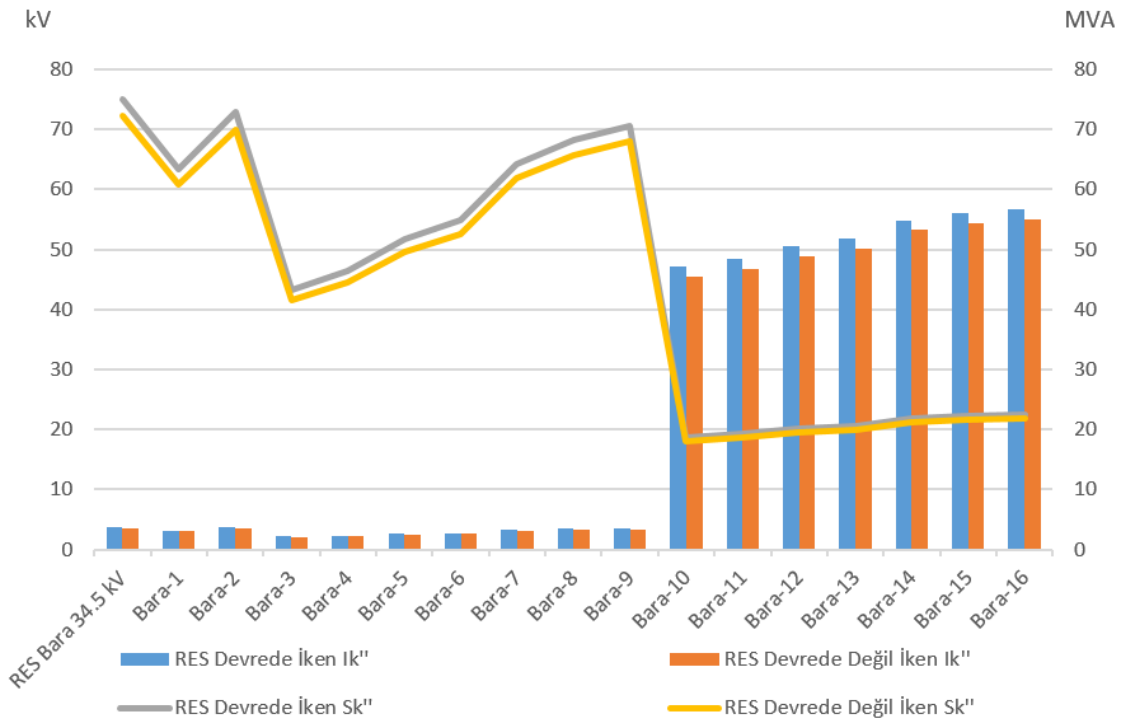
Gerçekleştiren bu senaryoda üç faz kısa devre gibi tüm baralarda iki faz kısa devre yapılarak gerçekleştirilmiştir. Senaryo-1'de gerçekleşen duruma benzer şekilde rüzgâr türbinlerinin devreye girmesi ile birlikte kısa devre akımında ve kısa devre gücünde bir artış olmuştur. Her iki senaryoda rüzgâr türbinlerinin sisteme dahil olması ile birlikte sistem korumasının daha önemli hale geldiğini göstermektedir. Tablo 6.17'de iki faz kısa

devrenin tüm baralarda, türbinler devrede iken ve türbinler devrede değil iken oluşan değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.17.Modellenen sistemin faz-faz kısa devre değerleri

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken	
	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)
RES 34.5 kV (PCC)	3.77	75.10	3.62	72.17
Bara-1	3.19	63.47	3.06	60.90
Bara-2	3.66	72.82	3.51	69.99
Bara-3	2.17	43.18	2.08	41.46
Bara-4	2.33	46.47	2.24	44.54
Bara-5	2.60	51.77	2.49	49.57
Bara-6	2.75	54.87	2.64	52.54
Bara-7	3.23	64.31	3.11	61.95
Bara-8	3.43	68.28	3.30	65.67
Bara-9	3.55	70.67	3.41	67.93
Bara-10	47.08	18.76	45.41	18.09
Bara-11	48.53	19.33	46.81	18.65
Bara-12	50.64	20.17	48.90	19.48
Bara-13	51.77	20.62	50.03	19.93
Bara-14	54.85	21.85	53.22	21.20
Bara-15	55.97	22.30	54.31	21.64
Bara-16	56.61	22.55	54.95	21.89

Güç sistemlerinde en tehlikeli kısa devre üç faz olduğu daha önce vurgulanmış, bunun ispatı senaryo-1'de kısa devre sonuçları ile de doğrulanmıştır. Faz-faz kısa devre akımlarında bir miktar düşüş olmuş ve rüzgâr türbinlerinin devrede bulunup bulunmamasına göre değişkenlik gösteren sürekli kısa devre akımı ve kısa devre gücü grafiksel olarak Şekil 6.23'te gösterilmiştir.



Şekil 6.23. Faz-faz kısa devre akım ve kısa devre güç grafiği

6.4.3. Faz-toprak kısa devre analizi (Senaryo-3)

Transformatörün ada moduna geçmemesi için gerekli koruma önlemleri alınması gerekir. Ada modu, şebekede olan bir arıza sonucunda transformatörün etkilenmemesi için şebekeden ayrılarak bağımsız bir şekilde beslediği yükler ile bağlantılı olarak çalışma durumudur. Bu tür bir durumun yaşanmaması ve şebekeye kesintisiz enerji aktarımı için koruma yöntemleri önem arz etmektedir.

Şebekeye bağlı çalışan yenilenebilir enerji kaynaklarında, sistemde oluşabilecek her türlü hatadan etkilenebilir. Oluşacak hatada sistem ada moduna geçebilir. Bu durumda toprak hata korumasının yapılmasını gerekli kılar. Buna göre öncelikle sistemde faz-toprak arıza akımı direnç veya peterson bobini kullanılarak azaltılmalıdır. Öncelikli olarak transformatörde bu tarz bir koruma önlemi alınması daha etkili bir yöntemdir. Bu durum gerçekleştirilen bu senaryoda, en etkili yöntem bulunarak yorumlanmıştır. Bu yöntemle arıza akımı azaltıldıktan sonra şebekenin bağlantı şekline göre röle koordinasyonu yapılarak arıza giderilmelidir.

Faz-toprak kısa devre analizi, rüzgâr türbinleri devre olduğunda ve rüzgâr türbinlerinin devreden çıkması durumunda sistemde faz-toprak kısa devre oluşturularak çıktı sonuçları kayıt edilmiştir. Hesaplar sonucunda darbe akımı, başlangıç simetrik kısa devre akımı, kısa devre termik akımı ve kısa devre gücü değerleri elde edilmiştir. Oluşturalan kısa devre IEC 60909 standartına göre maksimum durum için gerçekleştirilmiştir. Faz-toprak kısa devre analizini etkileyen en önemli faktör transformatörün bağlantı şekli ve topraklama direncidir (Stuivenvolt,2008). Bu bağlamda transformatör bağlantı grubu ve topraklama direnci için;

- Dyn bağlantısı ve topraklama direnci 0 ohm,
- YNyn bağlantısı ve topraklama direnci 0 ohm,
- YNyn bağlantısı ve topraklama direnci 20 ohm olarak belirlenerek faz-toprak kısa devre akımı ve kısa devre gücü karşılaştırılmıştır.

Modellenen güç sisteminin tüm baralarında gerçekleşen faz-toprak kısa devre analizi, Dyn transformatör bağlantısı ve topraklama direnci 0 ohm olarak EK 3-B'de verilmiştir.

Transformatör bağlantı kısmı Dyn, topraklama direnci 0 ohm olarak çıktı sonuçları incelendiğinde, rüzgâr türbinlerinin bağlı olduğu tarafta çok yüksek kısa devre akımları gözlenmiştir. Bu durum koruma elemanları üzerinde bozucu etki oluşturacağı gibi transformatörlerde aşırı ısınmalarda neden olabilmektedir. Tablo 6.18'de tüm baralarda türbinler devrede iken ve türbinler devrede değil iken oluşan değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.18.Modellenen sistemde transformatör bağlantısı Dyn için faz-toprak kısa devre değerleri

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken	
	I_k'' (kA)	S_k'' (MVA)	I_k'' (kA)	S_k'' (MVA)
RES 34.5 kV (PCC)	4.30	85.56	4.18	83.33
Bara-1	3.63	72.27	3.53	70.32
Bara-2	4.17	82.97	4.06	80.82
Bara-3	2.47	49.18	2.40	47.88
Bara-4	2.66	52.89	2.58	51.43
Bara-5	2.96	58.91	2.87	57.23
Bara-6	3.13	62.43	3.05	60.67

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken	
	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)
Bara-7	3.68	73.32	3.59	71.53
Bara-8	3.91	77.81	3.81	75.83
Bara-9	4.04	80.52	3.94	78.44
Bara-10	28.53	71.62	27.64	69.38
Bara-11	29.28	73.51	28.38	71.23
Bara-12	30.37	76.25	29.46	73.96
Bara-13	30.95	77.70	30.05	75.42
Bara-14	32.53	81.65	31.69	79.56
Bara-15	33.09	83.06	32.25	80.95
Bara-16	33.41	83.86	32.57	81.75

Transformatör bağlantı şekli değiştirilerek YNyn bağlantı grubu kullanılmış ancak toprak direnci yine 0 ohm olarak sabit tutulduğu durumda oluşan faz-toprak kısa devre akımı incelenmiştir. Bağlantı şekli YNyn olarak değiştirildiği için arıza hem şebeke hem de rüzgâr türbinlerinden beslenecektir. Bu durum her iki taraftaki koruma elemanları önemli rol oynamaktadır. Modellenen güç sisteminin tüm baralarında gerçekleşen faz-toprak kısa devre analizi, YNyn transformatör bağlantısı ve topraklama direnci 0 ohm olarak EK 3-C'de verilmiştir.

Çıktı sonuçları incelendiğinde Dyn bağlantıya benzer sonuçların alındığı ancak, rüzgâr santrallerinin devrede olmadığı halde şebeke tarafındaki kısa devre akımların azda olsa artış olduğunu gözlenmiştir. Rüzgâr türbinlerinin devreye girmesi ile de hem şebeke hem de rüzgâr türbini tarafında kısa devre akımlarının artışı gözlemiştir. Bu durum Tablo 6.19'da tüm baralarda türbinler devrede iken ve türbinler devrede değil iken oluşan değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.19. Modellenen sistemde transformatör bağlantısı YNyn için faz-toprak kısa devre değerleri

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken	
	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)
YNyn Bağlantı				
RES 34.5 kV (PCC)	4.38	87.33	4.27	85.02
Bara-1	3.71	73.83	3.60	71.80
Bara-2	4.25	84.68	4.14	82.44
Bara-3	2.52	50.23	2.45	48.87

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken	
	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)
Bara-4	2.71	54.06	2.64	52.53
Bara-5	3.02	60.25	2.94	58.50
Bara-6	3.21	63.85	3.11	62
Bara-7	3.75	74.75	3.66	72.89
Bara-8	3.99	79.39	3.88	77.33
Bara-9	4.13	82.18	4.02	80.01
Bara-10	35.25	14.04	34.77	13.85
Bara-11	36.04	14.36	35.57	14.17
Bara-12	37.19	14.81	36.73	14.63
Bara-13	37.79	15.06	37.35	14.88
Bara-14	38.89	15.49	38.53	15.35
Bara-15	39.46	15.72	39.10	15.58
Bara-16	39.79	15.85	39.44	15.71

Transformatör bağlantı şekli YNyn, topraklama direnci ise 20 ohm olduğu durumda oluşan faz-toprak kısa devre akımı incelenmiştir. Modellenen güç sisteminin tüm baralarında gerçekleşen üç faz kısa devre analizi EK 3-D'de verilmiştir.

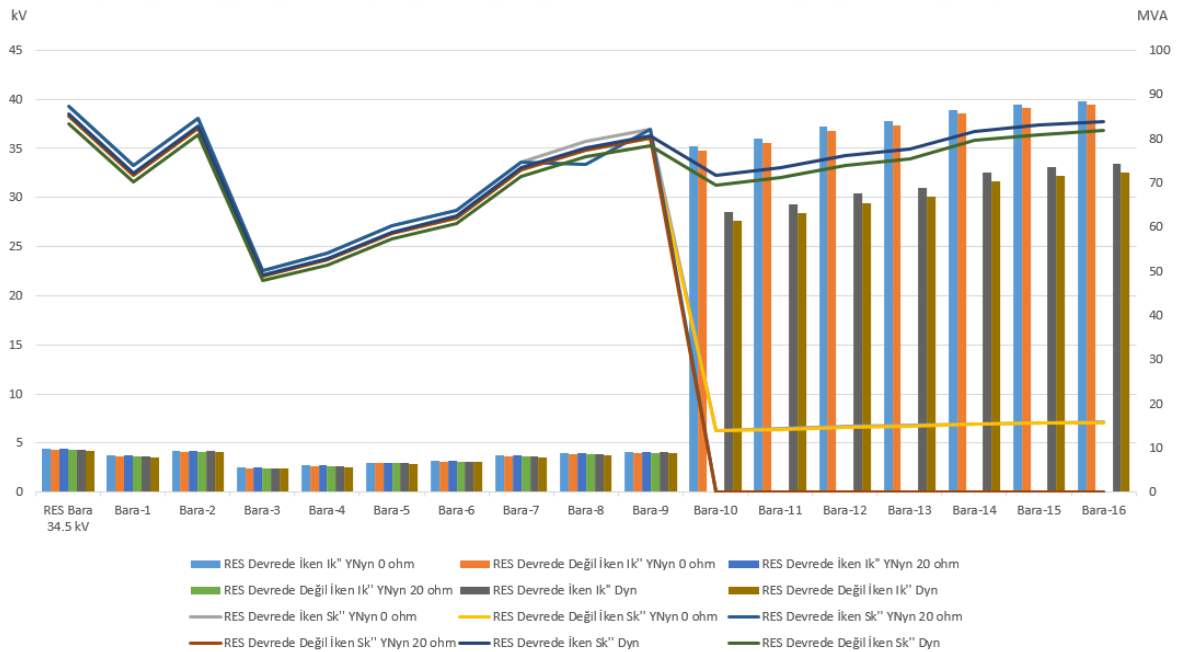
Burada topraklama direncinin önemi ortaya çıkmış ve kısa devre arıza akımları topraklama direncinin 20 ohm olması ile birlikte azalmıştır. Bu durum Tablo 6.20'de tüm baralarda türbinler devrede iken ve türbinler devrede değil iken oluşan değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.20. Modellenen sistemde transformatör bağlantısı YNyn ve topraklama direnci 20 ohm için faz-toprak kısa devre değerleri

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken	
	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)	$I_{k''}$ (kA)	$S_{k''}$ (MVA)
YNyn Bağlantı				
RES 34.5 kV (PCC)	4.38	87.33	4.27	85.02
Bara-1	3.71	73.83	3.60	71.80
Bara-2	4.25	84.68	4.14	82.44
Bara-3	2.52	50.23	2.45	48.87
Bara-4	2.71	54.06	2.64	52.53
Bara-5	3.02	60.25	2.94	58.50
Bara-6	3.21	63.85	3.11	62
Bara-7	3.75	74.75	3.66	72.89
Bara-8	3.99	74.17	3.88	77.33

Arıza Noktası	RES Devrede İken		RES Devrede Değil İken		
	Dyn Bağlantı	I_k'' (kA)	Sk'' (MVA)	I_k'' (kA)	Sk'' (MVA)
Bara-9		4.13	82.18	4.02	80.01
Bara-10		0.02	0.01	0.02	0.01
Bara-11		0.02	0.01	0.02	0.01
Bara-12		0.02	0.01	0.02	0.01
Bara-13		0.02	0.01	0.02	0.01
Bara-14		0.02	0.01	0.02	0.01
Bara-15		0.02	0.01	0.02	0.01
Bara-16		0.02	0.01	0.02	0.01

Faz-toprak kısa devresinde yapılan bu üç farklı durumda topraklama direncinin kullanılması ile rüzgâr türbinlerinin bağlı olduğu baralarda arıza akımlarında ciddi oranlarda düşüş görülmüştür. Sisteme dâhil edilen rüzgâr türbinlerinde topraklama direncinin kullanılmasının, koruma için ne kadar gerekli olduğu ortaya çıkmıştır. Faz-toprak kısa devre arızasında bağlantı şekli ve topraklama direncinin değişmesi ile arıza akımı ve kısa devre gücünün nasıl değiştiğini gösteren grafik Şekil 6.24'te gösterilmiştir.



Şekil 6.24. Faz-toprak kısa devre akım ve kısa devre güç grafiği

Bu problemler modern röle yardımıyla giderilebilir ancak hem bu yöntemden daha karmaşık hem de daha maliyetli bir yöntemdir. Bu sebeple kesintisiz ve kaliteli enerji sağlanabilmesi için faz-toprak kısa devre arızalarını bu yöntemle sınırlandırılarak pratikte en çok karşılaşılabilecek muhtemelen arıza önlenmiş olacaktır.

6.5. Santral Malzemelerinde Maliyet Verimliliği

RES'in modellenmesinin ardından yapılan yük akış ve kısa devre analizleri ile birlikte koruma elamanlarının seçimi yapılmıştır. Gerçekleştirilen senaryolardaki durumların yıl içinde gerçekleşme oranları 4. bölümde tespit edilmiş bu oranlar Tablo 6.21'de verilmiştir. Bu durum hem malzeme hem de koruma ekipmanlarının seçiminde yol gösterici olmuştur. Ayrıca santral ve türbinlerin güçlerine göre belirlenen transformatör ve kablolarda yüklenme oranlarının belirlenmesinden sonra karakteristik özelliklerinde değişikliğe gidilmiştir. Koruma elemanlarının listesi Tablo 6.22'de belirtilmiştir.

Tablo 6.21.Geliştirilen senaryoların yıl içerisindeki muhtemel karşılama gün sayıları

Senaryolar	Yıl içerisindeki karşılaşılması muhtemel gün sayısı
Senaryo-1	46 gün
Senaryo-2	46 gün
Senaryo-3	319 gün
Senaryo-4	319 gün

Tablo 6.22.RES koruma ekipmanlarının listesi

Adı	Karakteristikler	Adet
Kesicili Giriş Hücre	34.5 kV 630 A 16 kA	1
Yük Ayırıcılı Çıkış Hücre	34.5 kV 630 A 16 kA	1
Parafudr	34.5 kV 10 kA	3
Termik Manyetik Şalter	400 V 70 kA	1
Koruma Rölesi	27, 49, 50, 50N, 51N, 59, 59N, 67, 67N, 74TCS, 81	1

Koruma rölesinin karakteristik harflendirmelerinin açıklaması Tablo 6.23'te belirtilmiştir.

Tablo 6.23.Koruma rölelerinin fonksiyonel açıklamaları

Cihaz numarası	Koruma rölesinin özelliği
27	Faz düşük gerilimi
49	Termik röle
50	Aşırı akım rölesi
50N	Aşırı akım rölesi (nötr için)
51N	Zaman gecikmeli aşırı akım rölesi
51N	Zaman gecikmeli aşırı akım rölesi (nötr için)
59	Faz aşırı gerilimi
59N	Artık aşırı gerilimi
67	Yönlü aşırı akım rölesi
67N	Yönlü aşırı akım rölesi (nötr için)
74TCS	Açma devresi denetimi
81	Frekans rölesi

Koruma elemanı olarak ayırıcı ve kesici seçimi yapılan analiz sonucunda, uygun değerlerde seçim gerçekleştirilmiştir. Parafudr seçiminde ise IEC 60664 standartlarına uygun olarak, olması gereken anlık darbe dayanım değerine göre belirlenmiştir. Parafudr tek noktada kullanmak yerine üç ayrı noktada kullanılarak darbe gerilimlerinin tamamının söndürülmesi sağlanmıştır. Ana dağıtım panosunda kullanılan parafudr darbe gerilimlerinin % 80'ni karşılarken, % 20'lik kısmını tali pano karşılamaktadır. Sönümlenemeyen % 0 ile % 1 arasında kalan kısımda yakın koruma olarak adlandırılan tali pano sonrası bir parafudr ile korumaya alınmıştır.

Koruma elemanlarının belirlenmesinin ardından, modelleme yapılırken santral ve türbin güçlerine göre seçilen transformatör ve kablolarda yük akış analizi sonucunda değişiklik olması gerektiği görüşmüştür. Yüklenme oranları tüm senaryolarda neredeyse % 50'nin altında kalmıştır. Bu durum gereksiz yere maliyete yol açmaktadır. Bu kriterler göz önüne alınarak transformatör ve kablolar daha alt katalog değerlerine uygun olarak seçilerek, maliyet verimliliği sağlanmıştır. Değişiklik yapılan malzeme listesi Tablo 6.24'te verilmiştir.

Tablo 6.24. Analiz sonrası değişiklik yapılan malzemeler

Modelleme Öncesi	Modelleme Sonrası	Birim Fiyat Farkı (₺)	Toplam (₺)
0.69/34.5 kV 6.3 MVA Transformatör	0.69/34.5 kV 5 MVA Transformatör	42.000	294.000
1 × 185 mm ² XLPE kablo	1 × 150 mm ² XLPE kablo	Metre başına 12	140.400
1 × 95 mm ² XLPE kablo	1 × 70 mm ² XLPE kablo	Metre başına 7	77.000

Matlab ile yapay sinir ağları kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada bir yıl içerisinde RES'in aktif olma oranı % 87.4 olup bu oran yıl bazında 319 gün olarak tespit edilmiştir. Ancak bazı durumlarda yüklerin enerji talebinin olmaması durumunda (senaryo-3), transformatör ve hatlar diğer durumlara göre daha fazla yüklenmiştir. Bu senaryo dikkate alındığında transformatör maksimum % 52.12, kablolar ise maksimum % 21.70 oranında yüklendiği tespit edilmiştir. Yapılan analiz çalışmasının ardından kablo kesitlerinin değişimi sonrasında yüklenme oranları, kısa devre ve gerilim düşümü bakımında uygun olduğu görülmüştür. 1 × 150 mm² XLPE kablo toplamda 11.7 km uzunluğunda kullanılarak 140.400 ₺ tasarruf edilmiştir. 1 × 70 mm² XLPE kablo ise 11 km uzunluğunda kullanılmış ve 77.000 ₺ tasarruf edilmiştir. Yedi adet transformatörün gücü bir kademe aşığı çekilmiş bu durumda maksimum yüklenme oranı % 65.7 olarak bulunmuş. Bu oranda dahi tam kapasiteye ulaşılmadığı görülmüş ancak santralde dağıtılmış üretim kaynağı bağlanabileceği göz önünü alınarak bu güç uygun görülmüştür. Yapılan değişiklik sonrası yedi adet transformatörde 294.000 ₺ tasarruf edilmiştir. Kablolar dahil tüm değişiklikler toplamda 511.400 ₺ tasarruf edilmiş, bu durum modelleme yapılarak santral kurulumu öncesi maliyet verimliliği açısından efektif sonuçlar vermiştir. Transformatör gücünün değişmesi sonrası AG bölgede kısa devre arıza akımlarında da bir miktar azalma görülmüş ve koruma elemanı olan termik manyetik şalter (TMS) 400V 50 kA olarak değiştirilmiştir. Değişiklikler sonrası yapılan yük akış analizi EK 4-A'da kısa devre analizi ise EK 4-B'de verilmiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, özellikle son on yılda hızla gelişen rüzgâr enerji santralleri konu alınmıştır. Yıl içerisinde sürekli değişiklik gösteren rüzgâr hızının tahmin edilmesi oldukça zordur. Ancak yapay sinir ağları kullanılarak yüksek doğruluk oranları ile tahmin yapılabilmektedir. Konya Ardıçlı mevkiine ait 2019 yılı için hava durumu verileri MeteoBlue şirketinde elde edilmiş ve yapay sinir ağları ile bölgenin rüzgâr hızı tahmini gerçekleştirilmiştir. Ardından bu bölge için yedi adet rüzgâr türbine sahip bir rüzgâr santrali Dıgsilent Powerfactory programında modellenmiş ve yük akış analizi ve kısa devre analizi gerçekleştirilmiştir.

Yapay sinir ağları ile gerçekleştirilen bu çalışmada en küçük hata ile rüzgâr hızı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışma gerçekleştirilirken birçok algoritma denenmiş ancak en yüksek başarı oranı “trainlm” eğitim algoritması, learnqdm öğrenme fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu olarak tanjant sigmoid (tansig) fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada sonucunda elde edilen sonuçlar, oluşturulan modelin güvenilir ve tutarlı olduğunu doğrulamıştır. Modelin tahmin ettiği sonuçlarda eğitim, doğrulama ve test aşamalarının hepsinde % 90 üzerinde başarılı sonuç vermiş ve test aşamasında ağa daha önce hiç girilmeyen verileri ise % 92.76 doğruluk seviyesinde elde edebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Böylece oluşturulan ağın ezberleme yapmadan başarılı bir şekilde öğrenme gerçekleştirdiği görülmüştür. Bu sayede bölgenin rüzgâr enerji santrali için uygun rüzgâr hızına sahip olduğu tespit edilmiştir. Yılın belirli günlerinde rüzgâr hızının aşırı artarak, elektriksel ekipmanlara zarar vermesi sonucu kısa devre arızası oluşturabileceği gün sayısı, 14 gün olarak belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasının ikinci aşamasında ise, yedi adet türbine sahip rüzgâr santrali elektriksel olarak modellenmiş ve santralin çalışması aşamasında karşılaşılabilecek muhtemel olan dört farklı senaryo için yük akış analizi ve kısa devre analizi gerçekleştirilmiştir. Oluşması muhtemel bu senaryolar için yük akış analizinde rüzgâr santrallerinin gerilim seviyesi kararlılığı açısından olumsuz bir etkisi olmayacağı tespit edilmiştir. Ayrıca yükler devredeyken, rüzgâr enerji santralinin de devreye girmesi durumunda transformatörlerdeki yüklenme oranı azaltılarak, transformatör seçiminde maliyet açısından olumlu katkı sağlamıştır. Pratikte kısa devre arızası olarak % 70 gibi yüksek bir oranda karşılaşılan faz-toprak arızası için çözüm önerisi olarak sistemde

bulunan yükseltici güç transformatörlerinin YNyn bağlanması ve sekonder kısmına 20 ohm'luk Petersen bobini bağlanması durumunda ve faz-toprak kısa devre akımının 30 kA seviyelerinden 0.02 kA seviyesine düşürülebileceği sonucu elde edilmiştir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen yöntem, saatlik hava durumu verilerinin elde edilmesi ile rüzgâr santralının üretebileceği elektrik enerjisi gücü saatlik olarak ileriye dönük hesaplanabilir. Bu sayede gün öncesi ve gün içi piyasasına teklif verilirken yüksek doğruluk oranları ile bu işlem gerçekleştirilmesi sağlanabilir. Çalışma sonucu elde edilen verilerin yanı sıra elektrik modellenmesi gerçekleştirilen rüzgâr santralinde gelecekte gerçekleştirilmesi gereken bir revizyon durumunda sistemde kullanılacak şalt cihazlarının seçimi yapılarak olası muhtemel arıza durumları için alınması gereken önlemler önceden tespit edilebilir. Bu sayede bu çalışma sonucu elde edilen sonuçlar gelecekte rüzgâr santrali kurumu işini gerçekleştirecek çalışmalara yol gösterici olacaktır. Kurulacak rüzgâr veya güneş santralleri için karşılaşılabilecek bir arıza durumunda sistemin koruması için yapılacak koordinasyon çalışmalarının daha etkin bir şekilde yapılabilmesini sağlanabilir.

Bu tez çalışmasında benimsenen yöntem, gelecekteki yeni çalışmalar için kısa devre analizi ve kriterleri için bir zemin oluşturabilir. Bunun yanında çalışmalar, harmonik analizi ve geçici hal durum analizleri de kapsayacak şekilde genişletilebilir. Böylece kesintisiz ve kaliteli bir elektrik enerjisi için koruma sisteminin koordinasyonu daha iyi yapılabilir. Meteorolojik verilere dayalı olarak tahmin edilen rüzgâr hızı, gelecek çalışmalara öncü olarak günlük üretilen enerji miktarı hesaplanabilir.

8. KAYNAKLAR

A. Berizzi, "Short-circuit current calculation: a comparison between methods of IEC and ANSI standards using dynamic simulation as reference," IEEE Transactions on Industry Applications, 1099-1106, 1994.

A. Stuienvolt. "Short-Circuit Behavior of Distribution Networks with Distributed Generation," Master graduation paper, publ. of the Eindhoven University of Technology (TUE). Department of Electrical Engineering, 2008.

ABB, 2019, OG/AG Trafo Merkezleri; Kısa Devre Hesaplama Teorisi ve Örnekleri.

Ackermann, T.,(2005), Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Chichester.

Ağaçbiçer G.(2010), "Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Türkiye Ekonomisine Katkısı Ve Yapılan Swot Analizler",Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi.

Anonim, 2020, <http://www.elektrikport.com.tr> son erişim: 01.04.2020.

Atputharajah A., Saha T.K. 2009. Power System Blackouts - Literature Review. 2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 460-465, Sri Lanka.

Baroudi, J.A., Dinavahi, V. ve Knight, A.M., (2007), "A review of power converter topologies for wind generators", Renew., Energy.

Cigizoglu, H.K., and Kisi, O., " Flow prediction by three back propagation techniques using k-fold partitioning of neural network training data" Nordic Hydrology 36 (1), 49-64, (2005).

D. D. Li (2008), "Analysis and calculation of short circuit current of doubly fed induction generator", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, USA.

de Alegria, I.M.f Andreu J., Martin, J. L., Ibanez, P., Villate, J. L., Camblong, H. (2007). "Connection requirements for wind farms: A survey on technical requirements and regulation", 1858-1872.

Dragomir, D., Golovanov, N., Postolache, P., Toader, C., (2009). "The connection to the grid of wind turbines", PowerTech, Bucharest.

Durak, M., Özer, S., Rüzgâr Enerjisi, Teori ve Uygulama, İmpress Basım, Ankara, Mart 2008.

E. Muljadi , V. Gevorgian (2011) "Short-circuit modeling of a wind power plant" IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, USA.

EAE Elektroteknik "Bakır bara düzeneklerinin ugulaması", <https://eaelektroteknik.com> son erişim: 01.04.2020.

EİEİ. 2019. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA). EİEİ Genel Müdürlüğü, Ankara.

Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği, 2013, Üretim ve Tasarım Esasları.

Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye, T. J. (2008). Power System Analysis and Design. Cengage Learning, Stamford.

Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U. ve Eskildsen, K., (2001), "Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines", IECON 01, 29 Nov.-12 Dec. 2001, Denver, 2000-2005.

Hapel, K. H. 1990. Festigkeitsanalyse Dynamisch Beanspruchter Offshore Konstruktionen, 379 s., Vieweg Verlag, Braunschweig.

Haykin, S. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation" MacMillan. New York (1996).

International Standard, CEI/IEC 60909-0, CEI/IEC 1288/2000, 2001.

Johnsen, David T., Christiansen Willi, "Analysis of requirement in selected Grid Codes", 2006.

Kakilli, A. (2013). System analysis with the MVA Method for symmetrical three-phase faults. TEM Journal. Cilt 2, Sf. 51-56.

Kamruzzaman SM., Abdul Hamid Md and Jehad Sarkar AM. ERANN, "An algorithm to extract symbolic rules from trained artificial neural networks.", IETE Journal Research 2013; 58-2.

Kaşıkcı, İ. (2007). Elektrik Tesislerinde Kısa Devre Hesapları ve Uygulamaları IEC 60909. Birsen Yayınevi, İstanbul.

Kaya, K., Koç., E. 2015. "Yatay Eksenli Rüzgâr Türbinlerinde Kanat Profil Tasarımı ve Üretim Esasları," Mühendis ve Makina, cilt 56, sayı 670, s. 38-48.

Kisi, O., "Multi-layer perceptrons with Levenberg–Marquardt training algorithm for suspended sediment concentration prediction and estimation" Hydrological Sciences Journal 49 (6), 1025–1040 (2004).

Küçük, S. (2005). Elektrik Tesislerinde Arızalar. Tüpraş, Kocaeli.

Laughton A., Warne D.F., 16. Basım 2003, "Electrical Engineer's Reference Book", 104-122.

M. R. Aghaebrahimi ; M. Amiri ; M. Kamali Moghaddam, (2008). "A short circuit study of an induction generator wind farm considering wind speed changes", 40th North American Power Symposium, Calgary, AB, Canada.

M. R. Aghaebrahimi, M. Amiri, M. Kamali Moghaddam (2008), “A short circuit study of an induction generator wind farm considering wind speed changes”, 40th North American Power Symposium, Calgary, AB, Canada.

M. Saltan, “Yapay Sinir Ağları Ders Notları” (2019), erişim adresi: www.websitem.gazi.edu.tr/site/saltan/files/download/id/93003 son erişim: 25.03.2020.

Masters, G.M., (2004), Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons, New Jersey.

Milad G., Payam F., Farshid A.B., Reza E. (2015). “Comparative assessment of double-fed induction generator and full converter generator wind turbines on short circuits in distribution systems”, IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Rome, Italy.

Mingyang, L.,Wenxia,P. ve Gang,Y., (2017).“A new calculation method of short-circuit currents contributed by doubly-fed wind turbines cluster”, IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, San Diego, CA, USA.

Muhammad Mat Naain, Ahmed F. Zobia, Mohamed Darwish (2015) “Short circuit study of fixed speed wind turbines with STATCOM in distribution networks”, 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, UK.

Nick, M., (2011). “Wind Power Optimal Capacity Allocation To Remote Areas Taking into Account Transmission Connection Requirements”, IET Renewable Power Generation, 347-355.

Okkan U., Mollamahmutoğlu A., “Yiğitler Çayı Günlük Akımlarının Yapay Sinir Ağları ve Regresyon Analizi ile Modellenmesi”, DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Sayı 23, Aralık 2010.

Özdamar A. ve Kavas G., Rüzgâr türbini pervanesi dizaynı üzerine bir araştırma.Güneş Günü Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s 151-160,Kayseri,1999.

Öztemel, E., “Yapay Sinir Ağları” Papatya Yayıncılık. İstanbul (2012).

Patel, M.R., (2006), Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation (Second Edition), CRC Press, Boca Raton.

R. J. Nelson ve H. Ma, (2011). “Short-circuit contributions of full-converter wind turbines”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA.

Rashid, M.H., (2001), Power Electronics for Renewable Energy Sources, Academic Press Series in Engineering, USA.

S. Das,S. Santoso (2012), “Effect of wind speed variation on the short-circuit contribution of a wind turbine”, IEEE Power and Energy Society General Meeting,San Diego, CA, USA.

Sallam A., Malik P., Second Edition 2019, “Electric Distribution Systems”, (265-279).
Singh R., Sinhg A.K., Pal B.C., 2015, “Stability Analysis of Networked Control in Smart Grids”, IEEE Transactions on Smart Grid, 381-390.

Salami Y., Firouzi M., (2011), “Dynamic performance of wind farms with bridge-type superconducting fault current limiter in distribution grid”, 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Sharjah, United Arab Emirates.

Short-circuit currents in three-phase a.c. systems–Part 0: Calculation of currents, IEC Standard 60909-0, Haziran 2001.

Skapura, D. M. “Building Neural Networks” Addison-Wesley, New York (1996).

Tavman İ.H. ve Önder T.K., Türkiye’de Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli ve Kullanımı, Yenilenebilir Enerji kaynakları Sempozyumu, 316-323, İzmir 2001.

T.C. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. “2019 Yılı Konya İli Ardıçlı Bölgesi için Rüzgâr Hızı Verileri”,
https://www.meteoblue.com/tr/hava/historyclimate/weatherarchive/konya_t%C3%BCrkiye_306571 son erişim: 03.04.2020.

Thomas Lager, Lutz Hofmann,(2019) “Advanced Short-Circuit Current Calculation for Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Turbines According to IEC 60909”, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), Bucharest, Romania, Romania.

Türeb 2019, Türkiye Rüzgâr Enerjisi İstatistik Raporu,
https://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/istatistik_raporu_temmuz_2019.pdf son erişim: 09.02.2020.

UCTE-Final Report of the Investigation Committee on the 28 September 2003 Blackout in Italy. http://www.rae.gr/old/cases/C13/italy/UCTE_rept.pdf son erişim: 29.03.2020.

Uzun Y., Özcan M., “Rule extraction and performance estimation by using variable neighborhood search for solar power plant in Konya. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Science”, 2020; 28(2): 645-635.

EKLER**EK-1:** YSA'da Kullanılan Girdi ve Çıktı Katmanı Verilerin Tamamı

Gün	Günlük Ortalama Rüzgâr Hızı (10m)	Günlük Ortalama Sıcaklık	Günlük Ortalama Nem	Günlük Ortalama Basınç	Günlük Maksimum Rüzgâr Hızı (10m)
1	3.7	4.8	85.25	1033.57	7.91
2	4.0	2.2	79.17	1036.07	8.02
3	1.3	0.1	75.71	1038.88	4.40
4	2.4	1.2	79.50	1038.18	8.30
5	7.9	1.9	85.25	1033.55	11.72
6	5.0	3.0	82.08	1032.93	8.52
7	2.2	2.8	80.75	1033.59	6.11
8	9.6	4.3	82.08	1022.75	14.70
9	8.6	2.6	76.75	1016.70	12.32
10	6.5	0.4	82.88	1022.93	9.71
11	2.6	0.6	76.00	1027.85	9.31
12	8.7	3.7	79.58	1026.46	16.07
13	10.6	6.4	82.62	1015.29	15.85
14	7.2	5.5	81.21	1015.88	11.91
15	3.1	3.3	80.75	1024.16	7.71
16	1.9	4.2	69.79	1015.90	5.51
17	6.5	6.0	71.67	1011.88	10.70
18	3.7	1.1	74.58	1019.37	7.34
19	2.7	0.6	67.71	1015.95	7.24
20	2.0	3.0	74.42	1014.25	4.34
21	2.6	0.1	77.79	1020.57	5.05
22	1.2	-0.4	75.83	1010.97	4.82
23	3.1	1.2	73.25	997.85	8.57
24	3.4	-1.5	79.75	1008.42	5.88
25	1.3	-0.9	71.21	1018.20	3.24
26	5.5	4.5	79.67	1013.93	11.54
27	9.5	6.1	71.79	995.60	15.90
28	11.4	2.3	82.92	1000.77	16.32
29	5.7	1.9	75.04	1005.22	11.10
30	12.6	1.4	68.29	995.73	21.85
31	5.8	1.9	72.38	996.66	13.65
32	3.2	6.3	77.79	988.56	8.97
33	2.6	5.7	76.71	994.38	7.00
34	5.8	1.8	83.71	1015.59	10.00

35	3.6	0.7	74.29	1028.75	7.57
36	2.3	2.5	64.29	1029.17	5.75
37	1.7	2.7	57.79	1027.00	6.44
38	3.3	5.1	72.46	1019.50	9.02
39	3.4	4.8	74.54	1019.87	6.94
40	6.4	8.5	67.71	1015.55	12.87
41	10.3	8.5	68.21	1007.10	19.31
42	6.9	3.7	78.00	1021.22	14.10
43	1.9	3.7	75.62	1035.75	6.08
44	2.5	4.3	66.38	1037.07	6.57
45	2.3	5.8	64.71	1037.00	6.88
46	2.9	5.8	66.38	1033.35	7.87
47	2.0	8.3	55.46	1029.79	5.81
48	2.0	9.4	46.33	1025.64	5.50
49	1.2	8.8	53.71	1021.66	4.91
50	2.3	8.4	63.25	1021.42	6.48
51	1.2	9.4	73.67	1024.22	3.61
52	1.8	10.1	68.25	1028.33	5.74
53	2.5	9.5	73.38	1032.88	7.62
54	4.7	7.0	50.21	1035.39	9.34
55	2.1	5.3	40.58	1037.20	5.66
56	1.3	7.1	53.92	1036.00	3.58
57	1.9	9.3	68.96	1033.53	6.80
58	1.7	10.4	60.88	1027.59	6.17
59	4.8	11.3	55.79	1021.79	10.82
60	6.7	8.5	78.83	1018.24	12.03
61	4.1	8.5	73.33	1019.80	9.10
62	3.4	10.4	60.04	1016.37	9.34
63	9.0	9.8	55.67	1006.27	17.40
64	6.9	7.8	62.25	1013.34	10.70
65	4.1	9.8	48.67	1006.93	9.20
66	6.8	8.8	61.83	1004.48	14.76
67	5.6	8.5	61.67	1017.40	9.71
68	6.1	9.9	66.58	1021.76	12.17
69	8.6	11.5	69.17	1017.71	15.40
70	7.7	4.3	68.21	1025.38	13.47
71	4.7	6.8	51.08	1021.88	12.48
72	8.5	6.0	70.67	1016.96	14.52
73	9.9	5.8	78.54	1014.93	16.70
74	9.5	10.4	80.62	1014.50	14.76
75	6.3	11.3	64.83	1015.97	12.53
76	5.6	8.9	57.88	1010.17	11.92
77	5.3	4.5	73.46	1021.11	10.70
78	1.8	6.5	64.38	1027.91	3.77
79	2.2	6.1	61.21	1033.35	6.32
80	1.4	6.9	62.67	1032.73	5.70

81	1.4	10.2	57.83	1030.06	6.89
82	1.9	12.6	59.88	1027.70	6.49
83	2.2	11.9	73.62	1024.34	6.65
84	5.0	8.2	62.83	1024.12	8.92
85	3.3	5.8	67.21	1029.97	7.99
86	2.7	7.6	60.71	1031.56	5.28
87	2.8	8.2	63.58	1032.43	7.13
88	1.3	10.3	62.71	1029.61	3.30
89	1.3	13.4	44.88	1024.80	2.35
90	1.5	13.9	52.54	1019.67	5.58
91	1.4	11.6	71.54	1017.25	2.53
92	3.1	14.1	53.58	1010.36	9.17
93	4.1	7.8	74.12	1003.81	9.79
94	3.6	2.3	89.42	1002.44	8.33
95	3.6	5.9	69.25	1004.60	8.68
96	2.2	10.0	58.08	1002.05	5.75
97	4.9	9.9	72.17	1005.88	8.70
98	2.5	11.0	70.04	1009.63	4.59
99	2.2	10.8	72.08	1009.96	5.37
100	2.6	9.1	88.12	1010.11	5.97
101	4.5	9.2	70.12	1015.25	9.12
102	3.9	7.4	63.00	1019.08	7.84
103	4.4	5.1	66.33	1020.12	7.32
104	3.8	5.1	72.92	1020.43	9.11
105	3.1	10.0	66.33	1019.71	7.54
106	1.8	11.0	62.08	1018.45	7.88
107	1.7	13.9	69.50	1020.97	4.20
108	2.6	14.8	54.12	1021.07	8.51
109	2.2	16.0	53.83	1025.06	7.96
110	2.6	17.1	52.88	1024.57	5.95
111	2.6	16.5	52.17	1017.80	6.49
112	4.6	16.0	45.62	1005.17	8.90
113	2.3	15.9	52.83	997.18	8.41
114	3.9	16.0	55.42	1002.27	11.78
115	4.1	14.9	56.96	1007.69	8.81
116	3.5	9.9	73.50	1015.83	7.45
117	5.6	9.4	71.46	1020.37	10.83
118	4.1	7.3	73.54	1020.79	7.71
119	2.1	10.1	64.00	1021.51	4.92
120	2.6	12.2	66.96	1018.44	5.95
121	1.7	13.5	65.33	1014.81	4.99
122	3.1	13.0	69.04	1011.01	9.03
123	3.5	11.0	73.92	1011.20	7.71
124	5.1	6.7	78.92	1010.12	12.90
125	5.7	5.2	65.88	1017.70	9.51
126	2.2	7.8	59.08	1021.15	4.46

127	1.6	11.2	51.67	1016.95	3.05
128	4.0	11.6	71.33	1006.32	10.58
129	7.1	11.7	66.71	1004.25	13.12
130	2.6	12.8	68.33	1011.59	6.40
131	6.4	12.9	69.25	1014.85	14.49
132	4.6	10.1	66.21	1028.30	8.80
133	4.5	10.2	54.92	1031.80	8.99
134	3.7	9.9	50.50	1027.38	7.34
135	3.0	9.5	56.33	1021.35	6.22
136	2.1	10.7	68.04	1013.94	5.80
137	3.2	13.7	66.00	1006.35	7.56
138	1.5	14.7	66.96	1005.27	4.52
139	2.3	14.1	79.96	1004.71	4.46
140	5.2	13.7	85.33	1006.51	9.63
141	5.9	14.2	75.33	1012.88	10.24
142	2.5	15.1	60.79	1018.79	5.89
143	1.6	16.3	61.62	1018.44	4.20
144	2.5	18.2	58.00	1014.21	5.58
145	2.0	16.5	69.00	1015.38	5.98
146	1.2	16.9	67.04	1016.26	3.45
147	3.0	17.0	62.96	1011.20	5.79
148	4.3	13.1	74.54	1010.83	7.35
149	3.1	12.6	69.12	1020.44	5.75
150	1.2	15.9	57.83	1025.94	2.92
151	1.5	18.8	59.62	1025.42	3.85
152	1.7	21.3	59.17	1021.69	5.69
153	1.4	23.0	56.12	1016.95	5.60
154	2.8	22.6	63.33	1015.18	9.88
155	4.1	23.9	58.12	1010.07	7.40
156	3.1	23.8	51.58	1005.21	9.44
157	3.3	15.3	62.04	1013.57	12.19
158	5.0	17.9	61.67	1012.24	12.70
159	3.8	16.2	48.29	1023.08	7.62
160	2.3	15.7	72.54	1020.33	6.93
161	2.5	16.0	89.08	1012.57	6.11
162	3.6	14.1	86.21	1010.53	7.05
163	2.1	15.8	68.08	1011.54	8.15
164	1.8	19.0	53.38	1014.59	7.24
165	3.8	21.5	56.83	1012.07	9.46
166	3.2	19.3	73.25	1014.77	10.60
167	1.6	18.1	71.25	1020.60	4.31
168	1.8	20.5	63.29	1017.71	3.37
169	1.3	23.4	60.54	1014.23	4.90
170	2.6	24.5	50.21	1010.88	7.14
171	1.6	20.0	74.12	1014.45	4.70
172	1.7	19.0	72.42	1017.25	4.95

173	1.5	17.9	85.12	1016.84	4.20
174	2.6	21.1	72.17	1016.57	6.12
175	3.5	24.5	62.33	1017.01	7.02
176	2.0	27.5	60.08	1018.69	7.31
177	1.2	30.5	57.17	1021.79	3.18
178	3.6	27.6	68.08	1021.91	8.32
179	2.4	24.3	56.67	1020.78	4.83
180	2.4	25.6	56.88	1017.21	7.29
181	3.0	28.5	56.71	1016.08	7.78
182	2.9	27.7	61.62	1016.47	6.11
183	2.8	22.1	66.17	1018.50	6.41
184	1.6	21.2	61.75	1018.76	3.57
185	2.2	20.7	63.92	1019.97	6.40
186	1.9	23.9	50.08	1017.12	3.85
187	2.3	25.4	52.71	1012.07	10.13
188	3.0	22.4	68.33	1011.81	6.70
189	3.5	18.1	67.54	1015.30	7.50
190	2.4	17.4	60.21	1016.70	7.31
191	1.6	17.7	58.12	1018.05	5.11
192	1.6	19.2	60.50	1014.85	5.47
193	3.1	20.2	66.54	1013.55	7.14
194	2.2	18.9	66.54	1016.72	4.46
195	2.6	17.7	70.21	1015.23	6.38
196	2.5	18.5	67.46	1014.72	4.40
197	1.8	20.1	63.21	1016.03	3.61
198	1.6	22.3	54.33	1013.53	4.57
199	2.4	23.2	50.00	1012.32	4.46
200	1.8	23.3	56.12	1014.90	4.36
201	2.9	25.4	56.00	1014.51	6.54
202	2.5	24.4	62.83	1020.00	5.59
203	2.5	24.2	60.75	1022.58	6.12
204	2.3	26.6	54.75	1019.12	5.63
205	1.3	28.7	55.29	1015.52	6.85
206	2.7	29.3	55.62	1013.85	6.98
207	1.8	29.2	52.50	1009.42	6.31
208	2.6	22.1	76.12	1004.17	6.24
209	4.8	18.7	80.33	1004.48	9.45
210	1.7	21.0	65.00	1010.35	3.01
211	2.9	22.8	62.00	1013.00	9.83
212	2.0	20.4	61.71	1017.23	5.83
213	2.2	20.8	55.79	1016.91	5.97
214	0.8	22.0	54.50	1015.18	2.28
215	2.1	21.0	56.08	1015.47	6.13
216	2.6	22.1	58.29	1014.50	6.40
217	2.9	25.2	54.88	1012.60	5.71
218	2.7	24.7	63.58	1011.73	6.66

219	2.7	19.8	86.17	1010.36	7.14
220	1.9	21.4	66.50	1013.12	5.11
221	3.4	26.0	59.12	1010.86	7.62
222	3.3	22.6	63.08	1017.05	7.60
223	2.5	21.2	63.04	1016.48	8.64
224	1.9	16.8	79.46	1018.55	4.80
225	2.1	17.8	61.79	1019.72	4.76
226	1.2	18.3	53.29	1018.48	3.05
227	4.0	19.3	56.25	1016.36	7.80
228	1.5	19.9	58.38	1017.72	4.46
229	2.5	21.5	58.54	1013.53	5.64
230	3.1	24.4	58.92	1010.58	8.35
231	1.8	21.7	74.71	1016.64	4.98
232	2.3	16.3	83.79	1022.58	5.59
233	2.7	17.5	69.29	1025.32	6.42
234	1.2	19.1	72.08	1023.37	3.05
235	1.3	21.7	68.46	1022.36	3.83
236	1.4	22.6	67.42	1019.47	4.19
237	1.0	23.5	59.21	1018.20	1.92
238	1.5	24.2	56.33	1017.74	3.70
239	1.4	24.6	54.71	1016.36	5.36
240	1.8	26.4	54.00	1015.97	3.92
241	1.5	24.7	61.00	1019.21	3.54
242	1.6	24.1	65.25	1020.68	3.57
243	1.7	24.4	62.79	1015.12	4.00
244	2.6	21.9	61.83	1013.83	5.64
245	2.0	17.8	69.67	1020.63	5.80
246	1.3	17.7	61.88	1023.69	3.84
247	1.8	19.7	55.79	1018.37	5.47
248	3.5	16.3	60.96	1020.25	6.21
249	2.8	15.1	65.58	1022.55	5.87
250	2.2	17.0	53.71	1019.34	4.97
251	4.0	12.9	77.75	1017.96	6.94
252	2.8	14.1	65.21	1016.38	6.13
253	2.5	16.2	62.00	1016.04	7.50
254	1.6	16.9	61.17	1023.38	3.71
255	1.2	19.9	47.58	1029.42	2.92
256	1.8	20.6	61.54	1030.65	5.28
257	1.2	20.7	73.25	1028.61	3.64
258	1.8	22.1	69.83	1023.70	5.05
259	1.9	23.3	63.04	1018.90	5.51
260	2.9	18.8	68.29	1018.25	5.79
261	1.9	14.2	66.08	1021.75	5.94
262	2.4	12.1	60.42	1025.20	5.41
263	2.8	12.9	54.12	1024.64	7.95
264	3.2	16.3	56.46	1018.56	7.84

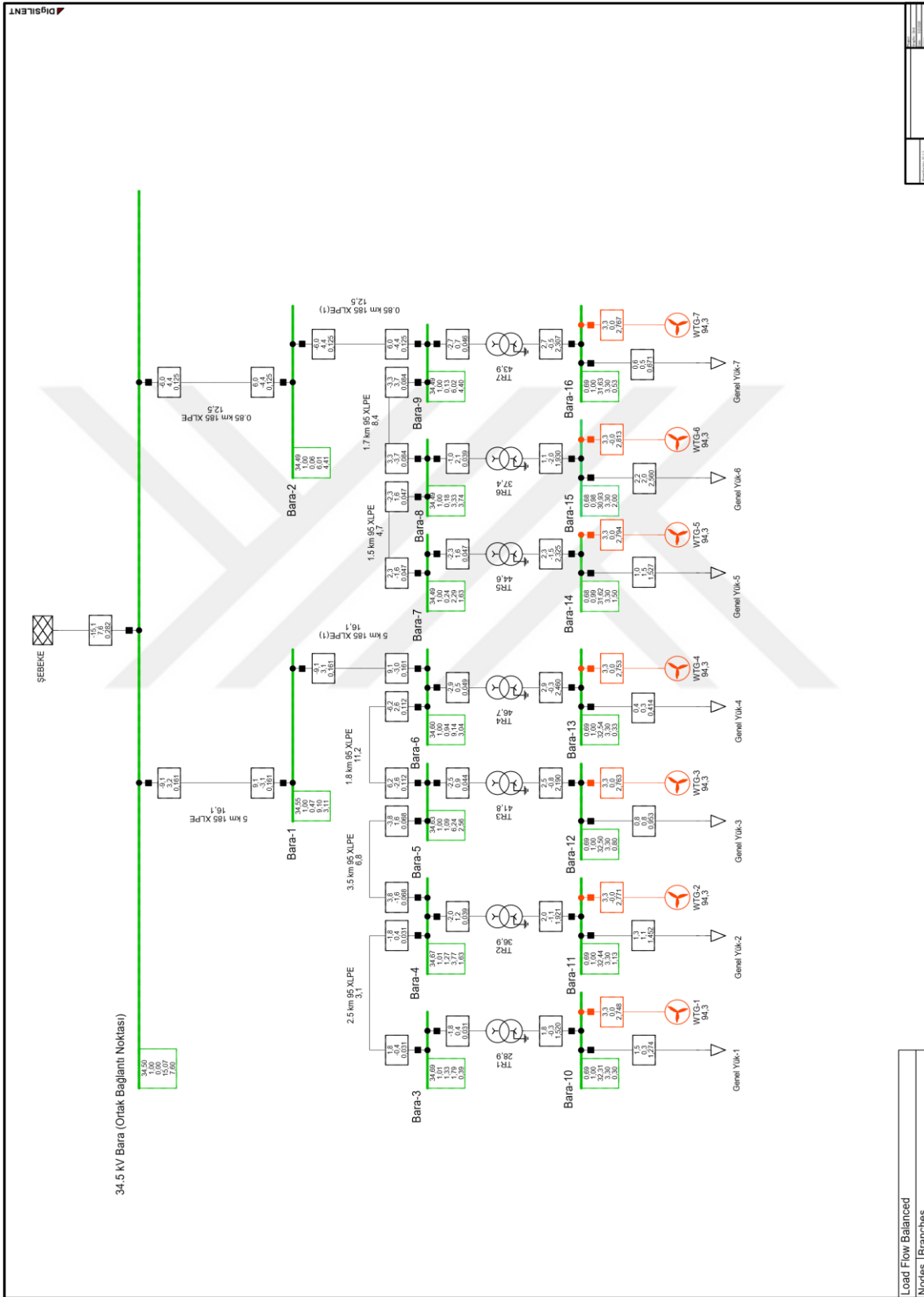
265	2.7	19.5	65.46	1011.70	10.34
266	4.1	15.9	71.67	1016.77	11.95
267	2.8	15.4	72.17	1013.59	6.89
268	4.6	16.0	66.67	1011.40	8.16
269	4.3	17.6	70.58	1014.17	7.99
270	4.2	17.4	69.17	1014.98	8.88
271	4.2	15.9	65.04	1018.16	7.43
272	4.7	18.4	51.54	1011.62	12.21
273	5.2	16.9	64.29	1014.13	11.57
274	3.3	17.7	62.50	1008.80	10.07
275	5.1	13.7	78.62	1010.97	9.02
276	1.2	10.3	65.83	1018.97	3.24
277	3.6	11.9	68.62	1011.94	9.83
278	4.4	12.9	82.12	1013.56	8.40
279	2.9	13.7	82.08	1014.10	10.11
280	2.8	11.7	76.88	1017.73	7.37
281	2.3	15.4	68.04	1014.78	9.31
282	5.3	13.1	75.50	1014.90	10.62
283	5.3	12.1	70.25	1020.19	8.53
284	2.0	14.0	61.83	1019.93	4.92
285	2.4	17.7	64.42	1016.14	7.68
286	3.3	19.4	62.92	1015.23	7.31
287	3.0	18.4	63.33	1013.43	7.41
288	5.0	13.5	75.96	1009.76	10.65
289	2.3	12.9	64.08	1015.98	7.34
290	2.9	16.3	59.29	1015.00	5.50
291	3.3	16.3	71.88	1012.65	8.89
292	3.6	14.8	85.38	1008.57	9.76
293	3.7	17.0	75.17	1007.46	8.34
294	2.1	15.0	80.00	1018.41	6.32
295	1.3	14.8	89.38	1022.30	3.92
296	2.9	15.6	79.42	1013.62	8.73
297	2.8	15.9	71.00	1010.96	9.59
298	1.7	14.7	69.88	1021.35	5.83
299	1.8	15.2	69.67	1020.45	4.89
300	2.7	15.9	68.38	1019.79	6.10
301	2.4	9.2	91.00	1019.86	4.70
302	1.2	9.6	87.75	1019.51	4.95
303	2.5	9.8	83.25	1021.77	6.68
304	3.1	10.6	78.88	1019.18	6.07
305	2.6	12.2	77.62	1011.49	7.06
306	5.2	15.0	71.54	998.27	10.26
307	4.7	12.0	77.46	988.33	12.64
308	6.3	11.3	69.88	993.52	12.15
309	2.2	9.7	72.83	998.23	8.00
310	2.8	9.0	76.50	1004.69	5.80

311	3.3	7.3	73.12	1004.48	9.04
312	2.3	6.0	82.83	1005.05	6.50
313	2.0	6.2	75.17	1010.43	5.41
314	2.0	5.0	74.83	1011.14	6.73
315	1.5	5.7	75.50	1012.13	6.09
316	4.3	5.8	71.79	1009.33	9.37
317	2.5	4.9	77.50	1006.62	5.42
318	3.1	5.5	61.62	1000.84	7.29
319	1.8	6.4	69.58	999.67	5.00
320	1.4	5.4	73.58	1008.48	5.66
321	2.9	2.8	84.92	1007.12	8.23
322	5.6	4.2	77.71	1011.19	11.54
323	1.9	4.3	81.04	1016.71	6.42
324	2.0	5.1	80.75	1014.65	5.82
325	2.0	5.7	80.00	1009.54	6.71
326	3.7	6.8	74.50	1006.49	7.63
327	2.2	8.0	73.33	996.69	8.65
328	1.6	8.5	75.38	1004.86	5.06
329	1.0	9.2	82.08	1010.37	4.20
330	1.8	10.5	76.46	1007.10	5.36
331	5.9	10.3	76.04	998.61	10.94
332	7.0	10.0	73.33	1001.17	10.85
333	6.2	8.7	82.04	1010.20	10.70
334	3.0	4.9	78.33	1020.58	6.91
335	2.6	3.7	77.17	1016.74	9.53
336	2.9	2.9	80.96	1024.66	5.08
337	1.2	1.2	77.12	1028.07	2.66
338	1.6	1.1	76.88	1022.46	5.09
339	1.3	3.5	66.88	1022.33	3.58
340	2.2	5.2	64.33	1019.83	8.44
341	4.9	8.6	75.17	1019.08	11.67
342	4.5	9.1	70.62	1014.31	13.72
343	9.7	7.1	73.54	1008.85	15.17
344	3.2	3.2	74.83	1025.44	9.39
345	3.1	3.5	74.54	1013.85	9.95
346	4.7	3.8	70.21	1004.74	8.70
347	9.8	5.3	76.08	986.65	16.16
348	7.2	7.4	74.42	1000.53	13.38
349	6.2	11.8	67.46	1006.19	13.66
350	4.1	8.8	74.54	1007.74	8.68
351	4.0	8.6	78.88	1006.80	9.46
352	3.4	10.6	72.88	1016.00	7.82
353	3.5	7.4	78.33	1013.73	9.05
354	4.1	7.6	78.71	997.57	9.90
355	3.2	6.5	75.50	994.63	8.72
356	7.4	7.8	75.75	990.67	14.12

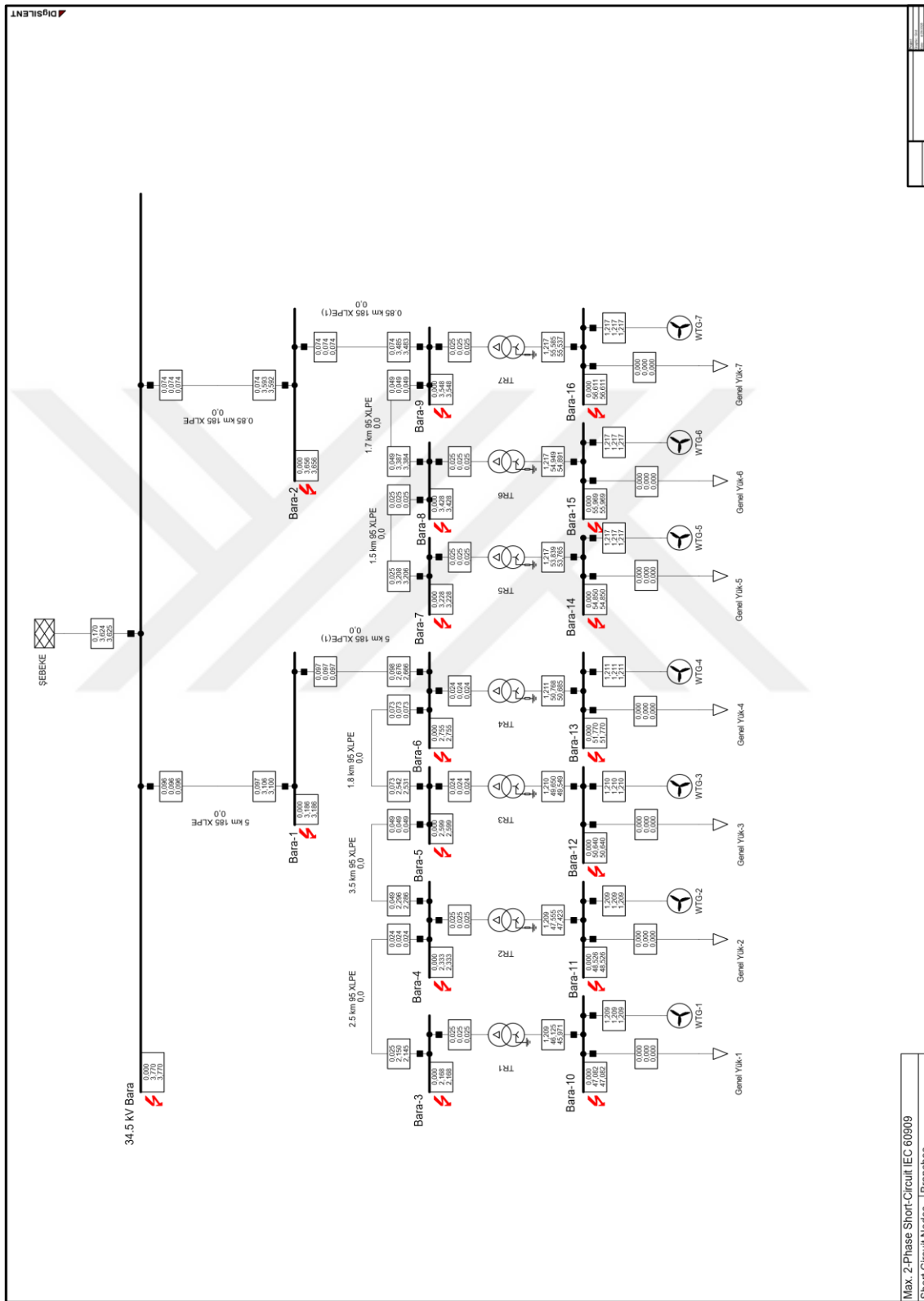
357	8.0	6.4	81.46	1011.43	11.94
358	5.5	7.8	77.00	1017.99	12.12
359	6.7	6.8	81.12	1023.14	11.75
360	3.2	5.4	80.29	1026.46	7.56
361	3.4	7.7	87.83	1028.40	8.73
362	3.3	4.4	74.33	1038.30	7.63
363	2.1	1.3	62.96	1038.04	6.24
364	1.4	3.5	53.79	1034.50	5.08
365	1.5	5.2	69.50	1032.70	4.31



EK-2C: Hem rüzgâr türbinleri hem de yükler iken yük akış analizi.

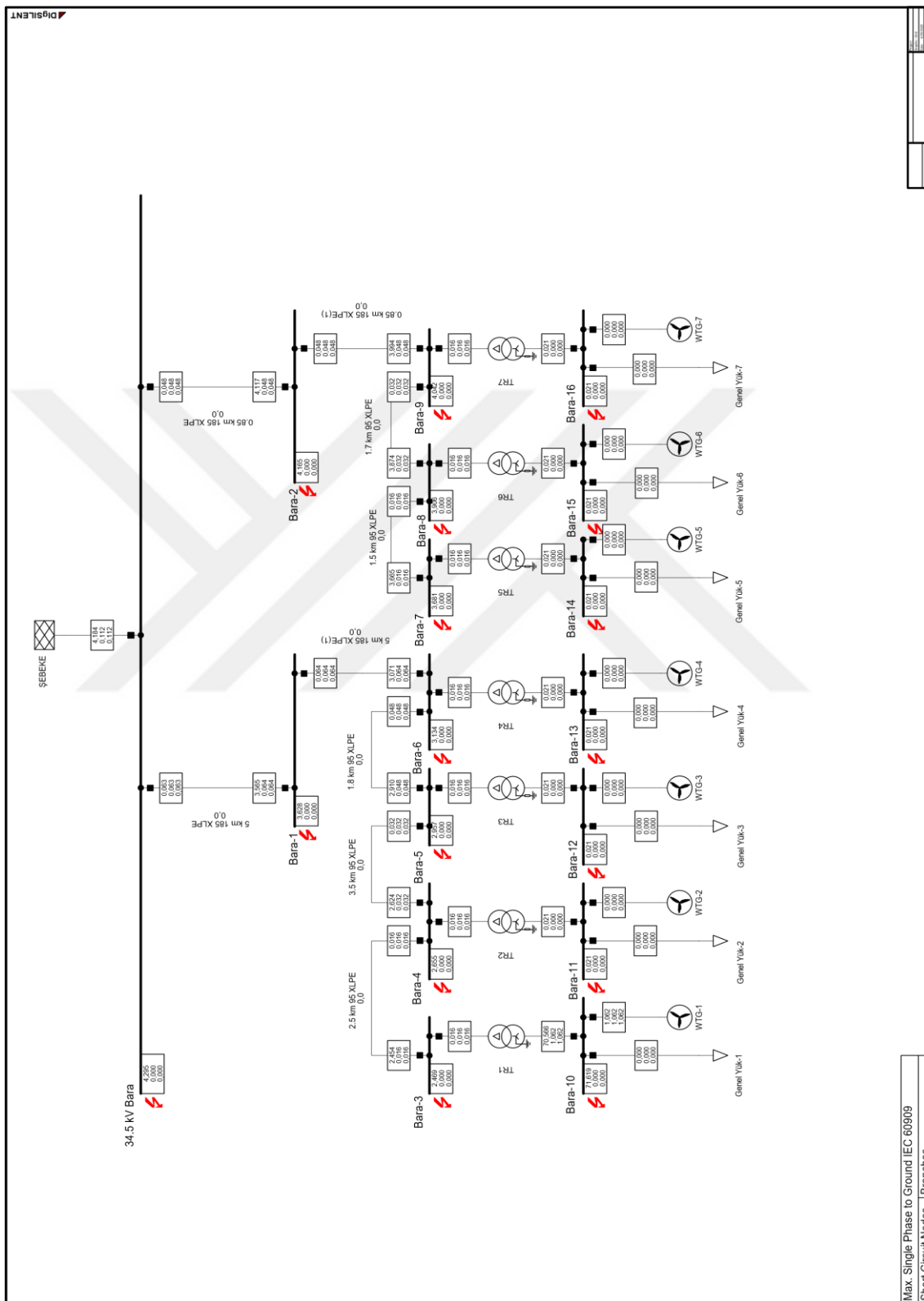


EK-3A: Faz-faz kısa devre analizi.

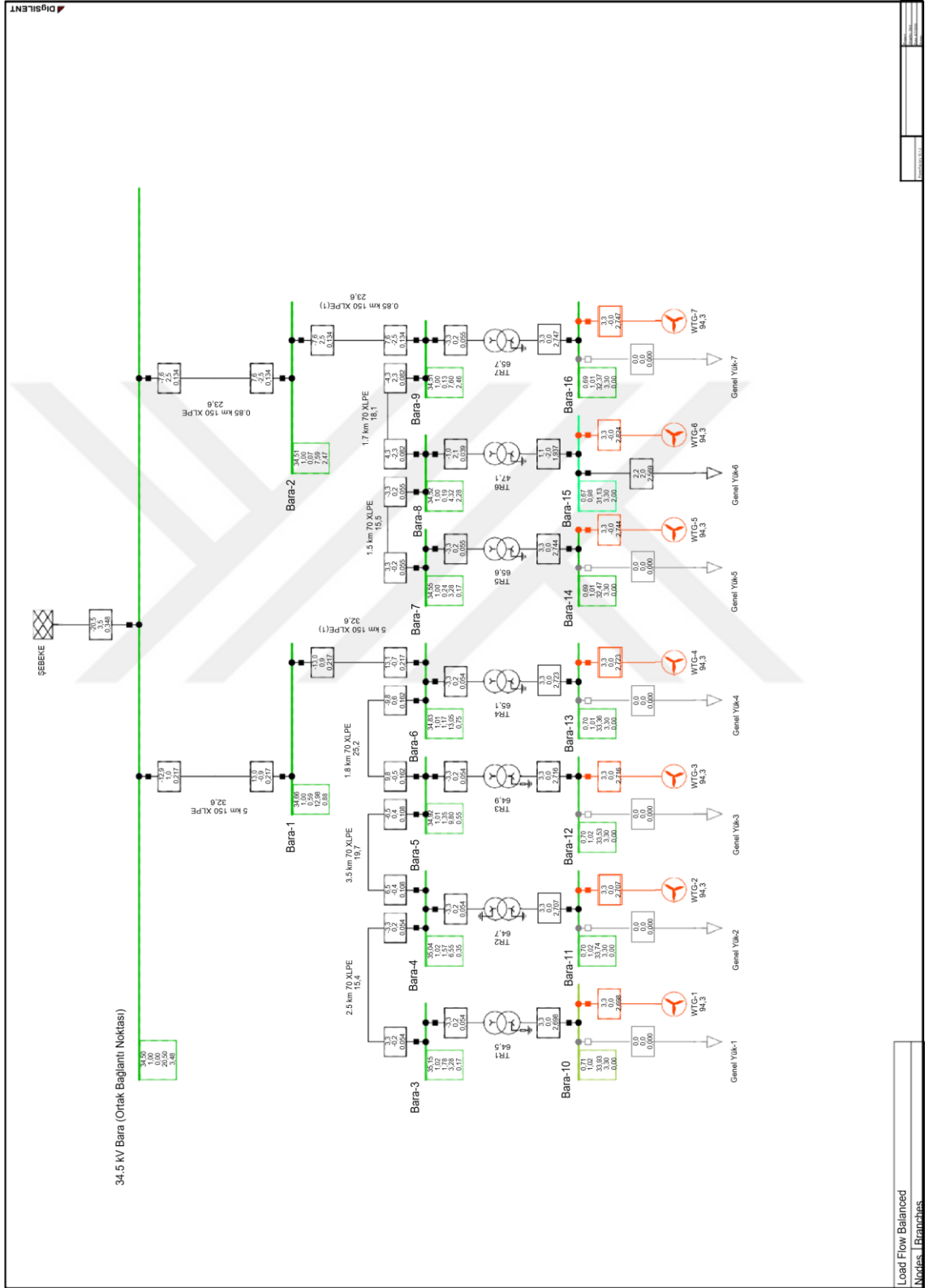


Max. 2-Phase Short-Circuit IEC 60909
Short Circuit Nodes Branches

EK-3B: Faz-toprak kısa devre analizi.



EK-4A: Hem rüzgâr türbinleri hem de yükler iken yük akış analizi.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet ŞEN
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya / 1995
Telefon : 0534 501 32 58
Faks :
e-mail : muh.senmehmet@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Sarayönü Anadolu Lisesi	2013
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	2018
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi	2020
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2019	Rönesans Holding	Ar-Ge Mühendisi

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Şen M., Özcan M., 2020, Using Artificial Neural Network Approach For Valuation Of The Wind Speed, *9th International Conference on Advanced Technologies (ICAT'20)*, Turkey, İstanbul.

Şen M., Özcan M., 2020, Implementaion Of Simulation Of Possible Short Circuit Fault Situations In Wind Energy Plants By Power Analysis Program, *1st International Conference on Computer, Electrical and Electronic Sciences (ICCEES'20)*, Turkey, Konya. (İnceleniyor)