

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ULUSAL ŞEBEKEDE DARBOĞAZ YAŞANAN İLETİM
KORİDORLARINDA HVDC-HVAC YAPILARININ BİRLİKTE KULLANIMI
VE ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Eda KARACA

EKİM 2024
TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ULUSAL ŞEBEKEDİ DARBOĞAZ YAŞANAN İLETİM KORİDORLARINDA
HVDC-HVAC YAPILARININ BİRLİKTE KULLANIMI VE ANALİZİ**

Eda KARACA

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ)
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 09 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 24 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Fatih Mehmet NUROĞLU

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Ulusal Şebekede Darboğaz Yaşanan İletim Koridorlarında HVDC-HVAC Yapılarının Birlikte Kullanımı ve Analizi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih Mehmet NUROĞLU’na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmasında modelleme için gerekli desteği veren TEİAŞ’a, modellemeleri yaptığım Digsilent Power Factory yazılımının ücretsiz lisansını sağlayan Digsilent ile EPRA firmalarına ve Erkut CEBECİ’ye teşekkür ederim. Bu tez çalışmasında sırasında sundukları PSCAD/FACE ücretsiz lisans desteğiyle araştırmamın ilerlemesine katkı sağlayan Lean Power Solutions firmasına özellikle de Gökhan ÖNAL’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam boyunca beni her an destekleyen, bu zorlu süreçte sevgisiyle bana güç veren değerli eşim Bilal KARACA’ya, gülüşüyle yorgunluğumu unutturan ve bana mutluluğu her an yeniden hatırlatan canım oğlum KEREM TUĞRUL KARACA’ya tüm kalbimle teşekkür ederim. Hayatımın her anında bana destek olan, sevgileri ve fedakarlıklarıyla beni bugünlere taşıyan sevgili annem Buket AKBULUT’a, babam Nihat AKBULUT’a ve abim Kağan AKBULUT’a yürekten teşekkür ederim.

Bu çalışmayı, hayatımın en zorlu dönemlerinden birinde yanımda olan, dostluğu ve desteğiyle bana güç veren değerli arkadaşım Yeşim ER’in değerli hatırasına ithaf ediyorum.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Eda KARACA

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora tezi olarak sunduğum “Ulusal Şebekede Darboğaz Yaşanan İletim Koridorlarında HVDC-HVAC Yapılarının Birlikte Kullanımı ve Analizi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Fatih Mehmet NUROĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 24/10/2024

Eda KARACA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Hibrit HVDC-HVAC.....	2
1.3. Tezin Amacı	5
2. LİTERATÜR TARAMASI VE TEORİK ALTYAPI	6
2.1. İletken Yüzey Gradyanı.....	9
2.2. Elektromanyetik Alan.....	12
2.3. Korona	18
2.3.1. İşitilebilir Gürültü.....	22
2.3.2. Radyo Gürültüsü	24
2.4. Güç Aktarım Kapasitesi.....	26
2.5. Yüksek Gerilim İletim Sistemlerinin Yapısal Bileşenleri	28
2.5.1. Yüksek Gerilim Direkleri.....	29
2.5.2. Yüksek Gerilim İletkenleri.....	31
2.5.3. Yüksek Gerilim İzolatörleri	32
2.6. Statik Termal Derecelendirme.....	33
3. VAKA İNCELEMESİ	39
3.1. Hibrit Yapının Elektromanyetik Alan Değerleri	40
3.2. Hibrit Yapının Korona Etkileri.....	54
3.2.1. İletken Yüzey Gradyanları	54
3.2.2. Korona Kayıpları.....	56
3.2.3. İşitilebilir Gürültü.....	57

3.2.4. Radyo Gürültüsü	66
3.3. İyonize Alanlar	73
4. OPTİMUM HİBRİT DİREK YAPISI	77
4.1. Denizanası Arama Algoritması	78
4.2. Problemin Matematiksel Modeli	81
4.2.1. Amaç Fonksiyonu	81
4.2.2. Kısıtlamalar	83
4.3. Optimizasyon Sonuçları	85
4.3.1. Tek amaçlı optimizasyon	87
4.3.2. Çok amaçlı optimizasyon	92
5. İLETİM SİSTEMİ MODELLENMESİ	106
5.1. 31 Mart 2015 Elektrik Kesintisi	107
5.2. Türkiye Elektrik İletim Sistemi Modeli.....	109
6. SONUÇLAR	116
7. ÖNERİLER	118
8. KAYNAKLAR	119
9. EKLER.....	131
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

ULUSAL ŞEBEKEDİ DARBOĞAZ YAŞANAN İLETİM KORİDORLARINDA HVDC-HVAC YAPILARININ BİRLİKTE KULLANIMI VE ANALİZİ

Eda KARACA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet NUROĞLU
2024, 130 Sayfa, 26 Ek Sayfa

Türkiye'nin mevcut elektrik iletim sisteminde, bahar aylarında karların erimesine bağlı olarak artan elektrik üretimi doğu-batı aksında iletilirken iletim hatları üretim fazlalığına bağlı olarak zorlanmaktadır. Kamulaştırmanın her geçen gün zorlaşması ile yeni bir iletim hattı kurmak yerine mevcut direklere hibrit HVDC iletim hattı eklemek daha avantajlı hale gelebilir. Bu çalışma hibrit HVDC-HVAC iletim sistemlerinin ulusal şebekeye entegre edilmesinin uygulanabilirliğini araştırmaktadır. Böyle bir hibrit yapının çevresel etkileri FEMM 4.2 ve PSCAD/FACE yazılımları ile kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. İletkenlerin direk üzerinde yerleşimi çevresel etkileri azaltmada önemli bir parametredir. Bu yüzden optimum hibrit direk konfigürasyonunun elde edilmesi için iletkenlerin konumlarına ve iletkenlerin aralarındaki açıklığa bağlı olarak Denizanası Arama metasezgisel yaklaşımı ile elektrik alan, manyetik alan, ışıtilebilir gürültü ve radyo gürültüsü tek amaçlı ve çok amaçlı olmak üzere optimize edilmiştir. Son olarak hibrit sistemin mevcut Türkiye elektrik iletim altyapısında darboğaz yaşanan farklı koridorlardaki etkinliği Digsilent Power Factory yazılımında modellenerek incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit HVDC-HVAC, Elektrik alan, Manyetik alan, ışıtilebilir gürültü, Radyo gürültüsü, Optimizasyon

PhD. Thesis

SUMMARY

THE USE AND ANALYSIS OF HVDC-HVAC STRUCTURE IN TRANSMISSION CORRIDORS WHERE BOTTLENECK OCCURS WITHIN THE NATIONAL GRIDS

Eda KARACA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Fatih Mehmet NUROĞLU
2024, 130 Pages, 26 Appendix Pages

In Turkey's existing electricity transmission system, the increased electricity due to snowmelt in the spring months is transmitted along the east-west axis, leading to strain on the transmission lines. Given the escalating difficulties associated with expropriation, it may become more advantageous to add a hybrid HVDC transmission line to existing towers instead of constructing a new transmission line. This study investigates the feasibility of integrating hybrid HVDC-HVAC transmission systems into the national grid. The environmental impacts of such a hybrid structure have been thoroughly analyzed using FEMM 4.2 and PSCAD/FACE software. The placement of the conductors on the towers is an important parameter in reducing environmental impacts. Therefore, to achieve the optimum hybrid tower configuration, the electric field, magnetic field, audible noise, and radio noise have been optimized using the Jellyfish Search metaheuristic approach based on the positions of the conductors and the spacing between them, both for single objective and multi objective purposes. Finally, the effectiveness of the hybrid system in different corridors where bottlenecks occur in the existing Turkish electricity transmission infrastructure has been examined by modeling in the Digsilent Power Factory software.

Key Words: Hybrid HVDC-HVAC, Electric field, Magnetic field, Audible noise, Radio interference, Optimization

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Çeşitli HVDC konfigürasyonları	3
Şekil 2. Hibrit koridorda AC iletkenin yüzey gradyanına DC ön geriliminin etkisi.....	11
Şekil 3. Hibrit koridorda DC iletkenin yüzey gradyanına AC dalgalanmanın etkisi.....	11
Şekil 4. İletkenin eşdeğer yarıçapının gösterimi.....	15
Şekil 5. N adet iletkenli devrelerin görüntü metoduna göre A noktasındaki elektrik alanının hesaplanması şeması a) Tek devre düzlemi şematik gösterimi, b) Çift devre düzlemi şematik gösterimi	16
Şekil 6. Temsili bir AC iletim hattı.....	26
Şekil 7. 400 kV 1272 MCM çift devre 2PA direğinin ana hat ölçülerinin gösterimi	30
Şekil 8. Sırasıyla 2B, 3B ve 4B demet iletkenlerin gösterimi	31
Şekil 9. Mevcut direk yapısı (a) ve hibrit direk yapısı (b)	39
Şekil 10. Elektrik alan hesaplamak için açık sınır modeli	41
Şekil 11. Manyetik alan hesaplamak için açık sınır modeli.....	42
Şekil 12. FEMM’de oluşturulan, (a) bir adet çelik özlü alüminyum iletken modeli, (b) bir adet demet iletken modeli gösterimi	42
Şekil 13. ABC-ABC faz yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı	43
Şekil 14. ABC-ABC faz yerleşimli mevcut direğin 1 m yükseklikte oluşturduğu elektrik alanın karşılaştırılması.....	44
Şekil 15. Hibrit 1 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı	45
Şekil 16. Hibrit 2 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı	46
Şekil 17. Hibrit 3 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı	47
Şekil 18. Hibrit 4 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı	48
Şekil 19. Tüm konfigürasyonların yerden 1 m yüksekte oluşturduğu elektrik alan dağılımı.....	49

Şekil 20.	Hibrit 1, hibrit 2, hibrit 3 ve hibrit 4 konfigürasyonlarının elektrik alan dağılımının MATLAB ve FEMM’de karşılaştırılması.....	50
Şekil 21.	Hibrit 1 konfigürasyonunun yerden 1 m yüksekte oluşturduğu elektrik alan dağılımının MATLAB, FACE ve FEMM’de karşılaştırılması.....	51
Şekil 22.	Mevcut AC konfigürasyonun ve farklı akım değerleri için hibrit 1 konfigürasyonunun yerden 1 m yüksekte oluşturduğu manyetik alan dağılımı.....	51
Şekil 23.	Hibrit 1, hibrit 2, hibrit 3 ve hibrit 4 konfigürasyonlarının manyetik alan dağılımının MATLAB ve FEMM’de karşılaştırılması.....	52
Şekil 24.	Akım yoğunluğunun gerçek ve sanal kısımlarının dağılımı a) Hibrit 1 konfigürasyonu için, (b) Hibrit 2 konfigürasyonu için, (c) Hibrit 3 konfigürasyonu için, (d) Hibrit 4 konfigürasyonu için karşılaştırılması	53
Şekil 25.	İletken yüzey gradyanının değişimi.....	56
Şekil 26.	Mevcut direk ve hibrit direk için oluşacak korona kayıpları.....	57
Şekil 27.	AC-AC yerleşimde oluşacak işitilebilir gürültü	60
Şekil 28.	AC-DC yerleşimde oluşacak işitilebilir gürültü	63
Şekil 29.	HVDC sistemde demetlerde 2,3,4 ve 6 alt iletken kullanılması durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları.....	64
Şekil 30.	HVDC sistemlerin farklı gerilim seviyelerinde işletilmesi durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları	65
Şekil 31.	AC-AC yerleşimde oluşacak radyo gürültüsü	67
Şekil 32.	AC-DC yerleşimde oluşacak radyo gürültüsü	70
Şekil 33.	HVDC sistemde demetlerde 2,3,4 ve 6 alt iletken kullanılması durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları.....	71
Şekil 34.	HVDC sistemlerin farklı gerilim seviyelerinde işletilmesi durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları	72
Şekil 35.	Hibrit yerleşimde oluşacak iyonize alanların mesafeye bağlı değişimi.....	75
Şekil 36.	Hibrit yerleşimde oluşacak iyonize alanların farklı parametreler bağlı değişimi.....	76
Şekil 37.	Denizanası Arama Algoritması akış şeması	80
Şekil 38.	Direkteki açıklıkların şematik gösterimi	83
Şekil 39.	F ₁ amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen elektrik alan değerleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları	87
Şekil 40.	F ₂ amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen manyetik alan değerleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları	88
Şekil 41.	F ₃ amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen işitilebilir gürültü seviyeleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları	89

Şekil 42.	F ₄ amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen radyo gürültü seviyeleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları.....	90
Şekil 43.	a) Elektrik alan için b) Manyetik alan için c) İşitilebilir gürültü için d) Radyo gürültüsü için iterasyon sayısı ile uygunluk derecesi değişimi gösterimi	92
Şekil 44.	Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen karşılaştırmalı elektrik alan ve manyetik alan ile iletkenlerin asimetrik konumları	95
Şekil 45.	Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen karşılaştırmalı elektrik alan ve manyetik alan ile iletkenlerin simetrik konumları	96
Şekil 46.	İki amacı optimize eden hibrit hattın Pareto cephesi görünümü	97
Şekil 47.	Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen elektrik alan ile iletkenlerin konumları.....	98
Şekil 48.	Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen işitilebilir gürültü ve radyo gürültüsü ile iletkenlerin konumları.....	99
Şekil 49.	Üç amacı optimize eden hibrit hattın Pareto cephesi görünümü	99
Şekil 50.	Üç amacı optimize eden hibrit hattın değer yolu grafiği	100
Şekil 51.	Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen elektrik alan ve manyetik alan ile iletkenlerin konumları	101
Şekil 52.	Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen işitilebilir gürültü ve radyo gürültüsü ile iletkenlerin konumları.....	102
Şekil 53.	Dört amacı optimize eden hibrit hattın değer yolu grafiği	105
Şekil 54.	Açma öncesi hatların güç değerleri ile hatların kopma sırası.....	108
Şekil 55.	Santrallerin şebekeden kopma saatleri ve sebepleri	108
Şekil 56.	Hibrit HVAC-bipolar HVDC şematik gösterimi.....	110
Şekil 57.	Elektrik kesintisi öncesi bazı iletim hatlarının yüklenme seviyesi.....	111
Şekil 58.	Kurşunlu-Osmanca hibrit sistemin hat yüklenmelerine etkisi.....	113
Şekil 59.	Temelli-Yeşilhisar hibrit sistemin hat yüklenmelerine etkisi.....	113
Şekil 60.	Sincan-Elbistan B hibrit sistemin hat yüklenmelerine etkisi.....	114
Şekil 61.	Doğu-batı aksında iletim hatlarının taşıdığı güç miktarları.....	115

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. ICNIRP tarafından belirlenen referans seviyeleri.....	13
Tablo 2. Elektromanyetik alanlarla ilgili farklı sınır değerleri	13
Tablo 3. Çelik özlü alüminyum iletkenlerin karakteristikleri	32
Tablo 4. ACSR iletkenlerin çalışma koşulları	36
Tablo 5. TEİAŞ'ın çevre şartları ve iletkenlerin kapasiteleri	37
Tablo 6. Farklı hibrit yapı konfigürasyon tipleri.....	44
Tablo 7. AC-AC işletimde oluşan yüzey gradyan değerleri	55
Tablo 8. AC-DC işletimde oluşan yüzey gradyan değerleri	55
Tablo 9. 400 kV havai hatlar için aşırı gerilim türlerine göre gerekli açıklıklar	85
Tablo 10. Optimizasyon senaryoları	86
Tablo 11. Faz ve kutup iletkenlerinin direk üzerinde yerleşimi	91
Tablo 12. İşitilebilir gürültü için iletken konumlarının karşılaştırılması	102
Tablo 13. Radyo gürültüsü için iletken konumlarının karşılaştırılması.....	103
Tablo 14. Elektrik alan için iletken konumlarının karşılaştırılması.....	104
Tablo 15. Manyetik alan için iletken konumlarının karşılaştırılması	104
Tablo 16. Hat uzunlukları ve kesitleri.....	112
Tablo 17. Karşılaştırmalı iletim hatlarının yüklenme yüzdeleri	114

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ρ	: Yük yoğunluğu
r	: Demetteki alt iletkenlerin yarıçapı
R	: Demet yarıçapı
m	: Yüzey pürüzlülük faktörü
δ	: Bağlı hava yoğunluğu
R_r	: Yağış oranı
n	: Demetteki iletken sayısı
T	: Ortam hava sıcaklığı
P	: Ortam hava basıncı
E_0	: Korona başlangıç alan şiddeti
E_k	: Kritik korona alan şiddeti
ε	: Serbest uzayın geçirgenliği
J	: Akım yoğunluğu
w	: Rüzgâr hızı
R_{iyon}	: İyonların rekombinasyon oranı
k	: İyon hareketliliği
P_j	: Joule ısınma şiddeti
P_s	: Solar ısınma şiddeti
P_c	: Konvektif soğuma şiddeti
P_r	: Radyatif soğuma şiddeti
R_{dc}	: 20°C’de DC direnci
α_k	: Kelvin başına direnç sıcaklık katsayısı
T_{av}	: Ortalama sıcaklık
α_s	: İletken yüzey soğurma katsayısı
S	: Küresel güneş radyasyonu
T_a	: Ortam sıcaklığı
N_U	: Rüzgâr hızına bağlı değişen Nusselt katsayısı
K_f	: Havanın termal iletkenliği
T_c	: İletken sıcaklığı
σ_B	: Stefan-Boltzmann sabit

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Sanayileşme, nüfus ve kentleşmedeki artışlar dünya genelinde enerji talebinin de sürekli artmasına neden olmaktadır. Sanayi devrimi ile başlayan ve günümüzde hızlanan bu trend, enerji kaynaklarının verimli bir şekilde yönetilmesini zorunlu kılmaktadır. Türkiye'nin elektrik profili incelendiğinde üretimin kaynakların bol olduğu doğu bölgesinde yoğunlaştığı, tüketimin ise sanayileşmiş ve yoğun nüfuslu batı bölgesinde yüksek olduğu görülmektedir. Hidrolik kaynakların doğuda yoğunlaşması nedeniyle elektrik üretimi ağırlıklı olarak bu bölgede gerçekleştirilmekte ve tüketimin yoğun olduğu batı bölgesine yüksek gerilimli alternatif akım (HVAC) havai hatlar ile iletilmektedir.

Türkiye'nin mevcut elektrik iletim sisteminde, özellikle bahar aylarında karların erimesi ile artan elektrik üretiminin doğu-batı ekseninde iletilmesi sırasında iletim hatlarında zorlanmalar yaşanmaktadır. Bu durum ise güç kesintilerine ve kararlılık sorunlarına yol açabilmektedir (Haes Alhelou, 2019). Bu nedenle, sürekli artan enerji talebini karşılamak ve iletim kapasitesini artırmak için ulusal düzeyde geleceğe yönelik alternatif çözüm planları geliştirmek kaçınılmaz bir ihtiyaç haline gelmiştir. Güç ihtiyacını karşılamak için faz başına düşen iletken sayısını artırmak veya gerilim seviyesi yükseltmek gibi farklı önlemler yetersiz kalabilmektedir (Kishore & Singal, 2014).

Literatürde güç iletim kapasitesini artırmak için farklı yöntemler kullanan çalışmalar bulunmaktadır. Bu bağlamda araştırma alanları arasında Dinamik Termal Derecelendirme (DTR) sistemleri, Yüksek Sıcaklıkta Düşük Sarkma (HTLS) iletkenleri ve HVAC iletim hatlarının yüksek gerilimli doğru akımlı (HVDC) iletim hatlarına dönüştürülmesi ön plana çıkmaktadır (Kalair vd., 2016; Riva vd., 2020; Lai & Teh, 2022). Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) de mevcut iletim hatlarına tesis edilerek iletim kapasitesini ve performansını arttırmada kullanılan yöntemlerdendir (Sidhu vd., 2005). Mevcut literatürde, güç iletim kapasitesini artırmak amacıyla DTR, HTLS, FACTS gibi çeşitli yöntemler incelenmiş olmasına rağmen, hibrit HVDC-HVAC sistemlerin uygulanması noktasında sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır.

Kamulaştırmanın her geçen gün zorlaşmasıyla mevcut HVAC direkleri, hibrit HVAC-HVDC iletim hatlarına dönüştürmek, yeni iletim hatları inşa etmek yerine daha avantajlı hale gelmektedir (Karaca & Nuroğlu, 2024). Ayrıca HVDC iletimi, enerjinin uzun

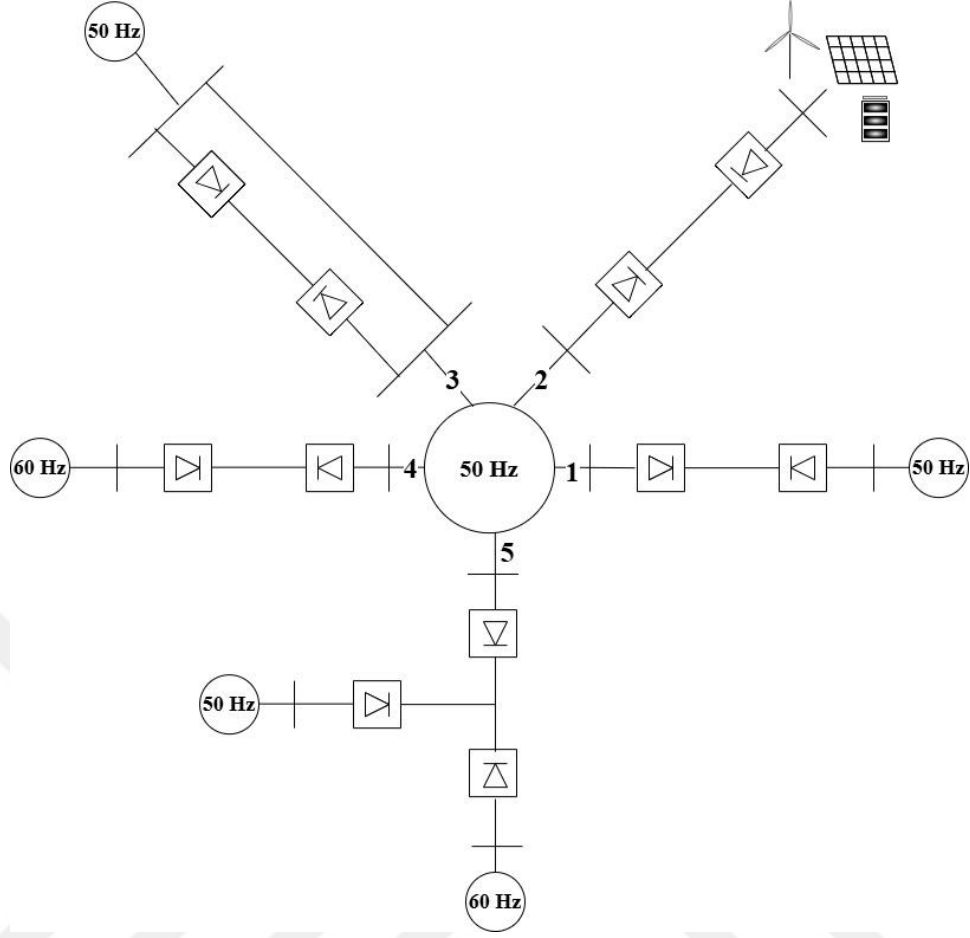
mesafelerde daha az kayıpla ve daha yüksek kalitede iletilmesine de çözüm sunma potansiyeline sahiptir.

Bu çalışma Türkiye'nin ulusal şebekesinde doğu-batı ekseninde yaşanan darboğazları gidermek amacıyla, mevcut elektrik iletim kapasitesini artırmaya yönelik hibrit HVDC-HVAC iletim hattı tasarlamayı ve bu yapının uygulanabilirliğini ve etkilerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Hibrit sistem ile iletim kapasitesi artırılarak kararlılık problemlerine de olumlu katkı yapılması hedeflenmektedir. Ayrıca, hibrit sistem sayesinde doğalgaz arzının yetersiz kaldığı zamanlarda hidrolik kaynakların daha etkin kullanılması amaçlanmaktadır. Bununla birlikte, bu çalışma ile enerji iletimi konusundaki akademik tartışmalara katkıda bulunmanın yanı sıra, ulusal şebekenin kapasitesini ve güvenilirliğini artırmaya yönelik pratik çözümler sunmak hedeflenmektedir.

1.2. Hibrit HVDC-HVAC

Elektrik enerjisinin uzun mesafelere iletiminde geleneksel bir yöntem olarak kullanılmakta olan HVAC sistemlerinde, transformatörler yardımıyla gerilim seviyeleri kolayca ayarlanarak düşük kayıplı iletim sağlanmaktadır. Türkiye'de kaynaklara yakın bölgelerde üretilmekte olan elektrik tüketimin yüksek olduğu bölgelere 154 kV ve 400 kV gerilim seviyelerinde uzun HVAC havai hatlarıyla iletilmektedir (Bayrak vd., 2007).

Modern elektrik şebeke altyapıları, ülkelerin artan verimlilik, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik taleplerini karşılamak için sürekli olarak gelişmektedir (Shahidehpour vd., 2016). Bu bağlamda HVDC sistemleri, elektrik iletiminde doğru akımı kullanarak geleneksel HVAC sistemlerine göre daha uzun mesafelerde verimli bir çözüm sunmaktadır. Güç elektroniğindeki teknolojik gelişmeler, HVDC sistemlerinin bel kemiğini oluşturan dönüştürücü teknolojisinde önemli ilerlemelere yol açmıştır. Bu sistemler, teknik ve ekonomik avantajları sayesinde, özellikle uzak mesafelere elektrik iletiminde HVAC sistemlerine güçlü bir alternatif haline gelmiştir (Alassi vd., 2019). Şekil 1'de gösterildiği gibi, HVDC sistemleri farklı uygulama konfigürasyonlarında yapılandırılabilir.



Şekil 1. Çeşitli HVDC konfigürasyonları

Şekil 1’deki 1 numaralı bağlantıda gösterildiği gibi, aynı frekanstaki iki güç sistemi arasında kurulan bir HVDC sistemi ile güç aktarımı uzun mesafelerde ekonomik olarak yapılabilir. HVDC iletim, özellikle 300-800 km’yi aşan havai hatlar ve 50-100 km’yi aşan kablo bağlantıları için tercih edilir (Alassi vd., 2019). Sistem gereksinimlerine bağlı olarak, HVDC yapıları monopolar, bipolar veya homopolar olarak tasarlanabilir.

Teknolojik gelişmelerle birlikte, yenilenebilir enerji kaynakları ve bataryalar küresel çapta giderek daha fazla yaygınlaşmakta, sınırlı kaynakların verimli kullanımı, sürdürülebilirlik ve iklim değişikliği ile mücadelede etkin olma gibi avantajlar sunmaktadır. Diğer taraftan kaynakların şebekeye entegrasyonu şebekede kararlılık problemlerine neden olmaktadır (Shah vd., 2015). Şekil 1’de 2 numaralı bağlantıda görüldüğü gibi HVDC bağlantıları yenilenebilir kaynaklardan üretilen enerjinin de uzun mesafede taşınmasında efektif kullanılan yöntemlerdendir. HVDC iletim hatları ile farklı dönüştürücü teknolojileri kullanılarak kararlılık problemlerinin de önüne geçilebilir (Sun vd., 2017; Wang vd., 2022).

HVDC sistemler asenkron bağlantılar için uygundur. Bu nedenle farklı frekanslardaki asenkron şebekeler birbirine kolayca bağlanabilir (Wen vd., 2018). Şekil 1'deki 4 numaralı bağlantıda, sırt-sırt asenkron bağlantı şeması temsili olarak gösterilmiştir. Türkiye'nin Gürcistan ve İran ile sırt-sırt asenkron HVDC bağlantısı bulunmakta olup, ülkeler arasında belirlenen protokoller doğrultusunda elektrik alışverişi yapılmaktadır (Acaroğlu vd., 2021). Ayrıca sırt-sırt bağlantı ile izole bölgelerin beslenmesi de sağlanabilir.

Çok terminalli HVDC sistemler (MTDC) ise büyük ve uzak yenilenebilir enerji kaynaklarından yük merkezlerine güç iletiminde kullanılan en yeni uygulamalardan biridir. MTDC sistemlerinin amacı, Şekil 1'deki 5 numaralı bağlantıda gösterildiği gibi, üç veya daha fazla dönüştürücü istasyonunu birbirine bağlayarak güç akışlarını dinamik ve güvenilir bir şekilde yönetmektir. Özellikle uzak mesafede yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip ülkelerde elektrik iletim altyapısına MTDC sistemlerin entegre edilmesi gittikçe yaygınlaşmaktadır (Arcia-Garibaldi vd., 2018). Son zamanlarda MTDC şebekeleri, gerilim kaynaklı dönüştürücülerdeki (VSC) gelişmeler nedeniyle teknik olarak daha uygulanabilir hale gelmiştir. Hatta yeni kesici teknolojileri ile tüm şebekeyi kaybetmeden yalnızca arızalı bir MTDC bölümünün enerjisini keserek güç sisteminin sürekliliği sağlanabilmektedir (Blond vd., 2016).

İlk MTDC sistemi, mevcut Sardinya-İtalya HVDC bağlantısına Corsica'da üçüncü bir dönüştürücü istasyonu eklenerek 1988 yılında kurulmuştur (Watson & Watson, 2020). 2013 yılında ise, Çin'in Nanao kentinde VSC HVDC teknolojisine dayalı bir MTDC sistemi geliştirilmiştir (Wu vd., 2024).

Şekil 1'deki 3 numaralı bağlantıda gösterildiği gibi, HVDC ve HVAC sistemlerinin birlikte kullanımı, hibrit sistem olarak bilinen ve en yeni araştırma alanlarından biri olan bir yaklaşımdır. Günümüzde birçok araştırmacı Hibrit HVDC-HVAC iletim hatlarının teknik ve ekonomik fizibilitelerini keşfetmek için çeşitli çalışmalar yapmaktadır (Karaca & Nuroğlu, 2024; Manickam vd., 2018; Kızılçay vd., 2009; Ismail, 2009; Halamay vd., 2005; Nakra vd., 1984) ancak henüz dünyada aktif iletim yapan hibrit hat bulunmamaktadır. Kuzey Ren-Vestfalya ve Baden-Württemberg arasında 2024 yılında açılması planlanan ilk hibrit hat olma özelliği taşıyan ULTRANET projesi ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators)'nin yayınladığı son 'On Yıllık Şebeke Gelişim Raporu'na göre 2026'ya ertelenmiştir (URL-1, 2024). Bu proje, Kuzey Almanya'daki yenilenebilir enerjiyi, 380 kV AC ve DC hatlarını aynı direkler üzerinde kullanarak güney Almanya'ya

iletmeyi ve iletim hattının her iki ucunda dönüştürücü istasyonları inşa etmeyi amaçlamaktadır (URL-2, 2024).

1.3. Tezin Amacı

Bu çalışma, Türkiye'nin ulusal elektrik şebekesindeki doğu-batı aksında yaşanan darboğazları gidermek ve iletim kapasitesini artırmak amacıyla mevcut HVAC iletim koridorlarının hibrit HVDC-HVAC iletim koridorlarına dönüştürülmesini hedeflemektedir. Araştırma kapsamında, Türkiye'nin iletim sisteminde yaygın olarak kullanılan 400 kV çift devre 2PA tipi direk belirlenmiş ve üzerinde vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca böyle bir dönüşümün çevresel etkileri de değerlendirilmiştir. Bunlara ek olarak araştırmada, belirlenen direk için, direk üzerindeki demet iletkenlerin yerleşim düzeni optimize edilerek çevresel etkilerin en aza indirilmesi ve hat verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, gelecekte Türkiye'de hibrit hatlara dönüştürülmesi planlanan yüksek gerilim direkleri için temel bir çerçeve oluşturulması ve bu dönüşüm sürecinde uygulanabilir yöntemlerin belirlenmesi hedeflenmektedir.

Bu doğrultuda araştırma, Türkiye'nin elektrik iletim altyapısının gelişimine ve sürdürülebilir kalkınmasına önemli katkılar sunma potansiyeline sahiptir. Hibrit HVDC-HVAC sistemlerine geçişin, ulusal şebekenin güç aktarım kapasitesini artırarak daha yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlayacağı öngörülmektedir. Bunun yanı sıra, çevresel sürdürülebilirlik açısından iletken yerleşimlerinin optimize edilmesi ile şebeke modernizasyonunun çevreye olan etkilerinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Bu araştırma, Türkiye'nin enerji sektöründe hibrit HVAC-HVDC gibi yenilikçi teknolojilerin benimsenmesine katkıda bulunarak, değişen enerji ihtiyaçlarına uyum sağlayabilecek teknolojilerin entegrasyonunu desteklemektedir.

Bu çalışmanın ilerleyen zamanlarda Türkiye'de hibrit hatta dönüştürülmesi planlanan yüksek gerilim direkleri için destekleyici bir zemin hazırlaması ve tasarım esnasında temel dinamikleri anlayarak uygulama boyutunda katkı sağlaması beklenmektedir. Hibrit iletim sistemleri üzerine yapılan diğer çalışmalara da katkı sağlaması beklenen bu araştırma aynı zamanda pratik uygulamalar için zemin hazırlayarak sürekli iyileştirme ve yenilik süreçlerine de katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI VE TEORİK ALTYAPI

Dünya genelinde elektrik iletim altyapısı AC olarak tesis edilmiştir. Fakat son yüzyılda DC iletimin de aktif olarak kullanılmaya başlamasıyla birlikte AC ve DC iletim hatlarının aynı koridorda paralel çalışması veya aynı direk üzerinde hibrit bulunmaları üzerine çalışmalar hız kazanmıştır. Ancak bu tezin yazıldığı tarih itibari ile şebekeye bağlı işletilen hibrit HVDC-HVAC iletim hattı bulunmamaktadır. Çalışmalar genellikle teorik ve uygulamalı analizler ile simülasyon çalışmaları üzerine yoğunlaşmıştır.

Nakra ve diğerleri (1984), çalışmalarında çift devreli bir AC hattının bir devresinin DC'ye dönüştürülmesinin teknik olarak uygulanabilirliğini tartışmıştır. Böyle bir tasarımda büyük mıknatıslanma akımlarının diferansiyel rölenin yanlış açmasına sebebiyet verebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca sistemin sürekliliğinin sekteye uğrayabileceğide belirtilmiştir.

Halamay ve diğerleri (2005), çalışmalarında yüksek gerilimli hibrit AC ve DC iletim hattına ilişkin bir fizibilite çalışması sunmuştur. AC hatlarındaki arızaların hem DC akımı hem de gerilim dalga formları üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu, ancak DC arızalarının AC akımı üzerinde ihmal edilemez bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. DC arızaların olumsuz etkilerini azaltmak için AC hatların koruma sistemlerinin özenle tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Kızılçay ve diğerleri (2009), çalışmalarında aynı direkte AC ve DC hatlarını kullanılmasının, mevcut bir iletim koridorunun güç iletim kapasitesini artırmada etkili olduğu sonucuna varmıştır. Fakat böyle bir dönüşümde AC ve DC sistemlerin karşılıklı etkileşiminin ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu ifade edilmiştir.

Ismail (2009), çalışmasında aynı geçiş hakkını kullanan yani hibrit koridordaki AC ve DC direklerle aynı direk üzerinde bulunan hibrit AC/DC devreleri modelleyerek manyetik alan değişimini incelemiştir. Bitişik direk konfigürasyonunda eklenen DC bipolar hattın altındaki manyetik alan değerlerinde önemli artış olurken aynı direk konfigürasyonunda manyetik alanda fark edilir değerlerde artma olmadığını ifade etmiştir.

Wei ve diğerleri (2013), çalışmalarında hibrit AC/DC iletim hattının yıldırım performansını araştırmıştır. Çalışmada AC/DC hibrit iletim hatlarının yıldırımdan korunma performansını iyileştirmek için direk yüksekliğini azaltmak, negatif koruma açısı kullanmak, ek topraklama telleri kurmak, her iki yana da paratonerler yerleştirmek gibi birkaç yöntem sunulmuştur. Ayrıca yıldırım koruma tasarımında AC hatlara daha fazla odaklanması

gerektiği belirtilmiştir. Kristensen ve diğerleri (2024), çalışmalarında hibrit direkte çok devreli hatlar kullanıldığı zaman DC devrede daha fazla geri atlama oluştuğunu belirterek izolator boyutunun bu duruma etkisini araştırmıştır.

Straumann ve diğerleri (2012), çalışmalarında hibrit direklerde iyon akış alanını belirlemek için Süreksiz Galerkin yöntemini kullanarak simülasyonlarını gerçekleştirmiştir. AC ve DC devrelerin arasındaki kuplaja rağmen zeminin iyon akımlarından hibrit hat konfigürasyonu ile korunabileceği ifade edilmiştir.

Guilod ve diğerleri (2014), çalışmalarında hibrit AC/DC hatlarda iyon akış alanını hesaplamak için karakteristikler metodunu temel alan yeni bir yöntem önererek, bu yöntemi süreksiz galerkin sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırmıştır. Ayrıca hibrit hatlarda kuplaj etkisinin rüzgâr hızı ile rüzgârın yönüne bağlı olduğu ve hesaplamalarda bu etkilerin ihmal edilmemesi gerektiği ifade edilmiştir.

Hedtke ve diğerleri (2015), çalışmalarında mevcut ampirik denklemlerle, çeşitli hibrit AC/DC direk geometrileri ve iletken düzenleme senaryoları için ışıtilebilir gürültüyü tahmin etmiştir. Bazı direk konfigürasyonlarında AC iletkenin yüzey gradyanının bitişik kutuptan gelen DC kuplajından önemli ölçüde etkilenecek ışıtilebilir gürültü seviyelerini arttırdığı belirtilmiştir. Hibrit olmayan sistemlerde DC ışıtilebilir gürültünün kötü hava koşullarında ihmal edilebilirliği olsa bile, hibrit iletken senaryolarında önemli bir etkiye sahip olabileceği belirtilmiştir. Bu yüzden tasarlanacak hibrit direk yapısında iletkenlerin yerleşiminin etkisinin önceden analiz edilmesinin önem arz ettiği belirtilmiştir.

Konotop ve diğerleri (2016), çalışmalarında hibrit AC/DC işletilen bir direkte bakım amaçlı DC devreleri kapatılan hibrit sistemin davranışlarını çalışmıştır. Hibrit hatta AC devrenin transpoze edilmesi ile enerjisiz DC iletkenlerde indüklenen akımların azaldığı belirlenmiştir. Ama bu hat transpozisyonu aynı zamanda DC iletkenlerde dokunma gerilimlerini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu yüzden bakım çalışmalarında ek güvenlik şartlarının gerekebileceği ifade edilmiştir.

Malicki ve diğerleri (2018), çalışmalarında hibrit direk yapısında oluşacak maksimum ekranlama akımının direğin geometrisine bağlı değiştiğini belirtmiştir. En dışta HVDC iletkenin kaldığı bazı konfigürasyonlarda HVDC iletkene yıldırım düşmesi durumunda oluşabilecek atlama ihtimalini azalttığı ifade edilmiştir.

Stanojev ve diğerleri (2019), çalışmalarında İsviçre iletim şebekesinde gelecekteki bir hibrit AC/DC hattının operasyonel faydalarını araştırmıştır. Mevcut AC iletim şebekesine gerilim kaynaklı dönüştürücü tabanlı HVDC sistem entegre edilmiş ve hibrit hattın tüm

durumlarda İsviçre ithalat/ihracat kapasitesini arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca böyle bir tasarımıyla Orta Avrupa genelinde mevcut üretim kapasitelerinin daha optimum kullanımının ve daha tekdüze fiyatların beklenebileceği gösterilmiştir. İletim kayıplarının dönüştürücü kayıpları nedeniyle arttığı ifade edilerek VSC-HVDC sisteminin tam tekno-ekonomik analizinin yatırım maliyetleri ile yapılması önerilmiştir.

El-Deen ve diğerleri (2023), çalışmalarında hibrit hatlarda DC ve AC iletkenlerin korona deşarj özellikleri üzerindeki karşılıklı etkilerini incelemiştir. Şarj simülasyonu yöntemini, hibrit hattın iletkenleri etrafındaki herhangi bir yerdeki elektrik alanını değerlendirmek ve DC iletkeninden yayılan alan çizgilerini izlemek için uygulamışlardır. Ayrıca yine aynı çalışmada AC iletkeninin varlığının, DC iletkenindeki korona başlangıç gerilimini azalttığını belirlenerek AC ve DC iletkenler arasındaki etkileşimin elektrik alan çizgilerini bozarak korona deşarjının dağılımını etkilediği ifade edilmiştir.

Fayazi ve diğerleri (2024), çalışmalarında aynı direkte bulunan hibrit AC ve DC havai iletim hatlarının farklı arıza koşullarında hatlarda indüklenen bileşenlerini analiz etmiştir. Arıza koşullarında indüklenen bileşenlerin genliğinin normal durumdan çok daha büyük seviyelere ulaştığı ve böyle bir durumda koruma ekipmanlarının zarar görebileceği belirtilmiştir. Çalışmalarında AC/DC sistemler arası arızaların, yalnızca DC'den doğrudan etkilenen AC fazlarına veya tam tersine bir etkisi değil, aynı zamanda elektromanyetik kuplaj yoluyla doğrudan dahil olmayan AC fazlar ve DC kutupları üzerinde de bir etkisi olduğu belirtilmiştir. Bu yüzden hibrit hatlarda kapsamlı koruma sistemleri kullanılması gerekliliği ifade edilmiştir. Fayazi ve diğerleri (2023), başka bir çalışmada ise aynı direkteki hibrit iletim hatları için Ayrık Dalgacık Dönüşümü kullanılarak tek uçlu seyahat dalgası tabanlı bir arıza tespit yöntemi sunmuştur.

Wang ve diğerleri (2024), çalışmalarında aynı direği paylaşan ± 500 kV DC ve 500 kV çift devre AC iletim hatlarında AC ve DC arızalarında sistem davranışını analiz etmiştir. AC hattın kuplajının HVDC hattındaki 50 Hz bileşenleri arttırdığı ama DC reaktörün bu kuplaj etkisini hafiflettiği belirlenmiştir. Ama DC hatta meydana gelecek bir arızanın AC faz akımında önemli bir DC saptasına sebebiyet verebileceği ve bu durumun kesinti riski oluşturabileceği belirtilmiştir.

İletim şebekesi planlaması yapılırken alternatif çözümlerin şebekeye entegrasyonu önem arz etmektedir. Araujo ve diğerleri (2023), çalışmalarında iletim şebekesi genişletme planlarına mevcut AC hatlara muhtelif çok terminalli HVDC, FACTS cihazları ve reaktif güç kompanzasyonu ekleyerek evrim tabanlı bir metasezgisel yöntem ile optimal bir iletim

yapılandırması oluşturmaya çalışmıştır. Bu durumda HVDC sistemin farklı genişleme senaryolarında esneklik sağladığı ve farklı tipte takviyeler ile ekonomik çözümlerin elde edilebileceği belirtilmiştir. Heydari ve diğerleri (2024), çalışmalarında yenilenebilir kaynakların artan entegrasyonunun iletim şebekesine bindirdiği yükten ötürü Güney Brezilya HVAC iletim şebekesi planlamasında HVDC hatların entegrasyonunun yatırım maliyetlerini düşürerek refahı arttırdığı ifade edilmiştir.

2.1. İletken Yüzey Gradyanı

Yüksek gerilim hat iletkeninin yüzey gradyanı uzayda iletkenin yüzeyine dik olan ve değeri zamanla değişen elektrik alan vektörüdür. Demet iletkenleri için elektrik alan vektörü iletkenlerin konumuna göre değişir. İletken yüzey gradyanı, korona kaybında belirleyici parametredir. Bir iletken etrafındaki tüm noktalarda gerilim gradyanının tam olarak hesaplanması, iletkenin bükülmesinden kaynaklanan yüzeyin düzensizliği nedeniyle karmaşıktır (Morris & Maruvada, 1976). Genel olarak, eğim bir iletkenin çevresi etrafında tekdüze değildir ancak tanımlanmış minimum ve maksimum noktalara sahiptir. Bu nedenle, bir iletkenin eğimi tek bir sayı ile tamamen karakterize edilemez. Ancak deneyler formüller ile korona etkilerinin, gradyan cinsinden ifade edilebilir (Sibilant vd., 2003). Demet iletkenlerde ise her bir alt iletkenin kişisel maksimum gradyanı vardır. Maksimum demet gradyanı en yüksek gradyana sahip iletkenin değeri alınırken, ortalama maksimum demet gradyanı demetteki iletkenlerin ortalaması alınarak bulunur. Çoğu pratik durumda maksimum ve ortalama-maksimum değerler arasındaki fark yalnızca %1-4 düzeyindedir. Yüksek gerilimli iletim hatlarında korona etkisi hesaplanırken ortalama maksimum eğim değerini kullanmak ve bu değeri basitçe maksimum eğim olarak adlandırmak genel bir uygulamadır (LaForest, 1981). İletken yüzey gradyanı birçok faktöre bağlıdır (Britten & Burger, 2005).

- Sistem gerilimi: İletken yüzey eğimi uygulanan gerilimle doğru orantılıdır.
- İletken çapı: Genel olarak iletken çapıyla ters orantılı olarak değişir. Yani, daha büyük bir çap, daha düşük bir iletken yüzey eğimi ile sonuçlanır ve daha küçük bir çap, daha yüksek bir iletken yüzey eğimi ile sonuçlanır.
- Bir demet ve demet geometrisindeki iletken sayısı: Demetteki iletken sayısını artırmak, iletken yüzey eğimini azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir.

Bir iletken demetindeki toplam yük, eşdeğer çapına ve diğer iletken demetlerine göre konumuna göre belirlenir. Bir demetteki iletken sayısının toplam yük üzerinde yalnızca küçük bir etkisi vardır, bu nedenle demetteki bireysel iletkenlerin sayısı arttırıldığında, her bir iletken üzerindeki yük ve iletken yüzey eğimi azalır. Demetlenmiş iletkenlerin kullanılmasının tek nedeni korona sınırlaması değildir; aynı zamanda endüktansı azaltır ve dalgalanma empedansı yüklemesini artırır (Kraus, 1984).

Bir demetteki iletkenler üzerindeki yüzey gradyanının, hat üzerinde işitilebilir gürültüye ve radyo girişimine neden olduğundan düşük olması istenir. Korona oluşumu iletken yüzeyindeki gerilim gradyanına bağlıdır. Her bir iletken için ortalama gradyan denklem (1) ile elde edildikten sonra maksimum gradyan ' $\theta = 0$ ' alınarak denklem (2) ile hesaplanır (LaForest, 1981).

$$E_{ort} = \frac{|Q|}{2\pi\epsilon_0 nr} \quad (1)$$

$$E_{max} = E_{ort} \left[1 + \frac{r}{R} (n-1) \cos(\theta) \right] \quad (2)$$

Burada,

Q : iletken yükü

r : iletken yarıçapı

ϵ_0 : dielektrik sabiti

R : demet yarıçapı

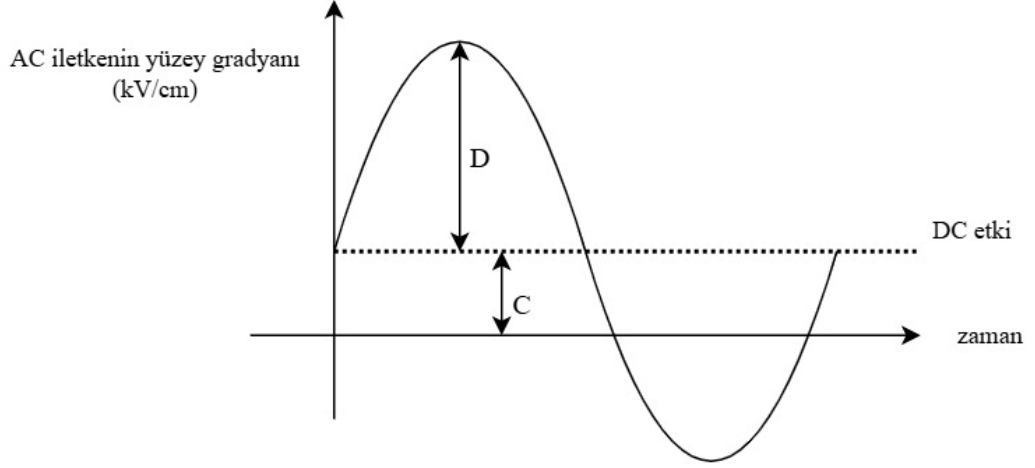
n : faz iletkenlerinin sayısını temsil etmektedir.

Tanımlanmış bir iletken yüzey eğimi için, iletken çapının artmasıyla birlikte işitilebilir gürültünün ve radyo girişiminin arttığını belirtmekte fayda vardır. Çünkü elektrik alanının radyal mesafeyle azalma hızı, iletken büyüdükçe azalır. Bu, daha büyük bir iletkenin etrafında daha uzun şeritlerin oluşmasına neden olur (Britten & Burger, 2005).

Hibrit bir koridorda yani hem AC hem de DC akım taşıyan hattın olması durumunda ise devreler birbirlerinin yüzey gradyanlarını değiştirebilirler. AC devre, DC iletkenlerinin yüzey gradyanlarında bir AC dalgalanmasına sebep olurken, DC devre ise AC iletkenlerin

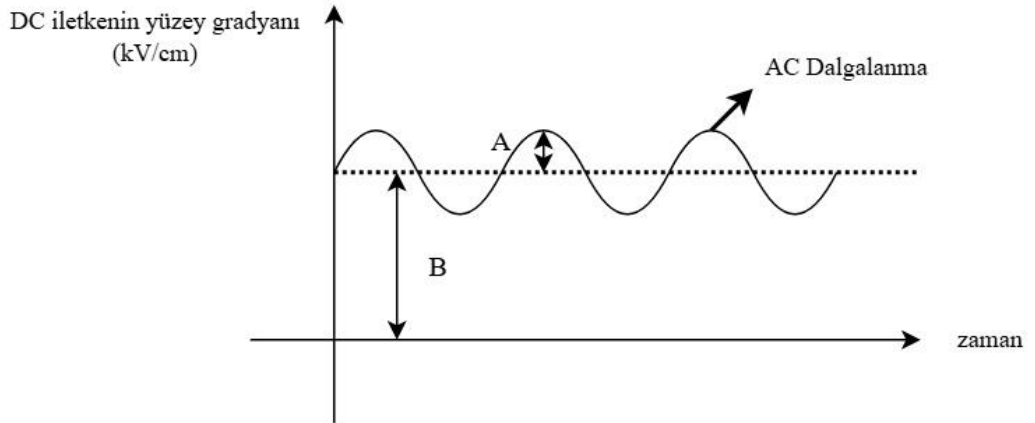
yüzey gradyanlarında bir DC ön gerilim indüklenmesine neden olur (Straumann & Switzerland, 2011).

DC etki (ön gerilim), AC iletkenin yüzey gradyanının tepe değerini değiştirir. Bu değişim DC akımının AC iletken üzerinde oluşturduğu etki nedeniyle olur. Bu etki Şekil 2’de gösterilmiştir (Clairmont vd., 1992). Bir AC iletkenin yüzey gradyanına DC ön geriliminin etkisi C/D kadardır.



Şekil 2. Hibrit koridorda AC iletkenin yüzey gradyanına DC ön geriliminin etkisi

Hibrit koridordaki bir DC iletkeninin yüzey eğimi ise Şekil 3’te gösterildiği gibi değiştirilir. AC dalgalanmanın DC yüzey gradyanı üzerindeki etkisi küçük değerlerle sınırlıdır. Bu konuda deneysel gözlemler azdır (Clairmont vd., 1992). Bir DC iletkenin yüzey gradyanına AC dalgalanmanın etkisi A/B kadardır.



Şekil 3. Hibrit koridorda DC iletkenin yüzey gradyanına AC dalgalanmanın etkisi

Hibrit hatlarda devrelerin yakınlığı nedeniyle oluşan yüzey gradyanlarındaki değişim, ses, ışık gibi farklı korona aktivitesi türlerine yol açar. Bu nedenle hibrit hatlar için operasyonel deneyim olmadığından iletkenlerin yüzey gradyan değerlerinin belirlenmesi önem arz eder (Straumann & Switzerland, 2011).

2.2. Elektromanyetik Alan

Elektrik enerjisi iletim sistemi planlaması yapılırken düşünülmesi gereken parametreler bulunmaktadır. Yeni bir iletim hattı tesis edilirken direklerin yerleri ve iletim hattının takip edeceği yolun güvenilirliği ilk sırada düşünülmesi gereken durumlardır (Enerji İletim Hatları, 2017). Kamulaştırma da yeni elektrik iletim hattı inşa etmede göz önüne alınması gereken önemli unsurlardandır. Kamulaştırma ile irtifak hakkı elde etmek için olayın hukuki yönünün gözetilmesi gerekmektedir. Tasarlanacak hibrit AC/DC elektrik iletim hattı ile direkler ve kamulaştırma problemlerinin önüne geçilebilir. Yüksek gerilim hatları çevrelerinde elektrik alan ve manyetik alan oluştururlar. Aynı direk üzerinde hibrit AC ve DC hat bağlanırken oluşacak elektromanyetik alanlar da özenle hesaplanmalıdır (Elmorshdy vd., 2019).

Elektrik ve manyetik alan canlılar üzerinde zayıf akımlar oluşturarak sağlığı olumsuz etkiler. Elektrik alan kaynaklı zayıf akımlar vücut dış yüzeyinde oluşurken, manyetik alan kaynaklı zayıf akımlar ise dış yüzeyi aşarak organların üzerinde oluşur. Elektrik alanı yolda karşılaştığı engeller zayıflatırken, manyetik alan özel bir koruyucu olmadığı takdirde her şeyin içinden geçebilir (Sarıkayha, 2014). Halk sağlığını korumak amacıyla elektromanyetik alanlara maruz kalmanın sağlığa olan etkisinin belirlenmesi için Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından 1996 yılında EMF (Electromagnetic Fields) projesi hayata geçirildi (URL-3). Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyondan Korunma Komisyonu (ICNIRP) ise Dünya Sağlık Örgütü'ne bağlı, elektromanyetik alanlar konusunda uzman fizikçi, hekim, biyolog ve epidemiyolojistlerden oluşan, sanayiden bağımsız bir uzmanlar komitesidir. Bu komite elektromanyetik alanlar ile ilgili bilimsel yayınları, araştırma sonuçlarını derinlemesine incelemekte ve 1998 yılından beri düzenli olarak, 0 ile 300 GHz frekans aralığındaki iyonize olmayan ışıınımların tümünü kapsayan elektromanyetik alana maruz kalmanın insan bedenine etkilerine ilişkin rapor ve tavsiyeler yayınlamaktadır (Arslan, 2020). ICNIRP tarafından belirlenen mesleki ve halk olarak zamana göre değişen elektrik ve manyetik alana maruz kalmanın kısıtlanması için gerekli referans değerleri Tablo 1'de

verilmiştir (ICNIRP, 2010). Tablo 1’den görüleceği üzere elektrik alan ve manyetik alan kuvveti için belirlenen sınır değerleri bazı frekans aralıklarında sabit kalırken, diğer frekans aralıklarında frekans değerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Tablo 1. ICNIRP tarafından belirlenen referans seviyeleri

Maruziyet	Frekans	Elektrik Alan Kuvveti E (kV/m)	Manyetik Alan Kuvveti H (A/m)	Manyetik Akı Yoğunluğu B (T)
Mesleki	1 Hz-8 Hz	20	$1.63 \times 10^5/f^2$	$0.2/f^2$
	8 Hz-25 Hz	20	$2 \times 10^4/f$	$2.5 \times 10^{-2}/f$
	25 Hz-300 Hz	$5 \times 10^2/f$	8×10^2	1×10^{-3}
	300 Hz-3 kHz	$5 \times 10^2/f$	$2.4 \times 10^5/f$	$0.3/f$
	3 kHz-10 MHz	1.7×10^{-1}	80	1×10^{-4}
Halk	1 Hz-8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
	8 Hz-25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
	25 Hz-50Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
	50 Hz-400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
	400 Hz-3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
	3 kHz-10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Yüksek gerilim hatlarından yayılan elektromanyetik radyasyon konusunda her ülke kendi standartlarına göre referans değerler belirlemiştir. Bu referans değerleri belirlerken çoğu ülke ICNIRP tarafından belirlenen değerleri direkt referans alırken bazıları ise kendi ülkelerinin şartlarına göre değerlerde değişikliğe gitmiştir. Tablo 2’de bazı komisyonların belirlediği elektrik ve manyetik alan referans değerleri gösterilmiştir (Arslan, 2020).

Tablo 2. 50 Hz için elektromanyetik alanlarla ilgili farklı sınır değerleri

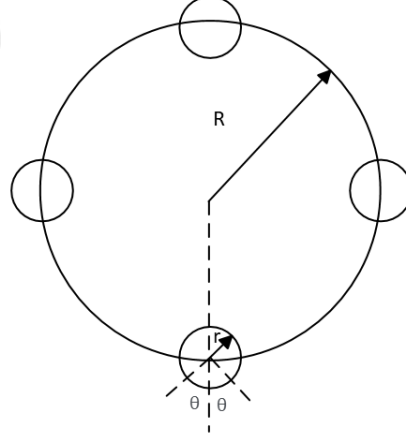
Ülke	Elektrik Alan (E)	Manyetik Alan (B)	Açıklama
ICNIRP	5 kV/m	200 μ T	J temel sınır 2mA/m ²
IEEE	5 kV/m tüm vücut 10 kV/m *	904 μ T baş ve gövde 75.8 mT kol ve bacak	(*) EİH irtifak alanı içinde, normal yük koşullarında
AB	5 kV/m	100 μ T	J temel sınır 2mA/m ²

Mart 2010 tarihinde yapılan görüşmelerle Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, TEDAŞ ve TEİAŞ'ın görüşü alınmak suretiyle Çevre ve Orman Bakanlığınca hazırlanıp 24 Temmuz 2010 Tarih ve 27651 sayılı Resmî Gazetede yayınlanarak yürürlüğe giren “İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyonun Olumsuz Etkilerinden Çevre ve Halkın Sağlığının Korunmasına Yönelik Alınması Gereken Tedbirlere İlişkin Yönetmelik” bu konuda kalıcı ve bağlayıcı olan tek düzenlemedir. Bu yönetmelikle frekans aralıklarından 0,025-0,8 kHz arası değer için $E = 750/f$ kV/m, $H = 8/f$ A/m, $B = 10/f$ µT olarak belirlenmiş olup, 50 Hz frekans için iletim tesislerimizle ilgili sınır değerler elektrik alanı (E) için 15 kV/m, manyetik alan şiddeti (H) için 160 A/m, manyetik alan (B) için 200 µT olarak belirlenmiştir (Sarıkayha, 2014; Resmi Gazete, 2010).

HVAC iletim hatları çevresinde oluşan elektrik ve manyetik alanlar düşük frekanslı iken HVDC iletim hatları çevresinde oluşan alanlar statiktir. HVDC hatları için uluslararası kabul görmüş maruziyet sınırları ile ilgili olarak, ICNIRP yönergeleri statik elektrik alanları için belirli sınırlar koymamaktadır (Leitgeb, 2014; Soloyyev & Arevalo, 2021). Çalışmalarda HVDC hatlarına maruz kalma ile rapor edilen sağlık sorunları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmadığını göstermektedir (Petri vd., 2017). ICNIRP tarafından belirlenen statik manyetik alanlar için sınır, AB'nin 1999/519/EC numaralı EMF tavsiyesinde yer almaktadır ve bu sınır 40 mili Tesla olarak belirlenmiştir (URL-4, 2024). Ülkelerin statik DC alanlar için oluşmuş bir referans değeri bulunmamaktadır. HVDC iletimin yaygınlaşması ile statik DC alanlara maruziyet sınır değerlerinin bir standarda oturulması gerekecektir.

Farklı frekanslarda (50 Hz / 60 Hz) AC elektromanyetik alanların insan sağlığı üzerinde potansiyel risklerini belirlemeye yönelik çalışmalar, DC elektrik alanının potansiyel etkilerine yönelik çalışmalardan daha fazladır. Statik elektrik alanlar insan vücuduna nüfuz etmez. ICNIRP'nin “Elektromanyetik Alanlara Maruz Kalmayı Sınırlama Yönergeleri” (ICNIRP, 2009) başlıklı raporunda şu ifadelere yer verilmiştir: “Genel olarak, mevcut olan az sayıda epidemiyolojik çalışma metodolojik sınırlamalara sahiptir ve statik manyetik alanlara uzun süreli maruziyetin kanser veya diğer sonuçlar açısından risk oluşturma olasılığı konusunda birçok sorunu çözümsüz bırakmaktadır. Mevcut çalışmalar 10 militesla seviyesindeki statik manyetik alanlara maruz kalmanın çeşitli sağlık sorunları üzerinde güçlü ve belirgin bir etkisi olduğunu göstermemiştir. Ancak çalışmaların sınırlamaları nedeniyle daha küçük veya orta düzeydeki olumsuz etkileri de tespit edilmeyebilmektedir”. Dolayısıyla HVDC iletim ile statik manyetik alanların çevredeki canlılar için sağlık riskleri

daha düşük olacaktır. Ancak HVDC iletim hatlarının yaydığı alan sadece iletkenler tarafından oluşturulan statik elektrik alandan değil, aynı zamanda iyon akış alanından da oluşmaktadır. HVDC iletim hatlarının etrafındaki alan da yüklü iyonlarla doludur ve iyon hareketliliğinin hesaplanması, korona fenomeni nedeniyle oldukça karmaşıktır (Choopum vd., 2023). HVDC hatları tarafından üretilen iyon akış alanı rüzgarla sürüklenabilir ve statik alanı güçlendirebilir. Rüzgarla hareket eden iyon bulutları iletim hattının geçiş hakkı veya koridorunun dışındaki insanlarla, hayvanlarla ve bitkilerle temasa geçebilir. Ayrıca, yer seviyesindeki DC elektrik alanı, rüzgâr hızı, bağıl nem ve hatlara dikey hava basıncı gibi değişkenlerden de etkilenir (Xie vd., 2024). Elektrik alan değeri, hattın merkezinden uzaklaştıkça azalır. Elektrik ve manyetik alan hesaplamalarında iletkenlerin sayısı ve konumu önemlidir. Özellikle yüksek gerilimde korona kayıplarını azaltmak için demet iletken kullanılması alan hesaplamalarında öne çıkmıştır (Xue vd., 2024). Bir iletim hattının fazları Şekil 4'te gösterildiği gibi bir daire üzerinde eşit şekilde konumlandırılmış, çok sayıda alt iletkeni sahip olduğunda, eşdeğer yarıçapa sahip eşdeğer bir iletken olarak düşünülebilir.



Şekil 4. İletkenin eşdeğer yarıçapının gösterimi

Bu eşdeğer yarıçap ($r_{eş}$) aşağıdaki denklem (3)-(4) ile elde edilir.

$$R = \frac{d}{2 \sin(\pi / n)} \quad (3)$$

$$r_{eş} = R \sqrt[n]{\frac{nr}{R}} \quad (4)$$

Burada;

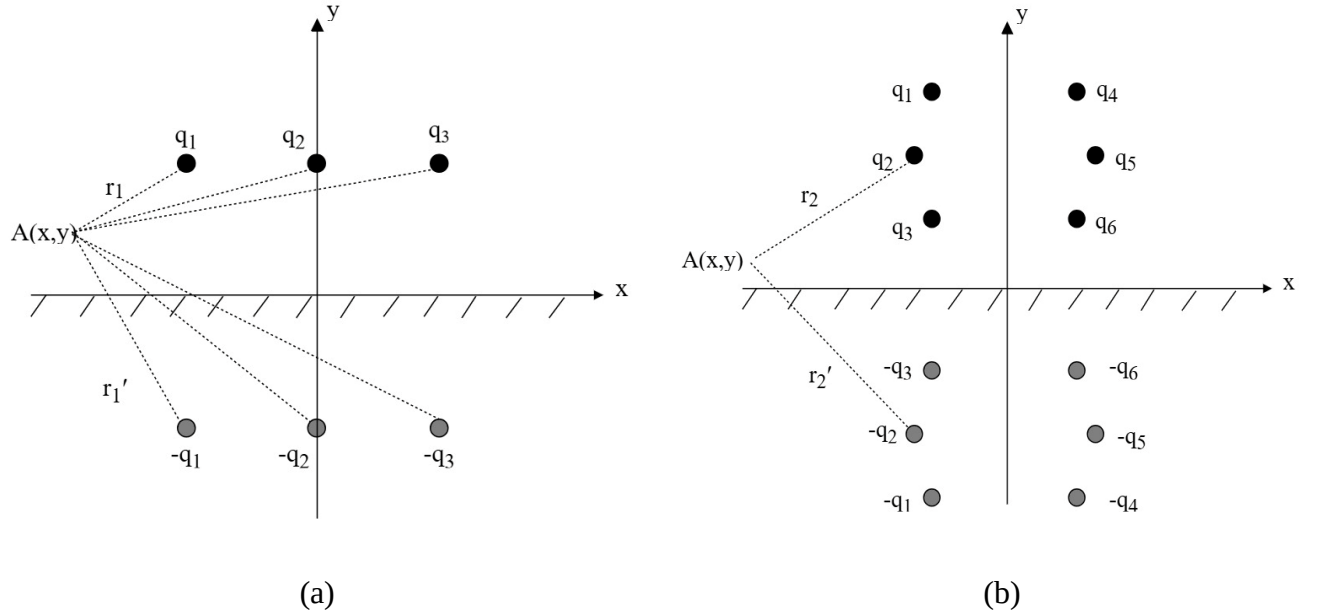
R : demet yarıçapı

r : iletken yarıçapı

n : alt iletken sayısı

d : alt iletkenler arası mesafeyi temsil etmektedir.

Düzensiz demetler için ise eşdeğer çap, aynı toplam yüke sahip tek iletkenin çapı olarak hesaplanır (LaForest, 1981). Elektrik alan hesaplamalarında toprak çok iyi iletken olarak kabul edilir ve yükler sonsuz uzunluktaki çizgisel yüklerle ifade edilir. Vektörel görüntü alma metodu ile Şekil 5'te görüldüğü üzere her bir iletkenin q yükü ve görüntüsünün $-q$ yükü bulunmaktadır.



Şekil 5. N adet iletkenli devrelerin görüntü metoduna göre A noktasındaki elektrik alanının hesaplanması şeması a) Tek devre düzlemi şematik gösterimi, b) Çift devre düzlemi şematik gösterimi

N tane iletken için yükler, gerilim ve Maxwell potansiyel katsayıları ile denklem (5)-(8) ile hesaplanır (LaForest, 1981).

$$[Q] = [P]^{-1}[V] \quad (5)$$

$$[Q] = [Q_{gerçek}] + j[Q_{görüntü}] \quad (6)$$

$$E_x = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i \left(\frac{x-x_i}{r_i^2} - \frac{x-x_i}{(r_i')^2} \right) \quad (7)$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i \left(\frac{y-y_i}{r_i^2} - \frac{y-y_i}{(r_i')^2} \right) \quad (8)$$

Burada;

Q : iletken yükü

ϵ_0 : dielektrik sabiti

P : Maxwell potansiyel katsayısı

V : yükün bir noktada oluşturduğu potansiyel

x : elektrik alan şiddetinin ölçüleceği noktanın yatay koordinatı

y : elektrik alan şiddetinin ölçüleceği noktanın düşey koordinatı

x_i : i. iletkenin yatay koordinatı

y_i : i. iletkenin düşey koordinatı

r_i : i. iletken ile elektrik alan şiddetinin ölçüleceği nokta arasındaki uzaklık

r_i' : i. iletkenin görüntüsü ile elektrik alan şiddetinin ölçüleceği nokta arasındaki uzaklığı temsil etmektedir.

Böylelikle A noktasındaki toplam elektrik alan şiddeti denklem (9)'daki gibi hesaplanır.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (9)$$

Yüksek gerilimli iletim hatlarında dikkat edilmesi ve sınır değerlerini gereken bir diğer hususta manyetik alandır. İletkenlerin taşıdığı akım arttıkça yaydığı manyetik alan seviyesi yükselmektedir (TMMOB, 2010). Enerji iletim hatlarının yaydığı manyetik alan şiddeti Biot-savart yasası ile ifade edilmektedir. Bu yasaya göre içinden I akımı akan bir iletkenin r uzaklığındaki bir noktada oluşturacağı manyetik alan şiddeti denklem 10'daki gibidir (LaForest, 1981).

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (10)$$

Dolayısıyla bir A noktasındaki toplam manyetik alan denklem (11)-(14)'te görüleceği üzere tüm iletkenlerin her iki ekseninde yaydığı manyetik alanların toplamına eşittir (LaForest, 1981).

$$B = \mu_0 H \quad (11)$$

$$H_x = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{2\pi} \left(\frac{y - y_i}{r_i^2} \right) \quad (12)$$

$$H_y = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{2\pi} \left(\frac{x - x_i}{r_i^2} \right) \quad (13)$$

$$B = \mu_0 \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \quad (14)$$

Burada;

H : manyetik alan şiddeti

B : manyetik akı yoğunluğu

μ_0 : manyetik geçirgenlik

x : elektrik alan şiddetinin ölçüleceği noktanın yatay koordinatı

y : elektrik alan şiddetinin ölçüleceği noktanın düşey koordinatı

x_i : i. iletkenin yatay koordinatı

y_i : i. iletkenin düşey koordinatı

I_i : i. iletkenin akımı

r_i : i. iletken ile elektrik alan şiddetinin ölçüleceği nokta arasındaki uzaklığı temsil etmektedir.

2.3. Korona

Yüksek gerilimli AC veya DC iletim hatlarının performansı korona kayıpları, radyo gürültüsü ve işitilebilir gürültü açısından değerlendirilmelidir. Korona, enerjilendirilmiş bir iletkenin yüzeyinde meydana gelen elektriksel bir kısmi deşarj olgusudur. Korona deşarjı genellikle düzensiz yüzeylerde, çok kavisli bölgelerde, keskin köşelerde, çıkıntılı noktalarda veya metal yüzeylerin kenarlarında oluşur. Korona deşarjı, işitilebilir gürültü ve radyo girişimine neden olduğu için insan sağlığı açısından risklerinin tespit edilmesi önem arz

etmektedir. Günümüzde güç talebindeki artış ve buna bağlı olarak gerilim seviyelerindeki artışla birlikte korona mevzuu akademik yönden ilgi çekmeye devam etmektedir.

Normal koşullar altında iletkenlerin etrafındaki hava, iyonize parçacıklar (serbest elektronlar ve pozitif yüklü iyonlar) ve bir tür dengeyi koruyan nötr moleküller içerir. Ancak daha yüksek gerilimler uygulandığında iletken etrafındaki havada yoğun iyonlaşmaya neden olan potansiyel bir gradyan oluşur. Bir iletken etrafındaki elektrostatik alanın yoğunluğu tekdüze olmamakla birlikte maksimum kuvvet iletkenin yüzeyinde bulunur. İletkendeki gerilim seviyesi yükseldiğinde ve kritik alan kuvveti yaklaşık 30 kV/cm'ye ulaştığında, ilk deşarjlar iletken yüzeyinde veya iletkenin çok yakınında meydana gelir. Gerilim daha da artarsa parlama gerçekleşir.

İletken yüzeyindeki elektrik alan yoğunluğu korona başlangıç gradyanını aştığında korona deşarjı meydana gelir. Başlangıç gradyanı iletkenin yarıçapına, yüzey koşullarına ve ortam hava koşullarına bağlıdır. Genel olarak korona alan şiddeti (E_k), Peek denklemi ile denklem (15)-(16) ile aşağıdaki gibi verilmiştir (Kalenderli vd., 2022).

$$E_k = mE_0\delta\left(1 + 0.301/\sqrt{\delta r}\right) \quad (15)$$

$$\delta = 294P / (273 + T) \quad (16)$$

Burada;

δ : bağıl hava yoğunluğu

T : hava sıcaklığı

P : hava basıncı

r : iletken yarıçapı

m : pürüzlülük faktörünü temsil etmektedir.

Yüksek gerilimli iletim hatları söz konusu olduğunda hat tasarımı ve işletme koşulları nedeniyle ek kayıplar oluşabileceğinden hattın korona kayıpları açısından değerlendirilmesi önemlidir (Stracqualursi vd., 2021). Enerji iletim hatlarındaki korona kayıpları, esas olarak elektrotlar arası aralıktaki iyon alanı yüklerinin hareketiyle üretilir. DC koronada iyon akışı iletken telden toprak düzlemine tek yönlüdür. AC korona durumunda ise uzay yükü iletkenlerin yakınıyla sınırlıdır. Büyüyen elektrik alanda serbest elektronlar, alternatif elektrik alanı sayesinde iletkene doğru hızla hareket ederek, çarpıştıkları nötr moleküllerden

daha fazla elektron ve iyon çekmeye yetecek kinetik enerji kazanırlar. Elektronları çıkarmak için kullanılan enerji, elektronlar ve iyonlar birbirlerine çekilip yeniden birleşerek nötr bir molekül oluşturduğunda ultraviyole fotonlar olarak dağılır. Bu iyonizasyon-rekombinasyon süreci kümülatiftir ve iletkenler arasında kıvılcım oluşmasına neden olur.

AC hatlar için korona kaybı (KK) ilk olarak Peek tarafından incelenmiştir ve burada deneylere dayalı olarak ampirik bir formül türetilmiştir (Peek, 1929). Korona kayıpları hesaplanırken, analitik yöntemler veya çeşitli araştırma enstitüleri tarafından geliştirilen ampirik formüller ile de hesaplanmaktadır. Özellikle Bonneville Power Administration (BPA), Electric Power Research Institute (EPRI), Hydro-Quebec's Research Institute (IREQ) isimli araştırma enstitüleri enerji alanında araştırma geliştirme üzerine hizmet veren resmi kuruluşlardır. Yüksek gerilimli iletim hatlarının güvenilir çalışması açısından tasarım sürecinde özellikle bu kurumların geliştirmiş olduğu ampirik formüller yardımıyla modelleme ve simülasyon araçları tercih edilmektedir. BPA tarafından geliştirilen ve 1 W/m'nin üzerindeki dB cinsinden AC korona kaybını hesaplamada kullanılan ampirik formüller denklem (17)-(19)'da verilmiştir (Khan vd., 2023). Güzel havada meydana gelen korona kayıpları, yağışlı hava kayıplarından 17 dB çıkarılarak elde edilir (Chartier, 1983). Burada güzel hava ile genellikle güneşli, yağışsız ve kuru hava koşulları kastedilmektedir (Morris & Rakoshdas, 1964).

$$KK_{AC} = 14.2 + 65 \log(E / 18.8) + 40 \log(2r / 3.512) + K_1 \log(n / 4) + K_2 \quad (17)$$

$$K_1 = \begin{cases} 13 & n \leq 3 \\ 19 & n > 4 \end{cases} \quad (18)$$

$$K_2 = \begin{cases} 10 \log(R_r / 1.676) & R_r \leq 3.6 \\ 3.3 + 3.5 \log(R_r / 3.6) & R_r > 3.6 \end{cases} \quad (19)$$

Burada;

n : demetteki alt iletken sayısı

r : alt iletkenin yarıçapı

R_r : yağış oranı

K_1 : alt iletken sayısına bağlı sabit

K_2 : yağış oranına bağlı sabit

E : maksimum elektrik alanı temsil etmektedir.

BPA tarafından geliştirilen ve 1 W/m'nin üzerindeki dB cinsinden DC korona kaybını hesaplamada kullanılan ampirik formül ise denklem (20)'de verilmiştir (EPRI, 1976).

$$KK_{DC} = 16.9 + 0.73(E - E_0) + 20 \log(2r / d_0) + 8 \log(n / n_0) + k_2 - 3 \quad (20)$$

Burada;

E_0 : referans değer (25 kV/cm)

n_0 : referans değer (6)

d_0 : referans değer (4.064 cm)

k_2 : hava koşullarına bağlı sabit değeri temsil etmektedir.

Korona kaybı, hattın korona nedeniyle kaybettiği güçtür. Hibrit hatlarda korona kaybı konusunda deneysel veri kısıtlıdır. Ağır korona koşullarında, bir AC hattı her iki polaritede de iyon üretir. Bitişik DC iletkeninin polaritesinin zıt kutbuna sahip iyonlar ona doğru ilerleyerek AC'den DC hatta bir akıma neden olur. Bu akım ekstra korona kaybına sebebiyet verir. Bu fazla kayıp büyüklük olarak küçük seviyelerde de seyretse ekonomik açıdan değerlendirilmelidir (Clairmont vd., 1992).

DC iyon akımlarının aynı zamanda hibrit AC/DC iletim sistemleri, yani hem AC hem de DC iletkenleri taşıyan iletim direkleri için de etkileri vardır. Hibrit uygulama onlarca yıldır tartışılmaktadır (Pfeiffer vd., 2015). Direk geometrisine ve iletkenlerin göreceli yönelimine bağlı olarak, DC kutuplarda korona yoluyla üretilen iyonlar, AC iletkenlerine doğru sürüklenabilir ve AC fazlarında DC akım bileşenlerine neden olabilir. Bu olay mıknatıslanma akımlarının artmasına bağlı olarak transformatörlerde olumsuz etkilere yol açabilir (Pfeiffer vd., 2015). Yer seviyesindeki iyon akım yoğunluğu gibi, bu etki de doğrudan toplam korona kaybı ile bağlantılıdır. Korona kaybının yağmurla arttığını destekleyen daha fazla veri Hydro-Quebec araştırma enstitüsü (IREQ) tarafından yapılan çalışmalarda mevcuttur (Maruvada vd., 1977; Trinh vd., 1982). Dolayısıyla HVDC hatlarda korona kaybının yağmur sırasında genellikle daha yüksek seviyelere ulaştığı söylenebilir.

2.3.1. İşitilebilir Gürültü

İletim hatları planlanırken çevresel etkilerini minimize etmeye yönelik çalışmalar hız kazanmıştır (Kishore & Singal, 2014). İşitilebilir gürültü de bu çevresel etkilerden biridir. Elektrik iletimi yapılırken kaybın minimum olması istendiğinden gerilim seviyesi artırılır. Gerilim seviyesinin artırılması ise beraberinde elektrik alan artışını getirir. İletkenin yüzey gradyanı kritik bir değeri aştığında korona deşarjı gerçekleşir (Qu vd., 2021). Korona, iletkenlerin yüzeyindeki yüksek gerilimli noktalarda havanın kısmi parçalanmasıdır (iyonlaşmasıdır). Korona deşarjları, işitilebilir gürültü ve radyo parazitlerinin oluşmasında rol oynamaktadır (Al-geelani vd., 2018). Hat tesis edilirken hattın üreteceği işitilebilir gürültünün belli seviyeleri aşmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. 500 kV ve üzeri iletim geriliminin kullanılmaya başlanmasıyla işitilebilir gürültü, kamunun ilgisini çekmiş ve iletim hatlarının tasarım faktörlerinden biri olarak ortaya çıkmıştır.

İşitilebilir gürültü, bir iletim hattından kaynaklanan istenmeyen bir sesi temsil eder (Li vd., 2018). Ses basıncı seviyesi işitilebilir gürültünün temel ölçüsüdür ve genellikle bir referans basınca göre logaritmik olarak ifade edilir. Desibel (dB) cinsinden ses basınç seviyesi denklem (21)'de verilmiştir (Kumar & Thomas, 2016)

$$\text{Ses Basınç Seviyesi} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{Ses Basıncı}}{\text{Referans Basınç}} \right) \text{dB} \quad (21)$$

Koronanın ürettiği işitilebilir gürültü zamanla değişir ve bu gürültü çeşitli istatistikler ile tanımlanmıştır. 'LA' ile ifade edilen çevresel gürültü seviyesinde; L aşma seviyesini, A ise aşılma süreyi temsil etmektedir. Örneğin L_5 seviyesi, ölçülen süresinin %5'inde aşılma gürültü seviyesini ifade ederken L_{50} , ölçülen süresinin %50'sinde aşılma ses seviyesini ifade eder. İletim hatlarına yönelik ses seviyesi ölçümleri ve tahminleri genellikle aşma seviyeleri cinsinden ifade edilir; L_5 seviyesi maksimum seviyeyi, L_{50} seviyesi ise ortalama seviyeyi temsil eder (LaForest, 1981).

Ortam şartları korona deşarjında belirleyicidir. AC iletim hatlarında, iletkenlerin üzerinde su damlası olması elektrik alan korona başlangıç seviyelerini aşar ve gürültü oluşturur. Bu nedenle, iletim hatlarından gelen işitilebilir gürültü genellikle kötü hava koşulları (ıslak iletken) ile ilişkilendirilir (Bian vd., 2012). Yağmur, sis, kar veya buzlanma dönemlerinde ıslak iletkenler oluşabilir. Dolayısıyla AC'de özellikle yağmurlu havalarda

oluşacak gürültünün daha yüksek olması beklenir. Güzel hava koşullarındaki işitilebilir gürültü seviyesinin yağmurlu havalara göre çok daha düşük olduğunu belirtmekte fayda var. Güzel havalarda, çoğu hattaki korona gürültüsü, insan kulağı tarafından algılansa bile, ortam koşulları çok sessiz olmadığı sürece, ortam gürültüsünün üzerinde ölçülemez (Scott-Walton vd., 1979).

DC iletim hatları için ise durum AC iletim hatlarının tam tersidir. DC hatta oluşan işitilebilir gürültü yaz mevsiminde en yüksekken, sonbahar/ilkbahar ve kış aylarında giderek azalmaktadır. Bunun sebebi azalan sıcaklıkla artan hava yoğunluğunun iletkenlerin korona başlangıç gradyanını arttırmasıdır. Ancak kar varlığı da işitilebilir gürültü seviyesinde etkilidir. Islak kar işitilebilir gürültünün güzel havaya (güneşli) göre daha düşük olmasına neden olurken, kuru kar daha yüksek değerlere neden olur (Maruvada vd., 1977).

AC ve DC arasındaki diğer bir fark ise, işitilebilir gürültünün AC koşulları altında her üç faz iletkeninden yayılması iken DC koşulları altında yalnızca pozitif kutbun işitilebilir gürültüye önemli bir katkı sağlamasıdır. Negatif kutuptan gelen gürültü, pozitif kutuptan çok daha azdır ve işitilebilir gürültüye katkısı güvenle göz ardı edilebilir (Chartier vd., 1981).

İzin verilen işitilebilir gürültü limitleri yerel yönetmeliklerle belirlenir (Shah, 1979). İşitilebilir gürültünün halkın şikayetlerini önlemek için AC iletim hatları için güzel havalarda 40-50 dBA, yağmur durumunda ise L_{50} seviyesinin 50-60 dBA ile sınırlandırılması önerilmiştir (Straumann & Franck, 2011). DC hatları için ise durum farklıdır çünkü işitilebilir gürültü seviyesi güzel havalarda yağmurdan daha yüksektir. İyi havalarda işitilebilir gürültünün daha uzun sürmesi dikkate alındığında iyi havalarda L_{50} seviyesinin 40 dBA ile sınırlandırılması önerilir (Lundkvist, 2009; Buono vd., 2023).

İşitilebilir gürültü, literatürde çalışılan konulardandır. Hibrit hatlar ve koridorlar için, DC koronadan kaynaklanan işitilebilir gürültünün şikayetlere neden olması muhtemeldir. Çünkü DC için korona ve işitilebilir gürültü güzel havalarda en yüksek düzeydeyken AC için kötü havalarda en yüksektir (Straumann & Franck, 2011). DC hatlarının polaritesi de önemli bir rol oynar çünkü pozitif iletkenlerin koronası, negatif iletkenlerin koronasından daha yüksektir. Bu nedenle, hibrit AC/DC hatlarda işitilebilir gürültü, kutup/faz iletken konfigürasyon tasarımı için önemli bir kriterdir. Hibrit AC/DC hatlardaki korona davranışının, yalnızca AC veya yalnızca DC hatlardaki korona davranışıyla benzerlik göstermesi, hibrit hatlar için aynı hesaplama yöntemlerinin kullanılabileceği göstermektedir (Williamson, 2016; Hedtke vd., 2021). Yani hibrit bir hat için toplam gürültü seviyesi, AC ve DC devrelerden gelen gürültülerin toplamı olmalıdır (Clairmont, 1989). Hibrit hat

performansını belirlemek için bu formüllerin uygulanmasındaki en büyük sorun AC formülünün yağmurlu havayı, DC formülünün ise güzel havayı temel almasıdır.

2.3.2. Radyo Gürültüsü

Elektrik sektöründe AM yayın frekans bandında oluşan parazit radyo gürültüsü olarak kabul edilirken, televizyon yayın bandında oluşan parazit ise televizyon gürültüsü olarak adlandırılır. Korona deşarjları radyo gürültüsünün oluşmasında birincil rol oynamaktadır. Korona deşarjı doğası gereği titreşimlidir ve iletkenlerin üzerinde akım ve gerilim darbeleri üretir. Bu darbeler iletim hatları boyunca ilerleyerek zayıflasa da geniş bir frekans aralığında (3 kHz-30,000 MHz) elektromanyetik girişime neden olur (EPRI, 2010).

Radyo gürültüsü (RG) hava ve yüzey koşullarındaki değişikliklere bağlı olarak zamanla değiştiğinden hesaplanması en zor parametrelerdendir. Radyo gürültüsü hesaplanırken uzun vadeli deneylerle geliştirilen ampirik formüller veya frekans alanı modal analizinin yapıldığı yarı analitik yöntemler kullanılır. Analitik yaklaşımda radyo girişimi uyarma fonksiyonunun bilinmesi gerekir. Bu yüzden özellikle daha kompleks çok devreli hatlar ya da hibrit hatlar için her bir faz ve kutup iletkenlerinden gelen radyo gürültüsünün ayrı ayrı hesaplanarak bir noktada toplanarak hesaplandığı ampirik formüller analitik yöntemlere göre daha fazla tercih edilmektedir (Chartier vd., 1981; Williamson, 2016).

Bir AC iletim hattının radyo gürültü seviyesi, iletkenlerin korona kaynağı görevi gören su damlacıklarına doyduğu şiddetli yağmur sırasında en yüksek değere ulaşmaktadır. Korona kaynaklarının (tipik olarak böcekler ve bitki parçacıkları) nispeten az olduğu güzel havalarda ise radyo girişimi daha düşüktür ve ihmal edilebilir (EPRI, 1976). Yağmur etkisi ile iletkenlerdeki yabancı parçacıklar temizlendiği için yağmur sonrası ise en düşük değere ulaşır. 1000 kV AC çift devre iletim hattı için yapılan bir çalışmada radyo gürültüsünün yağmur şeklindeki yağışlarla kademeli olarak arttığı belirlenmiştir. Yağış sıfıra düştüğünde ise radyo gürültüsü hemen azalmaktadır (Xie vd., 2016).

İletkenlerin yüzeyin gradyanının azalmasına neden olan herhangi bir değişiklik radyo gürültü seviyelerini de azaltacaktır. İletkenlerin sayısı ve iletkenlerin çapı, radyo gürültü seviyeleri üzerinde önemli etkiye sahiptir (He vd., 2015). İletken sayısının veya iletkenlerin çapının artması radyo gürültüsünün azalmasına neden olur.

Laboratuvarlardan, testlerden ve DC hatlarını pratikte kullanımından elde edilen sonuçlar, en yüksek radyo gürültü seviyelerinin kuru ve güzel havalarda meydana geldiğini

göstermiştir (EPRI, 2010). Yağışlı havalarda iletkenlerin üzerinde çok sayıda su damlası görülür. Su damlaları çok etkili korona kaynaklarıdır. Çünkü bir elektrik alanında deforme olup sivri hale gelirler ve çok düşük elektrik alanlarında korona üretirler. Ama su damlalarından kaynaklanan korona, çoğu güzel hava (güneşli) koşulundaki kaynaklardan gelen korona gibi çok hızlı ve gürültülü değildir, daha çok parıltılıdır. Parlayan korona, iletkenlerden uzaya sabit, gürültüsüz bir yük emisyonuna karşılık gelir. Bu olaylar AC hatlarında meydana gelmez çünkü iletken yüzeyine yakın elektrik alanının polaritesi frekansla değişir. Sonuç olarak, DC hatlarındaki girişim, yağışlı havalarda kuru havaya göre daha azdır. Ama bu durumda istisnaları mevcuttur. Örneğin hafif kar, kuru havaya göre biraz daha yüksek seviyelere neden olabilir (EPRI, 2010).

Ayrıca Bir DC iletim hattından gelen radyo girişimi esas olarak pozitif kutuplu iletkenlerden kaynaklanırken negatif kutbun üreteceği gürültü göz ardı edilebilecek seviyelerde olmaktadır. DC iletim hatlarının radyo gürültüsü nemle azalırken rakım ve sıcaklıkla artmaktadır. Genellikle yağmurlu günlerde DC iletim hatlarının radyo paraziti, güzel havalara nispeten yaklaşık 3 dB ($\mu\text{V/m}$) daha düşüktür (CIGRE, 2014). Her 300 m rakım artışı içinse yaklaşık 1 dB ($\mu\text{V/m}$) radyo gürültüsü artar (Tejada-Martinez, 2019).

Radyo paraziti mevsimlere göre de değişir. Daha spesifik olarak, sonbaharın sonlarında ve kış başlarında nispeten düşüktür, yaz aylarında zirveye ulaşır. Kış ve sonbahar başlarında ise ortalama bir seviyede seyreder. Bu nedenle radyo girişim limiti belirlenirken yaz aylarında radyo parazitine öncelikle dikkat edilmelidir (Wan vd., 2018).

Hibrit durumlarda AC ve DC iletkenler birbirlerini etkiler. İşitilebilir gürültü gibi radyo gürültüsü de tepe yüzey gradyanına bağlı olduğundan işitilebilir gürültü için yapılan değerlendirmelerin aynısı radyo gürültüsü için de geçerliliğini korumaktadır.

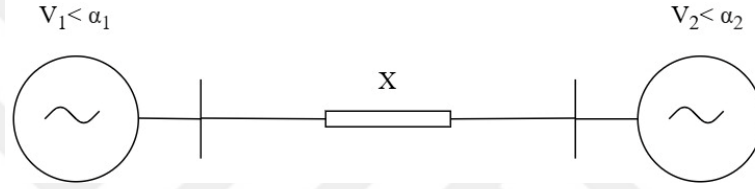
Radyo gürültüsü tek devreli hatlar için bile hesaplanması en zor olgulardandır. Hibrit hatlar için DC radyo gürültüsünün güzel havalarda sorun teşkil etmesi ve AC hatların radyo gürültüsünün ise hem güzel hava hem kötü hava olayı olarak görülmesi iyice zorlaşmaktadır. Hesaplama yarı analitik yaklaşımlar sadece tek devreli hatlar için geçerlidir. Hibrit hatlar için karşılaştırılmalı yaklaşım şu an için çözüm sunmaktadır. Karşılaştırılmalı yaklaşımda her faz ve kutbun üreteceği işitilebilir gürültü belirlenerek bir noktadaki değeri saptanır (Chartier vd., 1981).

2.4. Güç Aktarım Kapasitesi

Güç iletim kapasitesi, yüksek gerilimli iletim hatlarının belli sistem koşulları altında elektriği güvenli şekilde iletebilme yeteneğinin bir ölçütüdür. Güç iletim kapasitesini belirleyen bazı parametreler vardır. AC hatlarda, hattın termal limiti, gerilim limiti, kararlılık limiti ve dalga empedans yükü bunlardan bazılarıdır (Karimi vd., 2018).

- Kararlılık Limiti:

Güç sistemlerinin kararlılığı, bir elektrik güç sisteminde meydana gelen herhangi bir bozulmanın ardından dengeli çalışma koşullarını yeniden kazanabilme yeteneği olarak ifade edilmektedir (Kundur vd., 2004). AC iletim hattından iletilecek güç miktarı hattın empedansı ile hat başındaki ve sonundaki gerilimlerin genlik ve açıları ile ilişkilidir.



Şekil 6. Temsili bir AC iletim hattı

Burada;

V_1 : hat başı geriliminin genliği

α_1 : hat başı geriliminin faz açısı

V_2 : hat sonu geriliminin genliği

α_2 : hat sonu geriliminin faz açısı

x : hattın empedansını temsil etmektedir.

Şekil 6'daki gibi bir AC hatta iletilecek güç miktarı temel güç iletim denklemine göre denklem (22)'deki gibi hesaplanır. Bu denkleme göre maksimum güç aktarımı için 90° açı farkı gereklidir. Kararlılık bakımından açı farkının mümkün olduğunca küçük değerlerde olması gerekir. FACTS cihazlarıyla bu açı değeri değiştirilebilir (Kundur, 1994).

$$P_{1,2} = \frac{V_1 V_2 \sin(\alpha_1 - \alpha_2)}{X} \quad (22)$$

- Gerilim Limiti:

Türkiye Elektrik Şebeke Yönetmeliği'ne göre iletim sistemi planlama esaslarında gerilim ve frekans değerlerinin, sistem kararlılığını bozmayacak şekilde belli sınırlar içinde kalması gerekmektedir. Bu kapsamda Türkiye Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nin İkinci Kısım, Birinci Bölümü 5. Maddesi'ne göre, 400 kV AC baralar için gerilim sınırları 370 ile 420 kV arasında olacak şekilde belirlenmiştir (Resmî Gazete, 2014).

- Termal Limit:

İletkenlerden akan akım miktarı arttıkça iletkenler ısınarak genişler. Bu genişleme iletkenlerin daha fazla sarkmasına sebebiyet vererek orta açıklığın toprağa olan mesafesini azaltır. Toprağa olan minimum mesafenin aşılması çevredeki canlılar için risk oluşturabilir (Margita vd., 2024). Ortam sıcaklığı iletkeni soğutacak seviyede değilse bu artış bir yerde tolere edilememeye başlar ve iletkenler fiziksel olarak da zarar görerek arıza oluşturur. Bu yüzden iletkenin termal sınırı hattın güvenliliğini sağlamada ve iletkenlerin uzun ömürlülüğünü korumada önemli bir parametredir (Zainuddin vd., 2020).

- Dalga Empedans Yüğü:

AC hatlarda güç aktarımında bir diğer temel rolü dalga empedans yüklemesi (SIL) almaktadır. İletim hatları seri endüktans ile şönt kapasitansa sahiptir. Düşük yükte hat fazla reaktif güç üretir ve hattaki gerilim artar. Yüksek yükte ise reaktif güç tüketilir ve gerilim düşer (Kundur, 1994). Belli bir yükte üretilen ve tüketilen reaktif güç dengelenir ki bu durum sistemden istenen bir davranıştır. Doğal reaktif güç dengesinin oluştuğu yük değeri karakteristik empedans veya dalga empedansı (Z_c) olarak isimlendirilir. Denklem (23)'te ' z ' ifadesi hattın seri empedansını, denklem (24)'te ' y ' ifadesi ise hattın paralel admitansını belirtir. Karakteristik empedans değeri denklem (25) ile hesaplanır.

$$z = j\omega L \quad \Omega/\text{m} \quad (23)$$

$$y = j\omega C \quad \text{S/m} \quad (24)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (25)$$

AC hatları normalde doğal yüklerinin iki katına kadar yüklenebilir zorunlu durumlarda ise doğal yükleme sınırının 2.8 katını aşmamalıdır (Kalair vd., 2016). Kayıpsız bir hatta dalga empedans yükü denklem (26) ile verilir. Karakteristik empedans değeri aynı zamanda bir hattın yüklenebilirlik değerini vermektedir.

$$SIL = \frac{U^2}{Z_c} = \frac{3.U_f^2}{Z_c} \quad (26)$$

Ayrıca herhangi bir AC hattın karakteristik empedans yüklemesi denklem (27)'deki ampirik formül ile de tahmin edilebilir (Kalair vd., 2016).

$$SIL(MW) = 0.0005 V(kV)^{2.2939} \quad (27)$$

DC iletim hatlarında ise durum AC hatlardan farklıdır. HVDC hatlar için güç aktarımında teknik limitlerden çok ekonomik limitler belirleyicidir (Manickam vd., 2018). DC hatlar, DC sistem tarafından sağlanan sabit güç sayesinde kararlılık bozulmadan dönüştürücü kontrolü ile hızlı bir şekilde güç değişimine adapte olduklarından termal limitlerine daha yakın seviyelerde çalıştırılabilmektedirler (Kim vd., 2009; Rahman & Khan, 2007).

İletim hatlarının tasarımında iletilen güç miktarı önemli bir parametre olarak değerlendirilir. AC iletkenler, iletken kesitinin yalnızca çevresini kullanırken DC iletkenler iletken kesitinin tamamını kullanabilmektedir. Bu nedenle aynı çaptaki DC iletkenler, AC iletkenlere kıyasla yaklaşık %30-%40 daha fazla elektrik enerjisi iletebilme kapasitesine sahiptir (Liu, 2014).

2.5. Yüksek Gerilim İletim Sistemlerinin Yapısal Bileşenleri

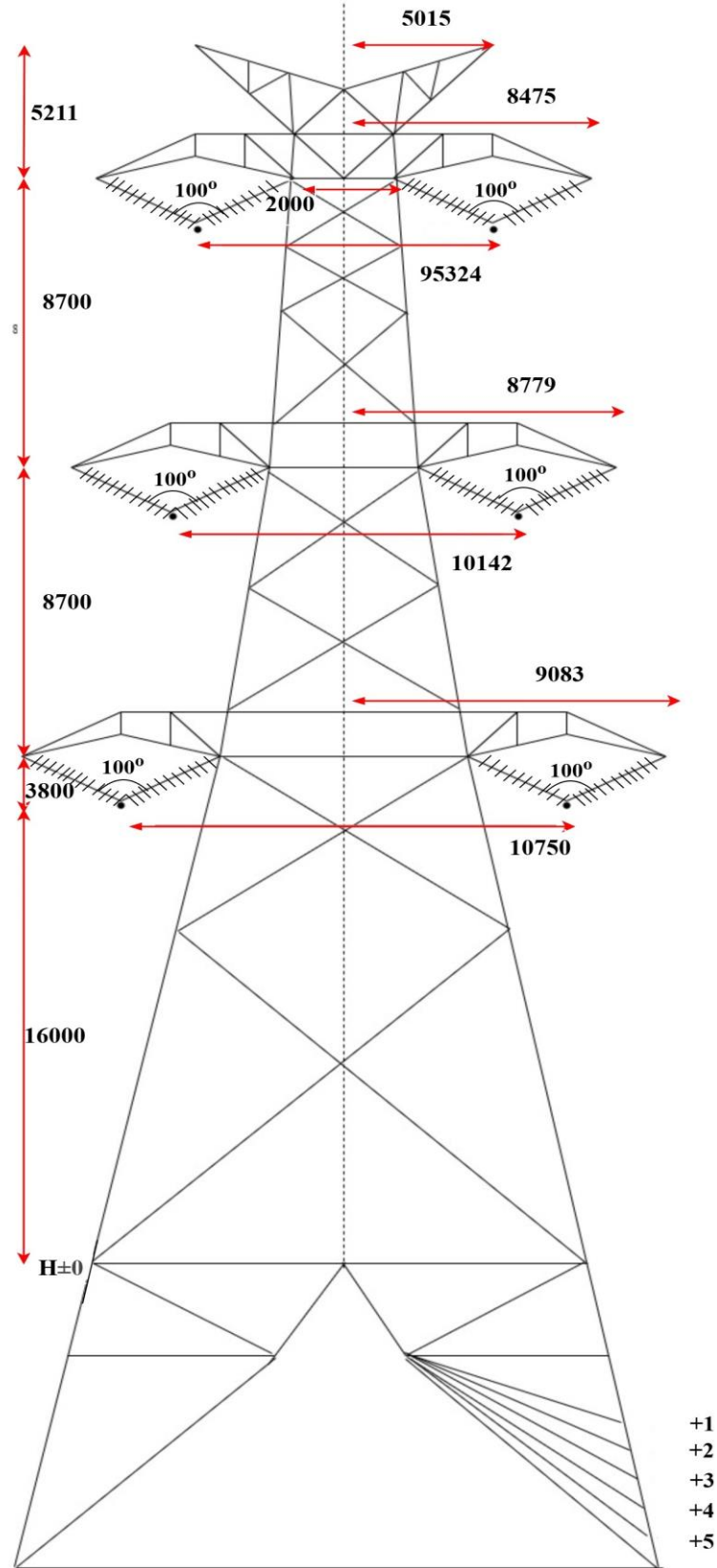
Enerji iletim hattı planlaması ve tesisi özellikle yüksek gerilimlerde teknik, ekonomik ve çevresel bakımdan belli kriterler gerektiren sistematik bir yapıdır. Çevresel değerlendirme kriterleri genellikle hattın geçtiği güzergâh üzerinde ÇED Yönetmeliği ve Mevzuata göre korunması gereken alanların varlığının hesaba katılması ile ilişkilidir. Ekonomik değerlendirme kriterleri mevcut arazi şartlarında optimum direk kullanılmasından, inşaa süresi ve malzeme maliyetlerinin azaltılmasına kadar geniş bir yelpazede seyreder. Teknik

kriterler ise elektrik iletim sisteminde kullanılan direkler, iletkenler, yalıtkanlar, ekipmanlar gibi tüm elemanların fiziksel yapıları, mekanik hesapları, standartlara uygunluğu gibi birçok belirlenmesi gereken parametreyi içerir. Hatların inşası elektrik iletim sisteminin güvenilirliğini ve verimliliğini korumak için çok önemlidir.

2.5.1. Yüksek Gerilim Direkleri

Yüksek gerilimde kullanılan direkler iletkenleri birbirlerinden uzak mesafede tutmaya yarayan ve iletkenleri destekleyen kafes yapılardır. Kullanım yerleri ve yapıldıkları malzemelere göre birçok direk çeşidi bulunmaktadır. Elektrik iletim direklerinin optimum tasarımı ile iletim hattının performansı artırılabilir. Türkiye’de 154 kV ve 400 kV gerilim seviyelerinde direkte kullanılan devre sayısına göre tek devreli ve çift devreli direkler kullanılmaktadır. Türkiye’de 400 kV çift devre direk yapılarında iletken kesitine göre 954 MCM Cardinal ve 1272 MCM Pheasant iletkenler kullanılıyor. 2PA, 2PB, 2PD, 2PE, 2PF direk çeşitlerinde 1272 MCM Pheasant iletkenler üçlü demet iletkenler olarak tercih ediliyor (Arı, 2011). Bu çalışmada dönüştürülmesi planlanan 2PA tip çift devre direğin ana hat ölçüleri Şekil 7’de santimetre cinsinden verilmiştir (Arı, 2011).

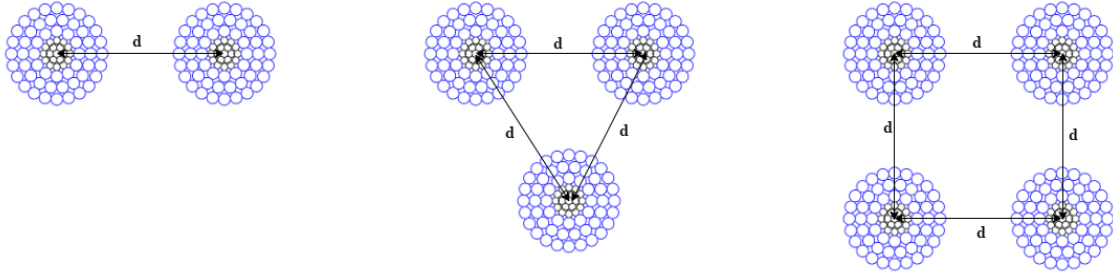
Bu tezde direklerin statik hesapları dikkate alınmamıştır. Çalışma kapsamında bu direğin tercih edilmesinin nedeni, zaten çift devre olarak işletilen bir yapıda tek devrenin bipolar DC’ye dönüştürülmesinin statik açıdan daha olası görülmesidir. Ancak, böyle bir dönüşümün uygulanabilirliği için statik hesaplamaların yapılması önem arz etmektedir.



Şekil 7. 400 kV 1272 MCM çift devre 2PA direğinin ana hat ölçülerinin gösterimi

2.5.2. Yüksek Gerilim İletkenleri

Direkler üzerinde bulunan iletkenlerin cinsi ve sayısı iletilecek güç miktarına göre iyi belirlenmelidir. İletkenlerin mekanik dayanımlarının da yüksek olması beklenir. İletkenlerin ayrıca hat boyunca aşırı sarkma meydana gelerek standart sınırları aşmasını diye yüksek erime noktasına sahip olması istenir. Yüksek gerilim iletim hatlarında genellikle çelik özlü alüminyum iletkenler (ACSR) kullanılmaktadır. ACSR iletkenler, ortasında çelik damarlar etrafında ise alüminyum damarlar olmak örgülü bir yapıya sahiptir. Yüksek gerilimde iletim kapasitesini arttırmak için her fazda birden fazla iletken kullanılması ile oluşan yapı demet iletken olarak adlandırılır. Şekil 8’de görüleceği üzere demeti oluşturan alt iletken sayısı iki ise ikili demet iletken (2B), demeti oluşturan alt iletken sayısı üç ise üçlü demet iletken (3B) olarak isimlendirilir.



Şekil 8. Sırasıyla 2B, 3B ve 4B demet iletkenlerin gösterimi

Demette, alt iletkenler arasında belli bir mesafe olması gerekmektedir. Bu mesafe spacer adı verilen bağlantı elemanı ile korunur. Bu boşluğun amacı rüzgâr etkisiyle iletkenlerin birbirine çarpmasının engellenmesidir.

Demet iletkenler kullanılarak endüktans ve korona kayıpları azaltılabilir ayrıca güç kapasitesi artırılabilir. Yüksek gerilimli çift devre direklerde kullanılan ACSR iletkenlerin karakteristikleri Tablo 3’te verilmiştir (TEİAŞ, 2005). 2PA direkte 2x3B 1272 MCM Pheasant iletkenler kullanılmaktadır.

Tablo 3. Çelik özlü alüminyum iletkenlerin karakteristikleri

İletken Kesiti (MCM) / İsmi		954/Cardinal	1272/Pheasant
Kesit (mm^2)	Alüminyum	484,53	645,08
	Çelik	62,81	81,71
	Toplam	547,34	726,79
Örgüdeki Alüminyum Telin	Adedi	54	54
	Çapı (mm)	3,38	3,90
Örgüdeki Çelik Telin	Adedi	7	19
	Çapı (mm)	3,38	2,34
Standart Çap(mm)	Komple İletken	30,42	35,10
	Çelik Nüve	10,14	11,70
Katman Sayısı		4	5
Anma Kopma Kuvveti (kgf)		15589	20357
Birim Ağırlık (kg/km)		1829	2423,5
Nihai Elastisite Modülü (kg/mm^2)		7000	6800
Ortalama Isıl Uzama Katsayısı		19,3	19,4

2.5.3. Yüksek Gerilim İzolatörleri

Koruma teli direğin tepesine izolatör olmadan klemp ile bağlanırken faz iletkenleri travers ve konsollara izolatörler yardımı ile bağlanırlar. İzolatörler iletkenleri ve iletkenlerdeki ek ağırlıkları (kar veya buz gibi) taşımaya yardımcı olurlar ve iletkenleri direktten izole ederler. İzolatörler mekanik ve elektriksel dayanım kriterlerine göre seçilirler. İzolatör iletkenin kesiti ile maksimum gerilmesinin 2.5 katına kadar kırılmadan dayanabilmelidir (Ay, 2017). Taşıyıcı tip direklerde ‘I’ ve ‘V’ askı tipi izolatörler tercih edilmektedir. 380 kV çift devre direkte iletkenler V askı tipi izolatörler ile bağlıdır. V askı açısı 2PA direk için 100° ’dir. 380 kV çift devre iletim hatlarında V askı takımında her fazda 2x22 tane izolatör bulunmaktadır (Arı, 2011).

2.6. Statik Termal Derecelendirme

İletim hatlarının kapasitesi genellikle termal derecelendirilme ile belirlenmektedir (Seppa, 1993). Statik termal derecelendirmeler hatların tasarlanmış termal veya mekanik sınırlarını aşmaması için elektrik akımının sınırlarının belirlenmesi sürecidir. Bazen, elektrik akımının ısıttığı iletken, rüzgâr ve ortam sıcaklığı tarafından soğuyabilir. Statik termal derecelendirme (STR) geleneksel yöntem olarak bilinir ve iletkenlerin bulunduğu fiziksel ortam şartlarına göre standartlaşır. Dinamik termal derecelendirme (DTR) ise hatların termal koşullarıyla ilgili sıcaklık ve rüzgâr hızı gibi gerçek zamanlı veriler sağlayarak hatların iletim kapasitesini artırmaya yardımcı olur. Bu, güç akışı darboğazlarını hafifletebilir ve elektrik sistemlerinin güvenilirliğini artırabilir (Lai & Teh, 2022).

STR ve DTR sistemleriyle, iletken ve ortam sıcaklığı dikkate alınarak güvenli kapasite artışları elde edilebilir. Ayrıca tüm açıklıklarda hat sarkması önlenir. Hatlar elektromanyetik alanlar yaydığından, hattın yerden yüksekliğini korumak, yüksek gerilim hatlarının yakınında yaşayan insanlar ve hayvanlar için daha güvenli bir ortam sağlayabilir. Hibrit bir sistemde, DC hattını etkili bir şekilde kullanmak, uzun mesafelerde daha düşük kayıplardan faydalanabilir ve böylece yoğun koridorlarda yeni hatlar kurmanın maliyetini ortadan kaldırabilir. Deri etkisinin olmaması nedeniyle (Foqha vd., 2023) de DC akımının AC akıma göre daha düşük ısıtma etkisine sahip olması avantajından yararlanılabilir.

Önerilen hibrit yapı hem AC hem de DC devreleri içermektedir. Havai iletkenlerin termal değerlerinin hesaplanmasında, IEEE-738 (IEEE, 2007) ve CIGRE-207 (CIGRE, 1992) tarafından belirlenen standartlar kullanılmaktadır. IEEE ve CIGRE standartları termodinamiğin ilk yasasına dayanır. Isının korunumuna dayanan bu yasa iletkenin ısı dengesinin korunduğunu savunur ve bu denge denklem (28)'deki gibi ifade edilir (CIGRE TB 601, 2014).

$$\text{Alınan ısı } (P_j + P_s) = \text{Verilen ısı } (P_c + P_r) \quad (28)$$

İletkende ısı depolanmaz ve iletken termal olarak dengededir. İletkenden geçen akım sebebiyle oluşan ısı (P_j) ve güneş nedeniyle oluşan ısının (P_s) toplamı, rüzgâr (P_c) ve ışıınım (P_r) yoluyla salınan ısıya eşittir.

- Joule Isınma:

Joule ısınması akan akım sebebiyle üretilen enerjiyi ifade eder. CIGRE homojen iletkenler ve ACSR iletkenler için joule ısınmasını hesaplamak için iki ayrı formül kullanır. ACSR iletkenlerinin joule ısınması aşağıdaki denklem (29)'daki gibi hesaplanır (CIGRE TB 601, 2014).

$$P_j = I_{dc}^2 R_{dc} [1 + \alpha_k (T_{av} - 20)] \quad (29)$$

Burada;

I_{dc} : doğru akım

R_{dc} : birim uzunluk başına doğru akım direnci

α_k : kelvin başına direnç sıcaklık katsayısı

T_{av} : iletkenin ortalama sıcaklığını temsil etmektedir.

Belli bir sıcaklığa ulaşılmasına neden olacak DC akımı denklem (29)'daki gibi hesaplandıktan sonra aynı sıcaklığa eşdeğer gelen AC akımı (I_{ac}) denklem (30)'daki gibi hesaplanır.

$$I_{ac} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{1.0123 + 2.319 \times 10^{-5} I_{dc}}} \quad (30)$$

- Solar Isınma:

Solar ısınmada iki adet yaklaşım vardır. Yaklaşımlardan ilki ısınmanın doğrudan radyasyon, yansıyan radyasyon ve etkisiz radyasyon olmak üzere üç bileşeni olduğunu varsayar. Bu yaklaşım daha karmaşık denklemler içerir. Ancak, pratikte, bu yaklaşım uzun mesafelerde uygulanabilir değildir. Bu nedenle, ikinci yaklaşım yalnızca küresel güneş radyasyonunu dikkate alır ve denklem (31)'deki gibi hesaplanır (CIGRE TB 601, 2014).

$$P_s = \alpha_s S D \quad (31)$$

Burada;

P_s : solar ısınma şiddeti

α_s : iletken yüzey soğurma katsayısı

S : küresel güneş radyasyonu

D : iletkenin dış çapını temsil etmektedir.

- Konvektif Soğuma:

İletken ısındığında bitişigindeki havayı ısıtır. Isının havanın yoğunluğu azalacağı için daha soğuk hava, ısınan havanın yerini alacaktır. Bu da iletkeni soğutacaktır. Konvektif soğuma denklem (32)-(35) ile belirlenir (CIGRE TB 601, 2014).

$$P_c = \pi k_f (T_c - T_a) Nu \quad (32)$$

$$k_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7.2 \times 10^{-5} T_f \quad (33)$$

$$T_f = (T_c + T_a) / 2 \quad (34)$$

$$Nu = 0.641 \left(\frac{\rho V D}{V_f} \right)^{0.471} \quad (35)$$

Burada;

P_c : konvektif soğuma şiddeti

k_f : havanın termal iletkenliği

T_c : iletken sıcaklığı

T_a : ortam sıcaklığı

Nu : Nusselt katsayısı

T_f : havanın, iletken yüzeyine temas ettiği noktadaki sıcaklığı temsil etmektedir.

- Radyatif Soğuma:

Belirli dalga boylarındaki elektromanyetik radyasyonun yayılmasıyla cismin ısıyı dağıtmasına ve sıcaklığının düşmesine olanak sağlanır. Bu doğal süreç radyatif soğuma olarak isimlendirilir ve denklem (36) yardımıyla bulunur (CIGRE TB 601, 2014).

$$P_r = \pi D \varepsilon \sigma_B \left[(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (36)$$

Burada;

P_r : radyatif soğuma şiddeti

D : iletkenin dış çapı

T_c : iletken sıcaklığı

T_a : ortam sıcaklığı

σ_B : Stefan-Boltzmann sabitini temsil etmektedir.

Isınma ve soğuma elemanlarının hesaplamalarına göre bir ACSR iletken denklem (37) ile termal derecelendirilir.

$$I_{dc} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R_{dc} [1 + \alpha_k (T_{av} - 20)]}} \quad (37)$$

AC ve DC hattın akım statik termal dereceleri belirlenirken ACSR iletkenlerin çalışma koşulları Tablo 4'teki (TEİAŞ, 2005) gibi belirlenmiştir.

Tablo 4. ACSR iletkenlerin çalışma koşulları

En yüksek sıcaklık (°C)	+45
En düşük sıcaklık (°C)	-40
24 saatlik ortalama sıcaklık(°C)	+35
1 yıllık ortalama sıcaklık(°C)	+25
Hava kirliliği	Ağır
Rüzgâr basıncı (kg/m ²)	53-68
Solar radyasyon (W/ m ²)	1000
Rakım (m)	1000
20°'de DC direnç (Ω/km)	0.0443
Rüzgâr açısı	90°
25°'de AC direnç (Ω/km)	0.0467
75°'de AC direnç (Ω/km)	0.0568
Güneş radyasyonu emicilik katsayısı	0.5
Siyah gövdeye göre yayınlılık katsayısı	0.6

İletkenlerin akım taşıma kapasitelerini hesaplarken TEİAŞ çevre şartlarını yaz, bahar/sonbahar ve termik olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırır. Sınıflandırmada kullanılan parametreler Tablo 5'te gösterilmektedir (TEİAŞ, 2005).

Tablo 5. TEİAŞ'ın çevre şartları ve iletkenlerin kapasiteleri

	İletken Sıcaklığı (°C)	Hava Sıcaklığı (°C)	Rüzgâr Hızı(m/s)	Kapasite (MVA)
Yaz	80	40	0.1	1524
Bahar	80	25	0.5	2480
Termik	80	40	0.25	1825

1272 MCM Pheasant iletkenin nominal termik kapasitesi iletken sıcaklığı 80°, hava sıcaklığı 40° ve rüzgâr hızı 0,25 m/s için 925 A akım taşıma kapasitesi vardır. İletkenin DC akım taşıma kapasitesi termik çevre sıcaklıklarına ve 2 m/s rüzgâr hızı için CIGRE-207'ye göre hesaplanmıştır. Tablo 5'e göre solar ısınma denklem (38) ile hesaplanmıştır.

$$P_s = 0.5 \times 1000 \times 35.1 \times 10^{-3} = 17.55 \text{ w/m} \quad (38)$$

Konvektif soğuması ise denklem (39)-(44) ile hesaplanmıştır.

$$T_f = (80 + 40)/2 = 60^\circ\text{C} \quad (39)$$

$$k_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7.2 \times 10^{-5} \times 60 = 0.02852 \quad (40)$$

$$v_f = 1.32 \times 10^{-5} + 9.5 \times 10^{-8} T_f = 1.89 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (41)$$

$$\rho = \exp(-1.16 \times 10^{-4} \times 1000) = 0.89 \quad (42)$$

$$Nu = 0.641 \left(\frac{0.89 \times 2 \times 0.035}{1.89 \times 10^{-5}} \right)^{0.471} = 29.1 \quad (43)$$

$$P_c = 3.14 \times 0.02798 \times (80 - 40) \times 29.1 = 102.27 \text{ w/m} \quad (44)$$

Radyatif soğuması ise denklem (45) ile hesaplanmıştır.

$$P_r = 3.14 \times 0.035 \times 0.5 \times 5.67 \times 10^{-8} [(80 + 273)^4 - (40 + 273)^4] \\ P_r = 18.47 \text{ w/m} \quad (45)$$

İletken termal dengede olacağı için Joule ısınması denklem (46) ile 103.19 w/m olarak bulunur.

$$P_j + 17.55 = 102.27 + 18.47 \quad (46)$$

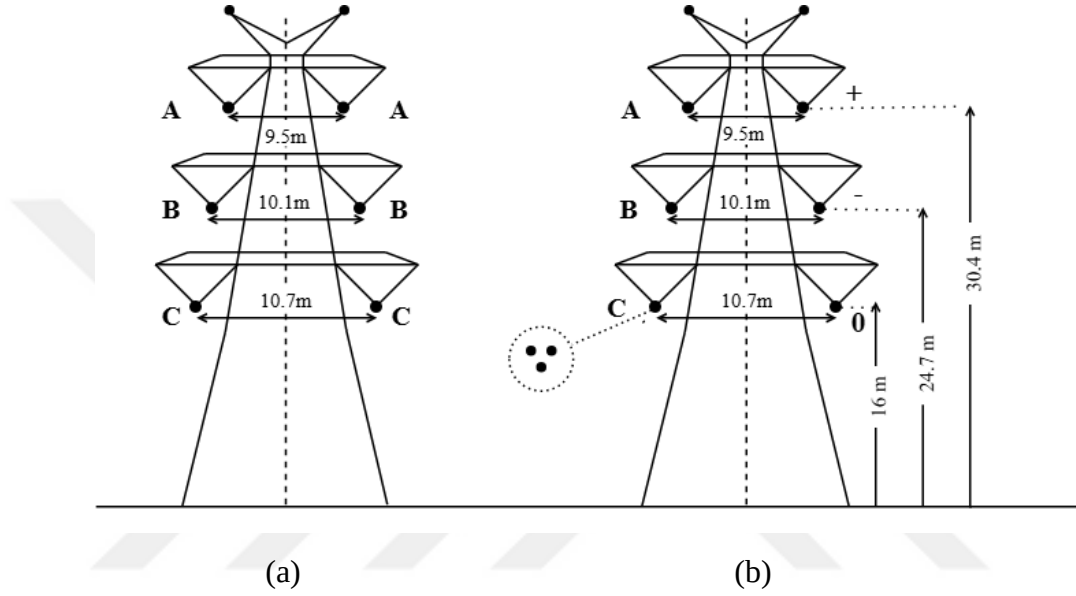
Isınma ve soğuma elemanlarının hesaplamalarına göre iletkenin DC akımının termal derecesi aşağıdaki denklem (47) ile hesaplanır.

$$I_{dc} = \sqrt{\frac{P_c + P_r - P_s}{R_{dc}[1 + \alpha_k(T_{av} - 20)]}} = \sqrt{\frac{102.27 + 18.47 - 17.55}{4.43 \times 10^{-5}}} = 1526 \text{ A} \quad (47)$$

Bir havai iletim hattının gerçek akım taşıma kapasitesi, hava koşullarına bağlı değişkenlik gösterdiği için çoğu zaman sabit bir parametre olarak ele alınır (Malyszko vd., 2009). Bu nedenle, bir havai iletim hattının makul bir statik amper kapasitesi derecesine göre işletilmesi ve planlanması hem iletim varlığının yetersiz kullanımına hem de zaman zaman güvenli iletken-toprak boşluklarını ihlal etme olasılığına yol açmaktadır (Margita vd., 2024).

3. VAKA İNCELEMESİ

Bu çalışmada güç iletim kapasitesini artırmak amacıyla, Şekil 9’da gösterilen 400 kV çift devre 2PA tipi HVAC iletim direğinin hibrit HVAC-HVDC yapısına dönüştürülmesinin fizibilitesi incelenecektir. Mevcut çift devreli direğin iletim kapasitesini arttırmak için tek devresi HVDC olarak işletilecektir.



Şekil 9. Mevcut direk yapısı (a) ve hibrit direk yapısı (b)

AC devre normal çalışma koşullarında 400 kV, DC devre ± 500 kV seviyesinde işletilecektir. Bipolar HVDC iletim hatları iki ayrı kutup iletkeni içerir. Her kutup, üç alt iletkenlerden oluşan bir demet kullanacak şekilde tasarlanmıştır. HVDC sistemde bir arıza meydana geldiğinde veya dönüştürücü tesislerinde kısmi bir kesinti meydana geldiğinde, hat tek kutuplu modda çalıştırılabilir. HVDC iletim hatlarında da sıklıkla AAAC (Tam alüminyum alaşımlı iletkenler) ve ACSR iletkenler tercih edilmektedir. Çalışmada hem AC hem de DC devrede 1272 MCM kesite sahip Pheasant ACSR iletkenler kullanılacaktır. Her iki devrede de fazlar ve kutuplar üç alt iletkenlerden oluşmaktadır.

3.1. Hibrit Yapının Elektromanyetik Alan Değerleri

Yüksek gerilimli iletim hatlarının yer seviyesinde oluşturduğu elektromanyetik alanlar, çevreye etkisinin minimum olması için titizlikle analiz edilmelidir (Moura vd., 2022). Faz iletkenleri zamana bağlı elektriksel potansiyele sahiptir ve aynı şekilde zamana bağlı akım taşımaktadırlar. Manyetik alanın kaynağı faz iletkenlerinin akımı iken elektrik alanının kaynağı faz iletkenlerinin gerilimidir. Elektromanyetik alanı hesaplamak için yüksek gerilimli iletim hatlarının fiziksel modelini yansıtan matematiksel teknikler gereklidir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), elektromanyetik analizde kullanılan sayısal bir yöntemdir. SEY temelli çalışan birçok ücretli (Comsol, Ansys, Flux, QuickField) ve ücretsiz (FEMM, Multiphysics-NM SESES, AGROS2D) yazılım bulunmaktadır (Gutierrez vd., 2017).

FEMM (Finite Element Method Magnetics), SEY tabanlı ücretsiz bir yazılımdır. Doğrusal ve doğrusal olmayan manyetik, statik, elektrostatik ve termal problemleri çözmede etkili bir simülasyon yazılımıdır. Mekanik analiz yapmamaktadır. Fiziksel özellikler için sayı/formül girme olanağı ve kendi kütüphanesi vardır. İçe/dışa aktarma özelliği bulunmamaktadır (Gutierrez vd., 2017). Sonlu elemanlar yönteminin yaklaşımı enerji denklemlerini minimize etmektir. SEY ile ilgilenilen bölge geometrik olarak küçük ve basit şekilli üçgen bölgelere ayrılır. Minimize edilen her parçanın özellikleri tanımlandıktan sonra düğüm noktalarından birbirine bağlanılarak denklem sistemi oluşturulur. Her elemanın potansiyel dağılımı bir polinom ile yaklaşık olarak hesap edilir. Alan denklemleri doğrudan çözülmek yerine tüm modelin potansiyel dağılımı minimum potansiyel enerji ilkesi kullanılarak bulunur (Hameyer vd., 1995). Oluşturulan denklem sistemi, bilinen değerlerden yola çıkarak bilinmeyenleri elde ederek çözülür. Problemi SEY ile çözmek için aşağıdaki adımlar takip edilir (Kumru vd., 2015).

- Geometri, materyaller ve sınır koşulları tanımlanır.
- Meshing (Çözüm ağı oluşturulur).
- Tüm elemanların denklemleri yazılır.
- Çözüm domeninde tüm elemanlar birleştirilir.
- Gerekli denklemler çözülür.

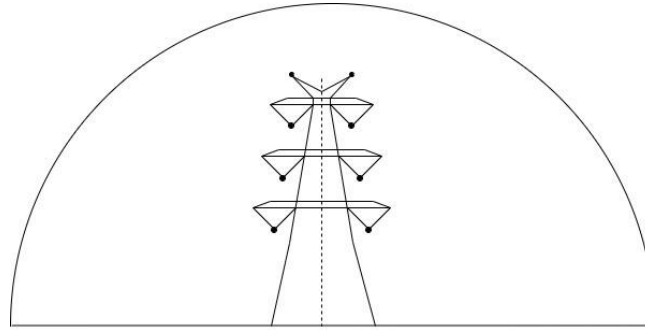
SEY problem geometrisine bağlı olduğundan dolayı bir, iki, üç ve çok boyutlu elemanlar tanımlanarak analiz yapılabilmektedir. Elektrik alan analizleri genellikle iki ve üç

boyutlu geometriler üzerinde incelenmektedir. Lineer üçgen elemanlar için kabul edilebilir minimum açı aralığı 30-60 derece, maksimum açı aralığı ise 60-90 derecedir (Çanakoğlu, 2004). Bölgenin sınırlarında verilen değerlere sınır koşulları denir. Üç tip sınır koşulu bulunmaktadır (Kutucu & Kalenderli, 2007).

1. Dirichlet Sınır Koşulu: Sınırlarda fonksiyon değerinin belli olma koşuludur. Dirichlet, dairesel sınır boyunca sabit potansiyel uygulandığında alanın belli bir mesafede sıfır olmaya zorlanacağını söyler.
2. Neuman Sınır Koşulu: Sınırlarda fonksiyonun türevinin tanımlı ve belli olma koşuludur.
3. Robbins Sınır Koşulu: Sınırlarda fonksiyonun kendisinin ve türevinin belli olma koşuludur.

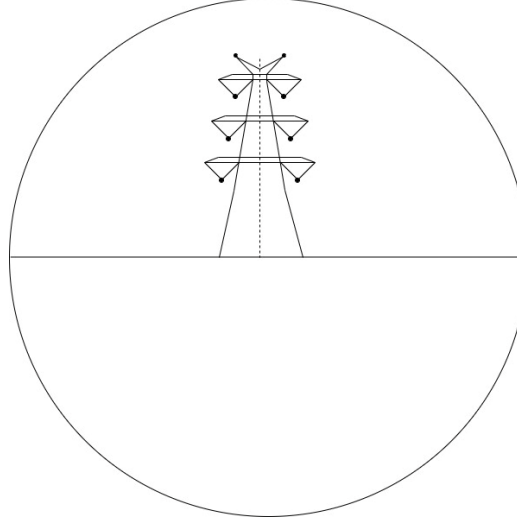
Sınır koşulları bazen mixed açık sınır modeli olarak da modellenebilir. İletim hattı modellenirken problem büyük bir düz iletken zemin düzleminin üzerinde küçük çaplı iletkenler olarak tanımlanır.

Yüksek gerilim iletim hattı modelinde bir sonlu elemanın en büyük boyutunun en küçük boyutuna oranı yaklaşık 10.000'dir. Elektrik alanı hesaplamak için gereken açık sınır modeli Şekil 10'da ve manyetik alanı hesaplamak için gereken açık sınır modeli Şekil 11'de gösterilmiştir (Hameyer vd., 1995).



Şekil 10. Elektrik alan hesaplamak için açık sınır modeli

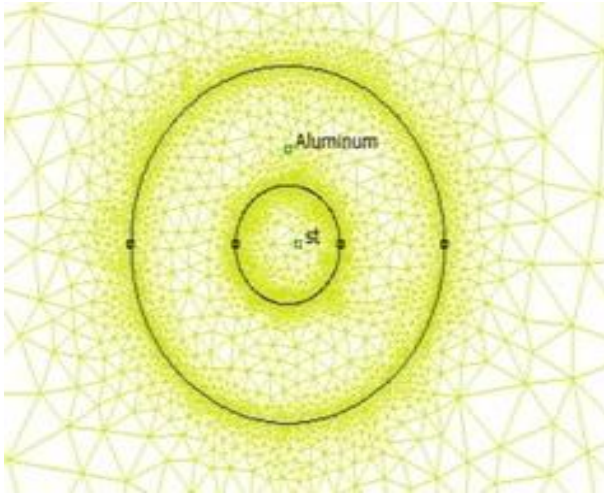
Modelin dairesel sınırının yarıçapı yaklaşık 100 m iken iletkenlerin yarıçapı santimetre ile ifade edilebilir. Elektrik alan şiddeti hesaplanırken iletim hattının altındaki toprak eş potansiyel yüzey kabul edilir. Bunun aksine manyetik alan hesaplama modelinde zemin, onu çevreleyen hava ile aynı özelliklere sahiptir bu yüzden Şekil 11'deki gibi modellenir (Hameyer vd., 1995).



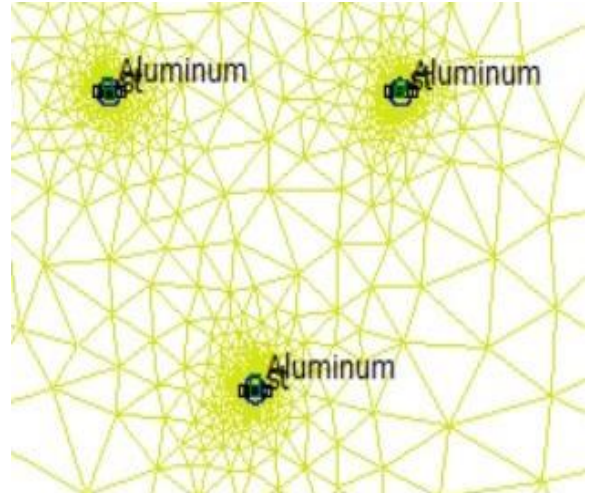
Şekil 11. Manyetik alan hesaplamak için açık sınır modeli

Türkiye elektrik iletim sisteminde kullanılan çift devre direk tipi için modeller FEMM 4.2 üzerinde oluşturulmuştur. Bu modeller oluşturulurken frekans 50 Hz ve minimum açı 30 derece olarak seçildi. Orta iletken sıfır noktası olmak üzere modelin dairesel sınırı ± 100 m olarak çizilmiştir.

Her bir iletken, çelik özlü alüminyum iletkenin çap bilgileri kılavuzluğunda havanın ve iletkenlerin, elektriksel iletkenlik katsayıları, bağlı manyetik geçirgenlikleri gibi değerler göz ardı edilmeden Şekil 12'deki gibi modellenmiştir.



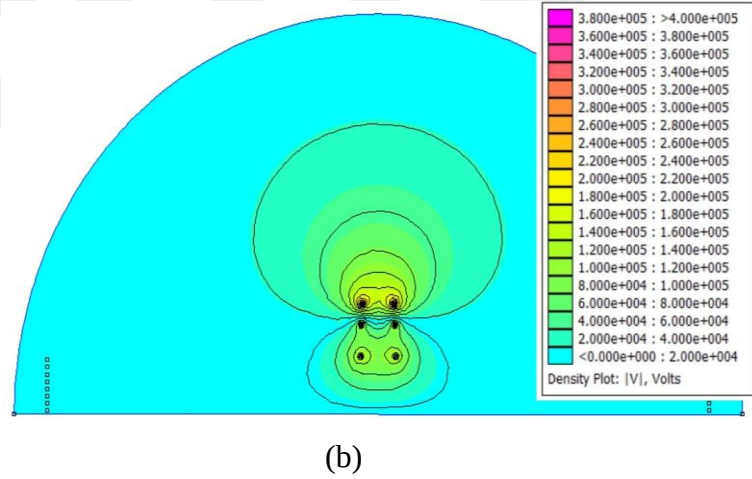
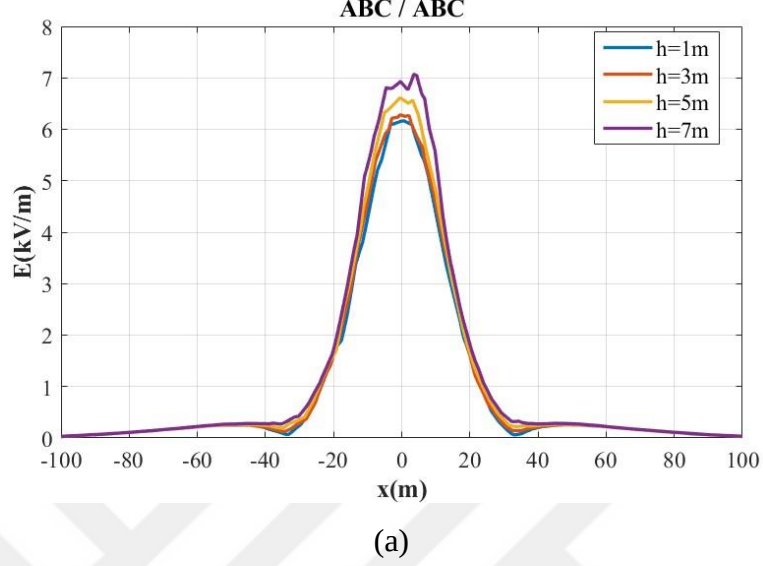
(a)



(b)

Şekil 12. FEMM'de oluşturulan, (a) bir adet çelik özlü alüminyum iletken modeli, (b) bir adet demet iletken modeli gösterimi

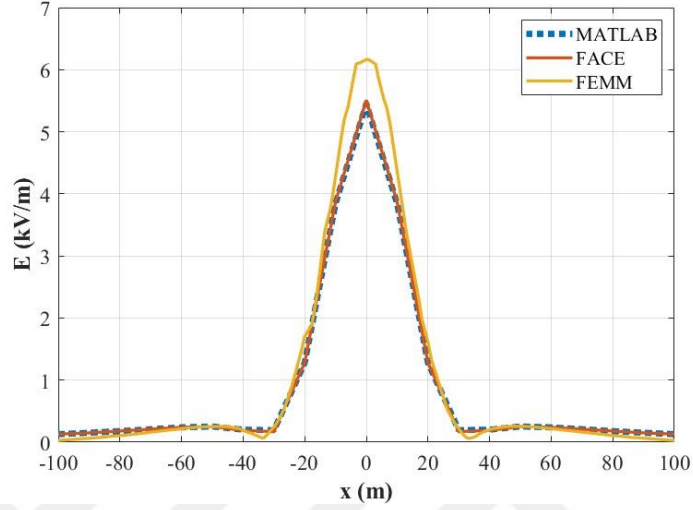
400 kV 3B çift devre direk mevcut ABC-ABC faz yerleşimi ile modellendiğinde yerden farklı yükseklikte oluşan elektrik alan değerleri Şekil 13(a)'da ve eş potansiyel eğrileri Şekil 13(b)'de gösterilmektedir.



Şekil 13. ABC-ABC faz yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı

Elektrik alan değeri Şekil 13(a)'da görüleceği üzere tüm yüksekliklerde hattın hemen altında en yüksek değerine ulaşırken hattan uzaklaştıkça değeri azalmaktadır. Yerden 1m yüksekte hattın merkezinde oluşacak elektrik alan değeri 6.1 kV/m olmakla birlikte ICNIRP sınır değerini 20 % aşmaktadır. Elektrik alana dik olan eş potansiyel eğriler Şekil 13(b)'de görüleceği üzere yüklerin etrafında yoğunlaşan dairesel halkalar ile şeklindedir. Eş potansiyel eğriler yükün etrafında daha yoğun iken, yükten uzaklaştıkça seyrekleşmektedir. Eş potansiyel eğrileri uzaklaştıkça elektrik alanın şiddeti azalmaktadır.

Yerden 1 m yükseklikte mevcut çift devre direğin elektrik alanı Şekil 14'te FEMM, MATLAB ve FACE yazılımları için karşılaştırılmıştır. Farklı yöntemlerle elde edilen elektrik alan dağılım eğrileri birbirleri ile benzerlik gösterirken, elektrik alanın şiddeti merkezde ($x=0$) MATLAB ile FACE için 5.5 kV/m ve FEMM için 6.1 kV/m olmaktadır.



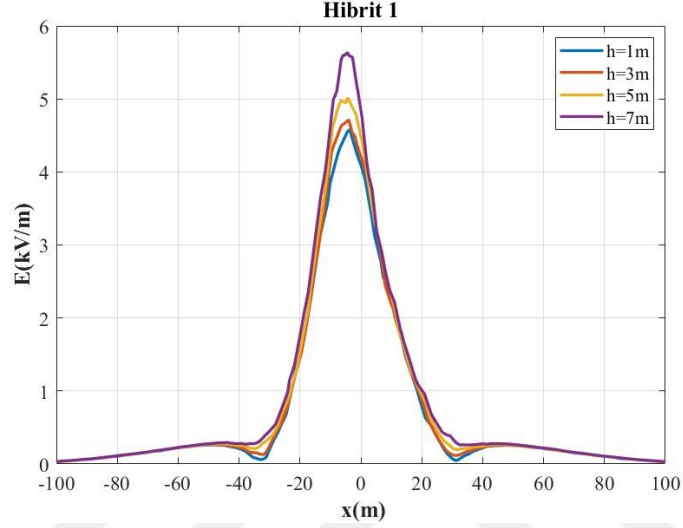
Şekil 14. ABC-ABC faz yerleşimli mevcut direğin 1 m yükseklikte oluşturduğu elektrik alanının karşılaştırılması

Direğin sol tarafı ABC faz yerleşimli 400 kV AC seviyesinde işletilirken sağ tarafının DC bipolar ± 500 kV gerilim seviyesinde işletilmesi durumunda elektrik alanının nasıl değişeceği hakkında çalışmalar yapıldı. Bipolar HVDC iletim hattı, biri toprağa göre pozitif polariteli, diğeri toprağa göre negatif polariteli iki kutuptan oluşmaktadır. Ayrıca herhangi bir kutupta problem olması durumunda sistemin monopolar çalışmasına olanak sağlayan ve '0' ile temsil edilen nötr iletkeni bulunmaktadır. Bipolar HVDC devre iletkenlerinin toprağa olan mesafesine bağlı olarak değişen, dört farklı kutup yerleşimine göre oluşturulan konfigürasyonlar Tablo 6'da gösterilmektedir.

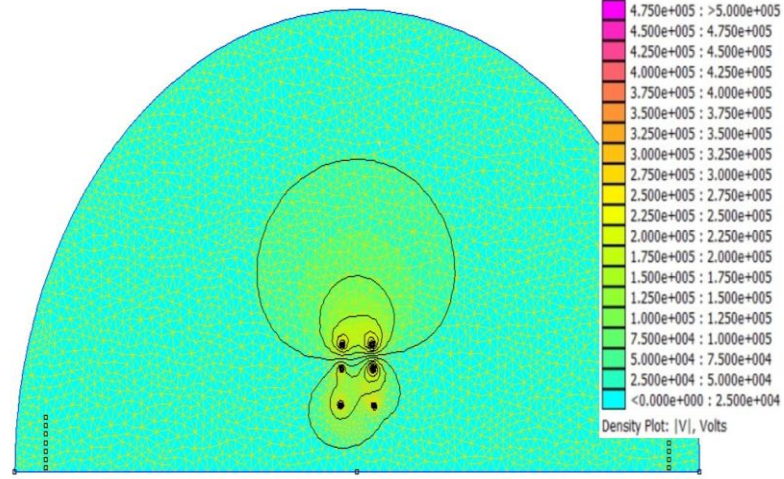
Tablo 6. Farklı hibrit yapı konfigürasyon tipleri

Mevcut			Hibrit 1			Hibrit 2			Hibrit 3			Hibrit 4		
A		A	A		+	A		-	A		+	A		-
B		B	B		-	B		+	B		0	B		0
C		C	C		0	C		0	C		-	C		+

Direk, hibrit 1 faz-kutup yerleşimi ile modellendiğinde yerden farklı yükseklikte oluşan elektrik alan değerleri Şekil 15(a)'da ve eş potansiyel eğrileri Şekil 15(b)'de gösterilmektedir. Hibrit 1 konfigürasyonunda pozitif kutup topraktan en uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Yerden 1 m yüksekte mevcut konfigürasyonda elektrik alanının değeri 6.1 kV/m iken, hibrit 1 konfigürasyonunda 4.5 kV/m'ye düşmüş ve böylece ICNIRP sınır değerinin altında kalmıştır.



(a)

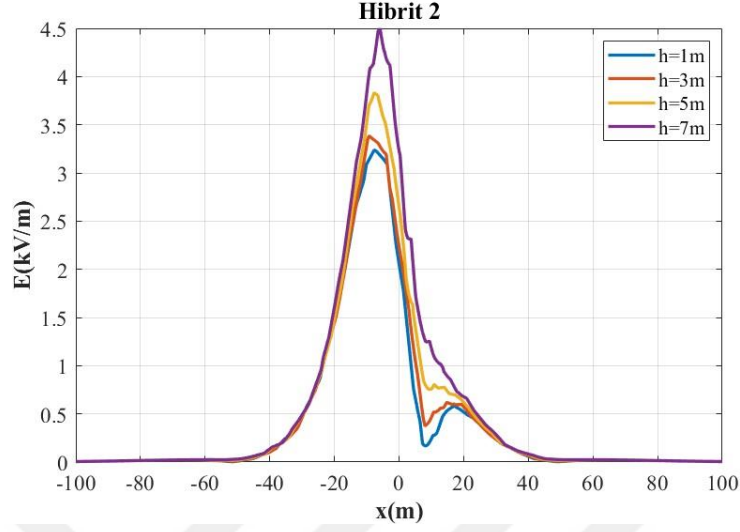


(b)

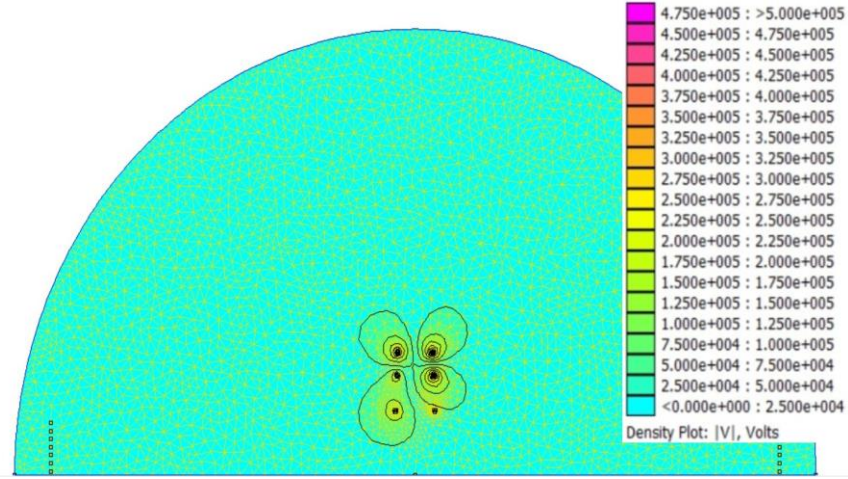
Şekil 15. Hibrit 1 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı

Direk, hibrit 2 faz-kutup yerleşimi ile modellendiğinde yerden farklı yükseklikte oluşan elektrik alan değerleri Şekil 16(a)'da ve eş potansiyel eğrileri Şekil 16(b)'de

gösterilmektedir. Hibrit 2 konfigürasyonunda negatif kutup zeminden en uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir.



(a)



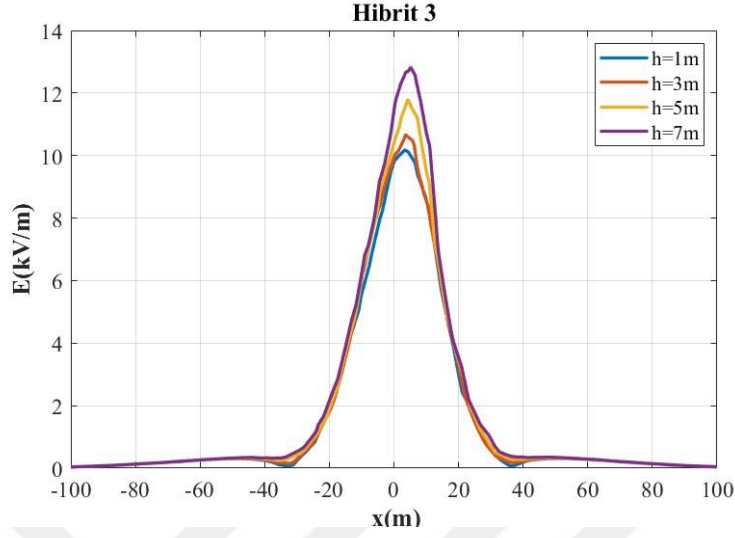
(b)

Şekil 16. Hibrit 2 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı

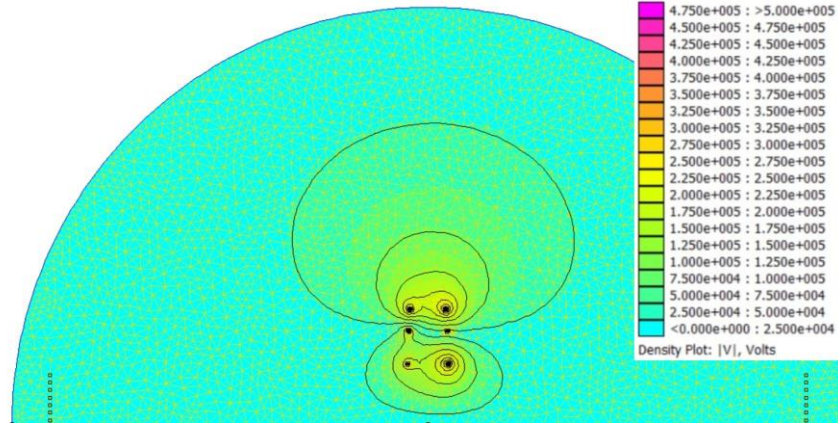
Yerden 1 m yüksekte oluşan elektrik alan hibrit 2 konfigürasyonunda, hibrit 1 konfigürasyonuna göre daha fazla azalarak 3.2 kV/m'ye düşmüştür. Ayrıca direğin farklı devreler ile işletiminden ötürü merkezdeki elektrik alan değişimindeki asimetrik dağılım belirginleşmiştir. Yük dağılımlarına bağlı olarak eş potansiyel eğrileri de değişmektedir.

Direk hibrit 3 faz-kutup yerleşimi ile modellendiğinde yerden farklı yükseklikte oluşan elektrik alan değerleri Şekil 17(a)'da ve eş potansiyel eğrileri Şekil 17(b)'de

gösterilmektedir. Hibrit 3 konfigürasyonunda pozitif kutup zeminden en uzak, negatif kutup ise zemine en yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır.



(a)

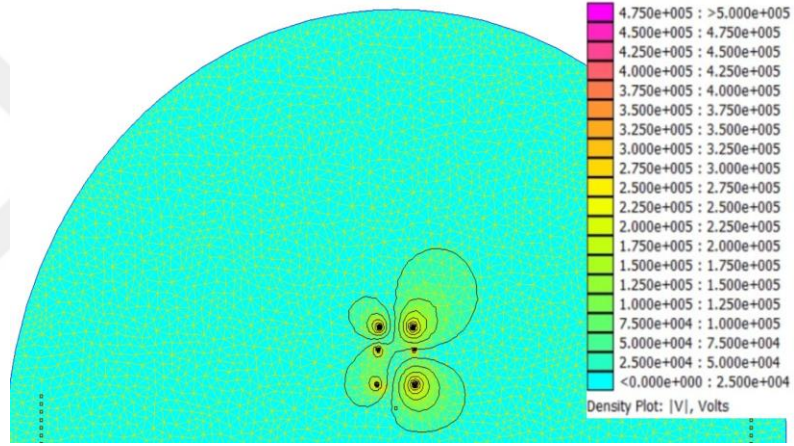
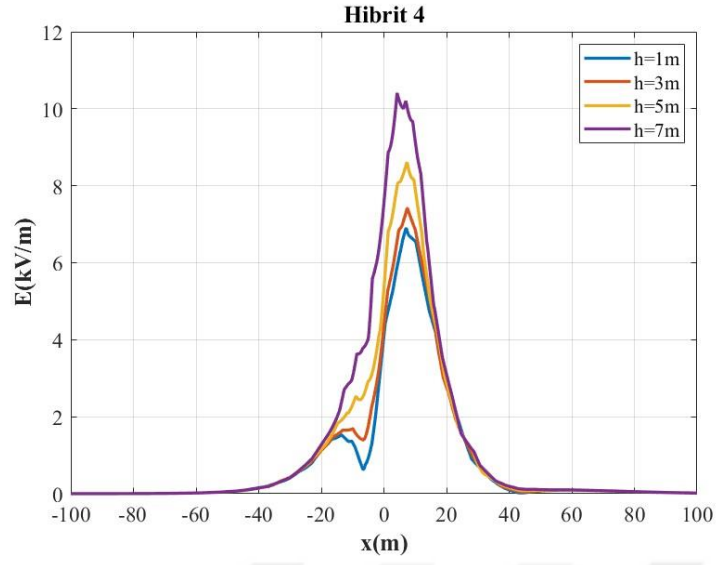


(b)

Şekil 17. Hibrit 3 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı

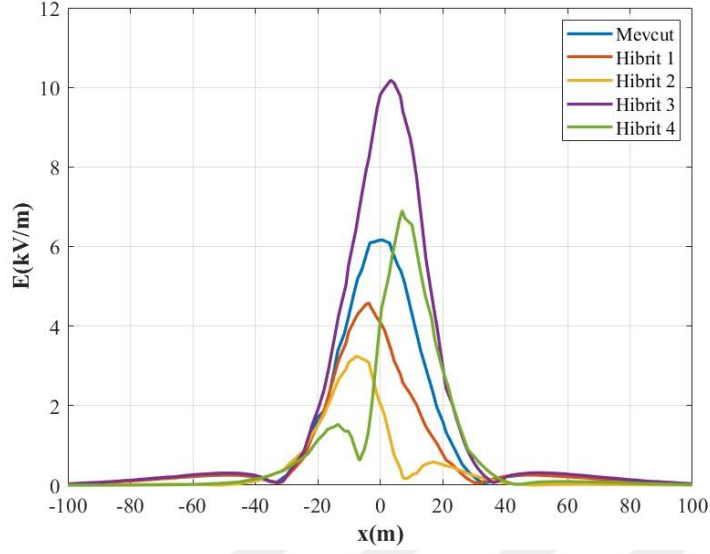
Hibrit 3 konfigürasyonunda elektrik alanın, mevcut konfigürasyondan da daha yüksek seviyelerde olduğu gözlenmektedir. Negatif kutbun toprağa en yakın seviyede konumlandırılması zeminde oluşan elektrik alan miktarını artırarak ICNIRP tarafından belirlenen sınır değerlerini aşmasına sebebiyet vermiştir.

Direk hibrit 4 faz-kutup yerleşimi ile modellendiğinde yerden farklı yükseklikte oluşan elektrik alan değerleri Şekil 18(a)'da ve eş potansiyel eğrileri Şekil 18(b)'de gösterilmektedir. Hibrit 4 konfigürasyonunda, negatif kutup zeminden en uzak, pozitif kutup ise zemine en yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır.



Şekil 18. Hibrit 4 faz-kutup yerleşimli konfigürasyon için: (a) farklı yüksekliklerde oluşan elektrik alan dağılımı, (b) eş potansiyel eğrilerinin dağılımı

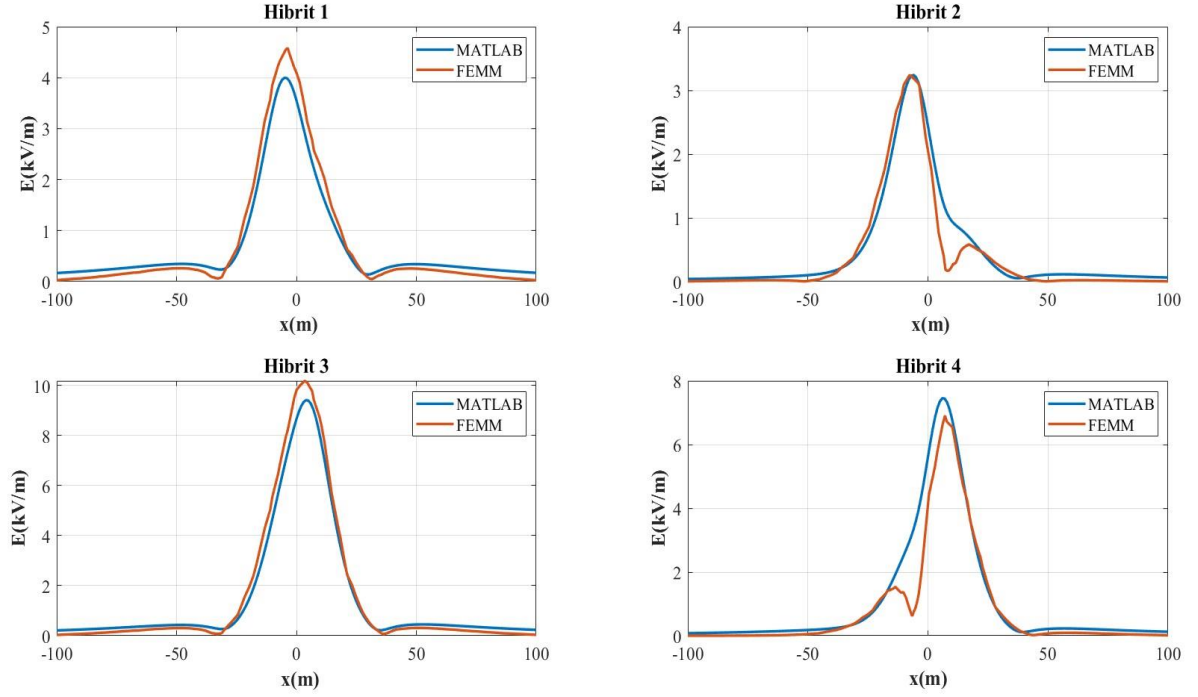
Tüm konfigürasyonların yerden 1 m yükseklikte oluşturacağı elektrik alan değerleri Şekil 19’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 19’da görüldüğü üzere direk üzerinde faz iletkenleri ile kutup iletkenlerinin yerleşimlerinin zeminde oluşacak elektrik alana etkisi önemlidir.



Şekil 19. Tm konfigürasyonların yerden 1 m yüksekte oluşturduğu elektrik alan dağılımı

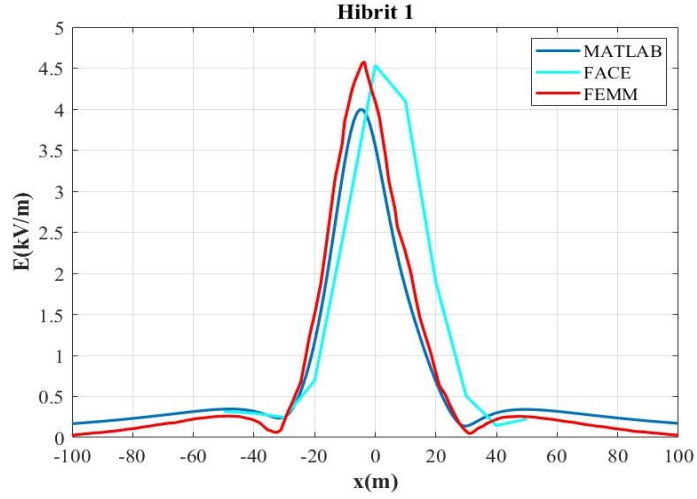
Dönüştürülmesi planlanan direkte iletkenler hibrit 3 ve hibrit 4 konfigürasyonlarına göre yerleştirilirse oluşacak maksimum elektrik alan şiddeti mevcut alan şiddetini sırasıyla 81%, 11% aştığı, hibrit 1 ve hibrit 2 konfigürasyonlarına göre yerleştirilirse oluşacak maksimum elektrik alan şiddeti sırasıyla 26%, 47% azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, AC devrenin faz sırası aynı bırakılarak farklı DC kutup konfigürasyonları için elektrik alan değerinin azaltılabileceğini göstermektedir. Elde edilen bulgular literatürde Mohamed ve arkadaşları (2021) tarafından yapılan çalışma ile paralellik göstermektedir. Mohamed ve arkadaşları (2021), Mısır şebekesinde 500 kV AC çift devre direk yapısının tek devresinin ± 500 kV DC olarak işletilmesi durumunda elektrik alanının maksimum değerinin yaklaşık 17,11% azaltılabileceğinin ifade etmişlerdir.

Hibrit sistem tasarlanırken faz-kutup yerleşimi, elektrik alan dağılımını doğrudan etkilediği için ICNIRP tarafından belirlenen sınır değerini aşmaması için dikkatli bir şekilde belirlenmelidir. Aynı hesaplamalar MATLAB üzerinde de yapılarak FEMM 4.2’de bulunan sonuçlar ile Şekil 20’deki gibi kıyaslanmıştır.



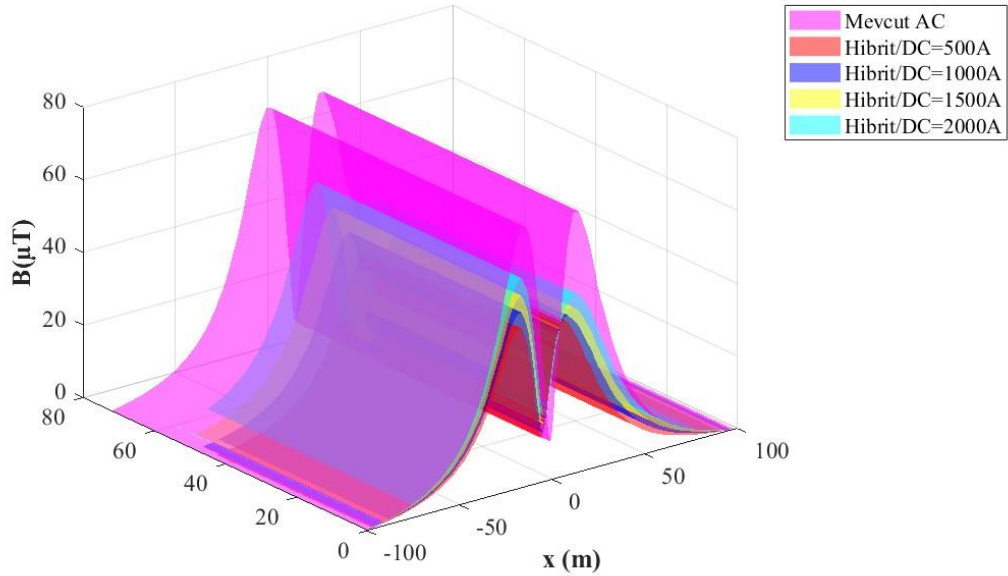
Şekil 20. Hibrit 1, hibrit 2, hibrit 3 ve hibrit 4 konfigürasyonlarının elektrik alan dağılımının MATLAB ve FEMM’de karşılaştırılması

Şekil 20’den görüldüğü üzere hibrit 3 ve hibrit 4 konfigürasyonlarında olduğu gibi pozitif veya negatif kutbun toprağa olan mesafesi azaldıkça hattın merkezinde oluşacak elektrik alan değerinde artış meydana gelmektedir. Elektrik alan dağılımları tüm konfigürasyonlar için benzerlikler göstermektedir. Ama modellemedeki yaklaşımlar ve varsayımlar sonuçlarda bazı sapmalar doğurabilmektedir. Hibrit 1 konfigürasyonu için MATLAB, FACE ve FEMM üzerinde yapılan kıyaslamalarda bu sapmalar Şekil 21’deki gibi daha net görülmektedir. Ortaya çıkan farklılıklar geometrik karmaşıklıklar, yakınsama ölçütleri gibi her bir yöntem tarafından kullanılan algoritmalarındaki farklılıklardan kaynaklanabilir.



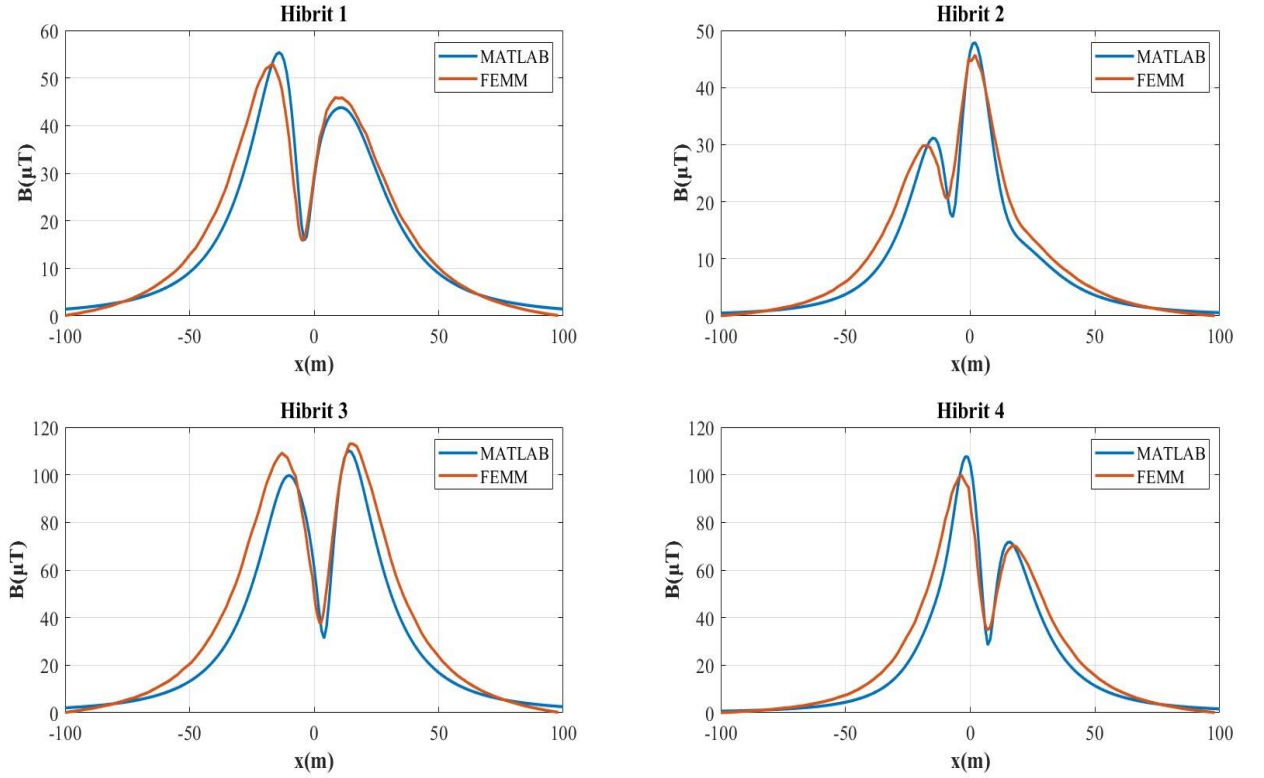
Şekil 21. Hibrit 1 konfigürasyonunun yerden 1 m yükseklikte oluşturduğu elektrik alan dağılımının MATLAB, FACE ve FEMM'de karşılaştırılması

Hibrit dönüşüm ile zeminde oluşacak manyetik alan seviyeleri de belirlenmelidir. HVDC hatlar için statik manyetik alan limitlerinin yüksek olduğundan bahsedilmiştir. Hibrit hat ile DC iletkenler deri etkisinin olmamasından dolayı daha yüksek akım taşıma kapasitesi ne sahip olabilirler. AC devreden 1kA, DC devreden ise farklı akım değerleri akması durumu için yerden 1 m yükseklikte manyetik alan dağılımı Şekil 22'de verilmiştir.



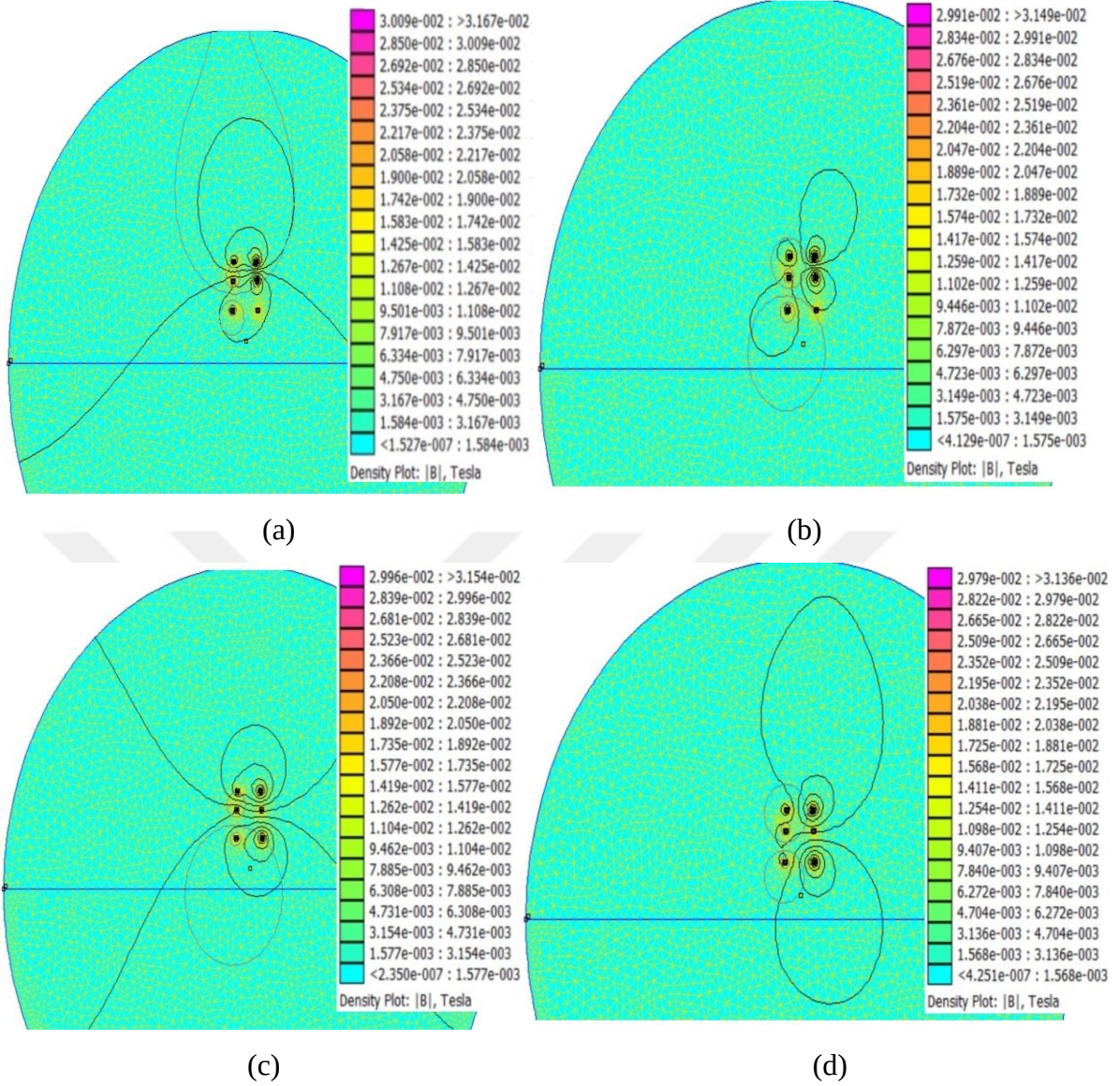
Şekil 22. Mevcut AC konfigürasyonunun ve farklı akım değerleri için hibrit 1 konfigürasyonunun yerden 1 m yükseklikte oluşturduğu manyetik alan dağılımı

Mevcut konfigürasyonda oluşan manyetik alan seviyesi $60 \mu\text{T}$ seviyelerini aşmaktadır. Hat hibrit işletildiğinde ise DC iletkenlerden akım miktarı arttıkça oluşan manyetik alan seviyeleri de artmaktadır. Hibrit hattın manyetik alanı, DC iletkenlerden akan akım 1.5 kA olsa dahi yine de mevcut hatta oluşan manyetik alan seviyelerinin altında kalmaktadır. Aynı hesaplamalar MATLAB üzerinde de yapılarak FEMM’de bulunan sonuçlar ile tüm konfigürasyonlar için Şekil 23’teki gibi kıyaslanmıştır. AC iletkenlerin akımı 1 kA iken hibrit konfigürasyonların akımı 1.5 kA ’dır. Hibrit 3 ve hibrit 4 konfigürasyonlarında olduğu gibi pozitif veya negatif kutbun zemine yakın olması Şekil 23’te görüleceği üzere yerden 1 m yüksekte oluşacak manyetik alan seviyelerinde artışa sebebiyet vermektedir.



Şekil 23. Hibrit 1, hibrit 2, hibrit 3 ve hibrit 4 konfigürasyonlarının manyetik alan dağılımının MATLAB ve FEMM’de karşılaştırılması

Hesaplanan manyetik alanın gerçek ve sanal kısımları Şekil 24’te tüm konfigürasyonlar için gösterilmektedir.



Şekil 24. Akım yoğunluğunun gerçek ve sanal kısımlarının dağılımı a) Hibrit 1 konfigürasyonu için, (b) Hibrit 2 konfigürasyonu için, (c) Hibrit 3 konfigürasyonu için, (d) Hibrit 4 konfigürasyonu için karşılaştırılması

Faz kutup yerleşimine bağlı olarak tüm konfigürasyonlarda değişen akım yoğunluğunun dağılımı sistemin manyetik davranışını belirler. Tüm konfigürasyonlarda akım yoğunluğu iletkenlerin yakınında en yüksek değere ulaşmakta, iletkenlerden uzaklaştıkça simetrik ya da asimetrik bir şekilde azalmaktadır.

3.2. Hibrit Yapının Korona Etkileri

İletim hatlarındaki korona olayı, bir iletkenin etrafındaki elektrik alan yoğunluğunun çevredeki havanın iyonizasyon gerilimini aşarak hava moleküllerini iyonlaştıran karmaşık bir süreçtir. Korona olayının, her biri diğerleriyle bağlantılı olan birkaç ardışık etkisi vardır. İlk olarak, iyonizasyon sürecinde, yüklü parçacıkların hareketi havada basınç dalgaları oluşturduğundan, tıslama veya çıtırtı sesi ile karakterize edilen işitilebilir gürültü üretir. İkinci olarak, korona deşarjı yakındaki iletişim sistemlerine müdahale edebilen geniş bantlı elektromanyetik radyasyon ürettiğinden radyo girişimine neden olur. Hem işitilebilir hem de radyo gürültüsünün yoğunluğu, iletken yüzey gradyanı ile yakından ilişkilidir; özellikle noktalarda, kenarlarda ve pürüzlü yüzeylerde daha yüksek bir yüzey gradyanı, elektrik alan gücünü artırarak korona deşarjını şiddetlendirir ve böylece gürültü emisyonlarını yükseltir. Ek olarak, korona olayı, enerjinin iyonize havada ışık, ısı, ses ve kimyasal reaksiyonlar şeklinde dağıldığından korona kayıplarına katkıda bulunur. Bu kayıplar iletim sisteminin genel verimliliğini azaltır. Dolayısıyla koronadan kaynaklı tüm kavramlar hem birbirleriyle ilişkilidir hem de koronanın bir fonksiyonudur. Bu nedenle, dönüştürülmesi planlanan direk yapısı için tüm korona fenomenlerinin simüle edilerek değerlerinin standartlara uygunluğunu belirlemek önem arz eder. Bu bölümde mevcut hattın ve hibrit hattın üreteceği işitilebilir gürültü, radyo girişimi, korona kayıpları ile iletkenlerin yüzey gradyan değerleri PSCAD/FACE modülünde modellenerek simüle edilmiştir.

3.2.1. İletken Yüzey Gradyanları

Bir iletkenin yüzey gradyanı, özellikle yüksek gerilimli elektrik iletim sistemlerinin tasarımında ve performansında kritik bir parametredir. İletkenin yüzeyinde oluşan elektrik alanın gradyanı çevredeki havanın iyonlaşmasına ve korona deşarjı ile dielektrik bozulmaya neden olabilir. Geometrik konfigürasyon ve gerilim yüzey gradyanını belirlemede önemli roller oynar. Mevcut 400 kV çift devre direk için iletkenlerin her birinin yüzey gradyanları ortalama, maksimum ortalama ve maksimum değerleri Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. AC-AC işletimde oluşan yüzey gradyan değerleri

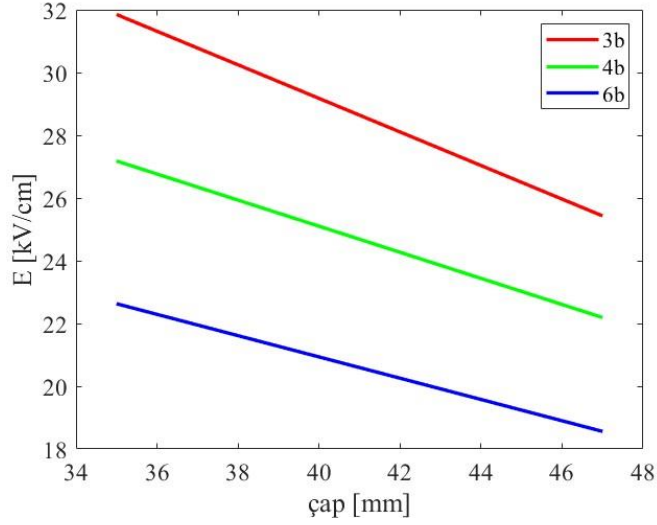
İletken Yüzey Gradyanı [kV/cm]					
Devre	İletken	Koordinat [x y]	Ortalama	Maksimum Ortalama	Maksimum
AC-1	1	[-5.35 16.00]	9.80	11.21	11.44
AC-1	2	[-5.50 24.70]	11.69	13.38	13.48
AC-1	3	[-4.75 30.40]	10.13	11.60	12.13
AC-2	1	[5.35 16.00]	9.80	11.21	11.44
AC-2	2	[5.50 24.70]	11.69	13.38	13.48
AC-2	3	[4.75 30.40]	10.13	11.60	12.13

Direğin sol yanı aynı AC işletimde iken sağ tarafındaki iletkenler (+0) kutup sıralaması (hibrit 1) ile değiştirildiğinde iletkenler üzerinde oluşacak yüzey gradyan değerleri ise Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. AC-DC işletimde oluşan yüzey gradyan değerleri

İletken Yüzey Gradyanı [kV/cm]					
Devre	İletken	Koordinat [x y]	Ortalama	Maksimum Ortalama	Maksimum
AC	1	[-5.35 16.00]	11.25	12.87	13.11
AC	2	[-5.50 24.70]	12.12	13.88	14.01
AC	3	[-4.75 30.40]	12.51	14.32	14.48
DC	-	[5.50 24.70]	26.89	30.78	31.85
DC	+	[4.75 30.40]	-26.42	-30.23	-30.98

İletken yüzey gradyanının belirlenmesinde koordinatlar ve gerilim dışında iletkenlerin yarıçapı ve demet iletkeninde bulunan alt iletken sayısı da önemlidir. Demette bulunan iletken sayısının veya iletken yarıçapının arttırılması korona deşarjlarını azaltmada etkin yöntemdir. Şekil 25’te demetteki iletken sayısının ve iletken çapının yüzey gradyanına etkisi görülebilir.



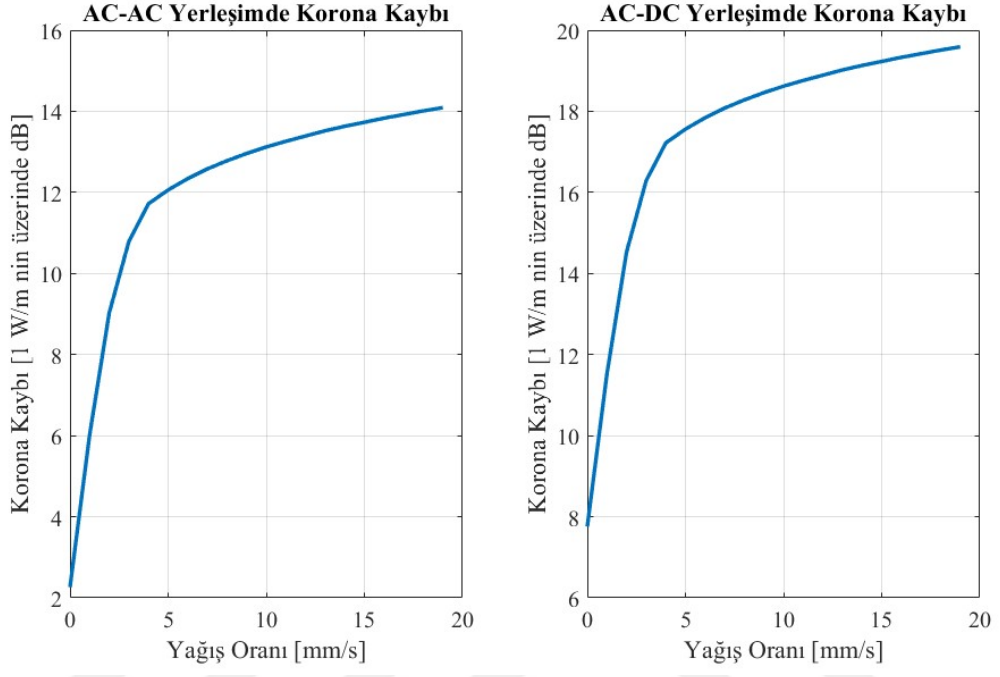
Şekil 25. İletken yüzey gradyanının değişimi

Hibrit 1 konfigürasyonunda kutup başına DC iletken demetinde 3, 4 ve 6 alt iletken kullanılarak yüzey gradyanı 32 kV/cm seviyelerinden 23 kV/cm seviyelerine kadar düşebilir. Aynı şekilde iletkenlerin yarıçapı büyüdüğünde de iletkenlerin yüzey gradyanları azalmaktadır.

3.2.2. Korona Kayıpları

Korona kaybı, yüksek gerilimli güç iletim sistemlerinde önemli bir parametredir. Bir iletkenin etrafındaki elektrik alanı çevredeki havayı iyonize ettiğinde, ışık, ısı, ses ve kimyasal reaksiyonlar yoluyla enerji kaybına neden olduğunda meydana gelir. Korona kaybı, iletkenin yüzey durumu, çapı, hat gerilimi, hava koşulları ve rakım dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenir. Korona kaybı kötü hava koşullarında özellikle yağmurlu havalarda daha da artış gösterir. Korona kaybını iyi analiz etmek, yüksek gerilimli enerji iletim sistemlerinin performansını, güvenilirliğini ve ömrünü artırmak, böylece daha verimli ve sürdürülebilir enerji dağıtımını sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır. Korona kayıplarının hesabı için analitik formül bulunmamaktadır. Çünkü havanın fiziksel parametrelerinin korona üzerinde hangi oranda etki yaptığı tam olarak formüle edilememiştir (Güney ve Ay, 2017).

Yeni tasarlanan hattın korona kayıpları ampirik formüller ile tahmin edilebilir. Mevcut direk ve Hibrit 1 direk yapısı için oluşacak korona kayıpları FACE modülünde BPA tarafından geliştirilen ampirik formüllerle tahmin edilerek Şekil 26’da verilmiştir.



Şekil 26. Mevcut direk ve hibrit direk için oluşacak korona kayıpları

Normalde DC hatta AC hatta göre daha az korona kayıpları oluşurken hibrit hatta oluşan kayıplar çok daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi AC iletkenin, üzerine binen DC alan nedeniyle iyon akımı yaymasıdır. Bu durum açık hava testleri ile belirlenmemiş olsa da Pfeiffer ve arkadaşları (2018), tarafından laboratuvar çalışmaları ile doğrulanmıştır.

3.2.3. İşitilebilir Gürültü

Yüksek gerilim iletim hatları tarafından üretilen işitilebilir gürültü, akım türü (AC veya DC), hava koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenen karmaşık bir parametredir. Bu gürültü, iletkenin etrafındaki yoğun elektrik alanının çevredeki havayı iyonize etmesiyle çıtırtili ses dalgaları oluşturan korona deşarjından kaynaklanır. Yağmur, sis ve yüksek nem gibi kötü hava koşulları korona deşarjını şiddetlendirerek işitilebilir gürültünün yoğunluğunu AC hatlarda artırır. DC hatlarda ise işitilebilir gürültü kavramı daha karmaşıktır. Çünkü genellikle güzel havalarda DC hatta işitilebilir gürültü fazla iken ıslaklık durumunda da işitilebilir gürültü miktarında artış olabilmektedir. İşitilebilir gürültü yalnızca yakındaki

insanlar için potansiyel bir rahatsızlık oluşturmakla kalmaz, aynı zamanda iletim sistemi içindeki enerji kayıplarının artmasına neden olabilir. Bu nedenle hibrit hatta iletilebilir gürültünün analiz edilmesi önemlidir.

- AC Hatlarda İletilebilir Gürültü

AC iletim hatları için iletilebilir gürültü (İG) hesaplanırken BPA, IREQ veya EPRI gibi farklı hesaplama standartları mevcuttur. Hava koşulları iletilebilir gürültü seviyesini belirlemede etkili olduğundan her standart farklı ortam koşulları için iletilebilir gürültü değerini ampirik formüller ile hesaplar. AC devreleri için her standart, bir bölgedeki yağış seviyelerine dayalı yağmur ($Yağmur, L_{50}$), şiddetli yağmur ($ŞY, L_5$), ve güzel hava (GH, L_{50}) olmak üzere üç ayrı formüle sahiptir.

Genel olarak şiddetli yağmur ve güzel hava (güneşli ve kuru) düzeltme faktörlerinin eklendiği yağmur formülüne dayanmaktadır. Hem BPA hem de IREQ modellerinde yağmur gürültüsünde hesaplanan iletilebilir gürültüden 25 dB çıkartılarak güzel hava koşullarındaki iletilebilir gürültü hesaplanır (Chartier vd., 1981). EPRI modelinde ise düzeltme faktörü yaklaşımı dB üzerinden değil elektrik alan üzerinden gerçekleşmektedir.

1. BPA Modeli: BPA standardına göre yağmur durumunda AC hatların iletilebilir gürültüsü denklem (48)-(49) ile hesaplanmaktadır. AC hatların iletilebilir gürültüsü şiddetli yağmur için denklem (50) ve güzel hava için denklem (51) ile hesaplanmaktadır (Bharti vd., 2022).

$$IG_{Yağmur}(L_{50}) = 81.7 + 120 \log \frac{E_{max}}{E_0} + 55 \log \frac{d_{eq}}{d_0} - 11.4 \log D - 5.8 \quad (48)$$

$$d_{eq} = \begin{cases} d & \text{for } n \leq 2 \\ 0.58dn^{0.48} & \text{for } n > 3 \end{cases} \quad (49)$$

$$IG_{ŞY}(L_5) = IG_{Yağmur}(L_{50}) + 3.5 \quad (50)$$

$$IG_{GH}(L_{50}) = IG_{Yağmur}(L_{50}) - 25 \quad (51)$$

2. IREQ Modeli: IREQ standardına göre yağmur için AC hatların iletilebilir gürültüsü denklem (52), şiddetli yağmur için denklem (53) ve güzel hava için denklem (54) ile hesaplanmaktadır (Bharti vd., 2022).

$$\dot{I}G_{Yağmur}(L_{50}) = 72 \log E_{max} + 22.7 \log(n) + 45.8 \log(d) - 57.6 - 11.4 \log(D) \quad (52)$$

$$\dot{I}G_{SY}(L_5) = \dot{I}G_{Yağmur}(L_{50}) + 3.5 \quad (53)$$

$$\dot{I}G_{GH}(L_{50}) = \dot{I}G_{SY}(L_5) - 25 \quad (54)$$

3. EPRI Modeli: EPRI standardına göre yağmur için AC hatların ışıtilebilir gürültüsü denklem (55)-(57), şiddetli yağmur için denklem (58)-(59) ve güzel hava için denklem (60)-(62) ile hesaplanmaktadır (Bharti vd., 2022).

$$\dot{I}G_{Yağmur} = \dot{I}G_{SY} + \Delta_{Yağmur} \quad (55)$$

$$\Delta_{Yağmur} = k_{Yağmur} - 14.2 \frac{E_c}{E} \quad (56)$$

$$k_{Yağmur} = \begin{cases} 8.2 & n < 3 \\ 10.4 & n \geq 3 \end{cases} \quad (57)$$

$$\dot{I}G_{SY} = 20 \log(n) + 44 \log(d) - 665/E + k_n - 10 \log(R) - 0.02 \log(R) \quad (58)$$

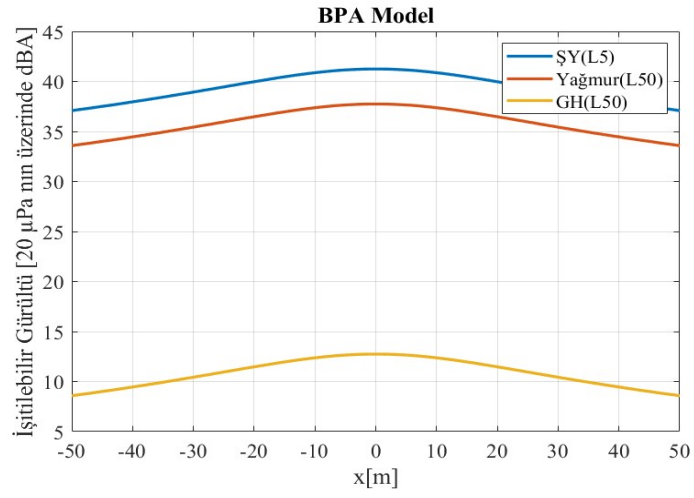
$$k_n = \begin{cases} 82.5 & n = 1 \\ 77.8 & n = 2 \\ 67.9 + 22.9(n-1)d/D & n \geq 3 \end{cases} \quad (59)$$

$$\dot{I}G_{GH} = \dot{I}G_{SY} + \Delta_{GH} \quad (60)$$

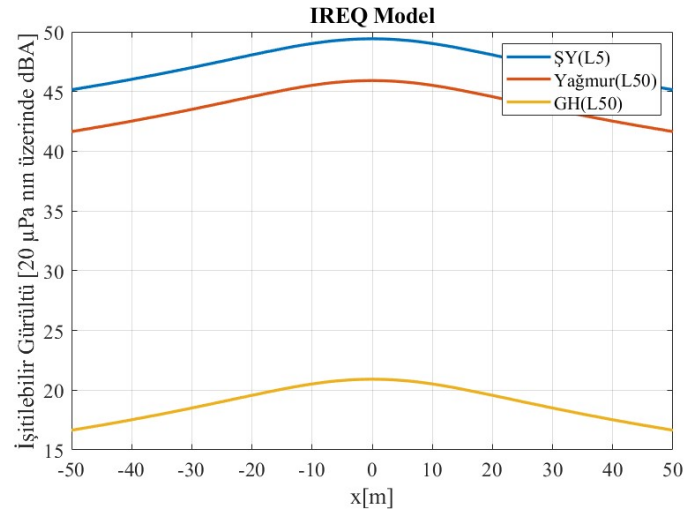
$$\Delta_{GH} = 8.2 - 14.2(E_c + 10) \quad (61)$$

$$E_c = \begin{cases} 24.4/d^{0.24} & n \leq 8 \\ 24.4/d^{0.24} - 0.25(n-8) & n > 8 \end{cases} \quad (62)$$

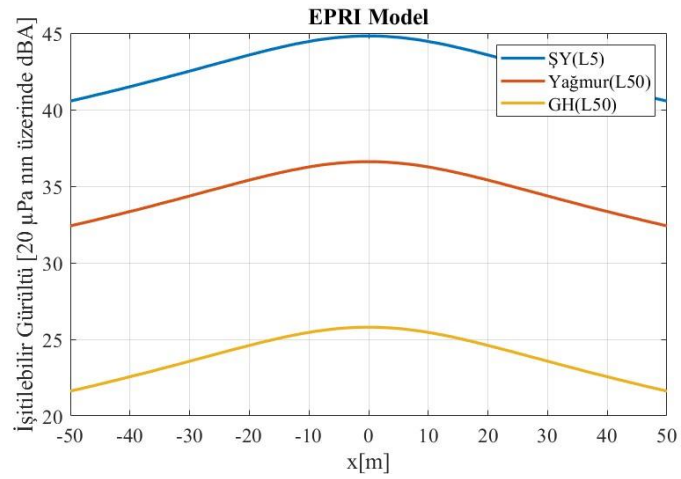
Mevcut direkte oluşacak ışıtilebilir gürültü ise BPA, EPRI ve IREQ standartlarına göre şiddetli yağmur, yağmur ve güzel hava kriterlerine göre belirlenmiştir. Oluşan ışıtilebilir gürültünün mesafeye göre değişimi Şekil 27(a)'da BPA, Şekil 27(b)'de IREQ ve Şekil 27(c)'de EPRI standardına göre verilmiştir. Standartlar arasında farklılıklar olsa da her üç yöntemde de ışıtilebilir gürültü miktarı en düşük güzel havalarda seyretmektedir. BPA modeli özellikle güzel havalarda diğer modellere kıyasla daha yüksek gürültü seviyeleri tahmin etme eğilimindedir. Hattın merkezinde en yüksek seviyelerde seyreden gürültü hattan uzaklaştıkça azalmaktadır. Her üç modelde de kötü hava koşullarında üretilen gürültü 55 dB sınır değerini aşmamaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 27. AC-AC yerleşimde oluşacak işitilebilir gürültü

- DC Hatlarda İşitilebilir Gürültü

Daha önce de belirtildiği gibi DC hatlarındaki işitilebilir gürültü BPA, EPRI veya IREQ modelleri kullanılarak hesaplanabilir. DC iletim hatlarında pozitif kutbun etkisi işitilebilir gürültü üzerinde negatife göre daha etkilidir. Hatta 25 kV/cm'lik bir gradyan için iletken kafesler kullanılarak yapılan testler pozitif ve negatif polarite arasında yaklaşık 8 dB'lik bir fark olduğunu göstermiştir (EPRI, 2010). Aşağıda her standardın denkleme nasıl yaklaştığı açıklanmaktadır. Tüm durumlarda değişkenlerin aynı şekilde tanımlandığına dikkat edilmelidir. 20 µPa'nın üzerindeki her pozitif kutup için işitilebilir gürültü aşağıdaki gibi hesaplanır. DC işitilebilir gürültü için ampirik katsayıları mevsime ve hava durumuna göre değişmektedir. Özellikle yağmurlu hava DC hatlarda üretilen gürültüyü arttırmaktadır. Çünkü iletkenler üzerindeki yağmur damlaları, normal kuru koşullar altında üretilenlere göre nispeten düşük genlikli ancak yüksek tekrarlamaya oranına sahip korona akım darbeleri üretir. Gürültü ise mevcut darbelerin genliğine bağlı olduğundan, yağmur sırasında azalır (Maruvada, 1981). Aşağıda farklı standartlar için işitilebilir gürültü verilmektedir (Li vd., 2018).

1. BPA Modeli: BPA standardına göre güzel hava için DC hatların işitilebilir gürültüsü denklem (63)-(66) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{I}G = 86 \log E + k_1 \log(n) + 40 \log(d) - 11.4 \log(D) + k_0 + k_2 \quad (63)$$

$$k_0 = \begin{cases} -100.6 & n \geq 3 \\ -93.4 & n < 3 \end{cases} \quad (64)$$

$$k_1 = \begin{cases} 25.6 & n \geq 3 \\ 0 & n < 3 \end{cases} \quad (65)$$

$$k_2 = \begin{bmatrix} -6 & L_{50} \text{ Yağmur} \\ -2 & L_{50} \text{ Güzel Hava (Kış)} \\ 2 & L_{50} \text{ Güzel Hava (Yaz)} \end{bmatrix} \quad (66)$$

2. IREQ Modeli: IREQ standardına göre güzel hava için DC hatların işitilebilir gürültüsü denklem (67) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{I}G = k_1 + k_2 (g - go) + k_3 \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + k_4 \log\left(\frac{n}{n_0}\right) \quad (67)$$

3. EPRI Modeli: EPRI standardına göre güzel hava için DC hatların işitilebilir gürültüsü denklem (68) ile hesaplanmaktadır.

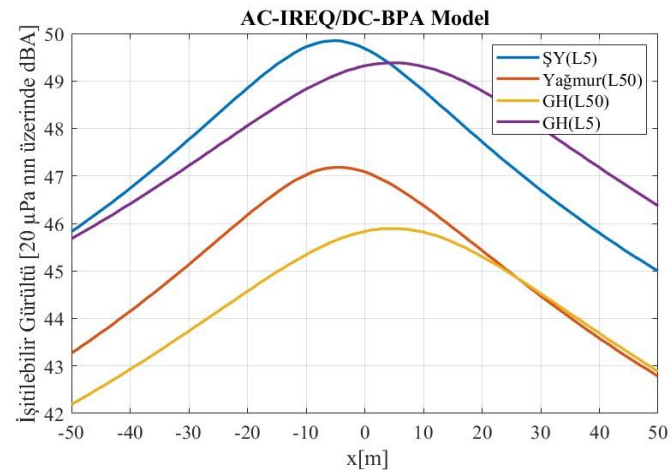
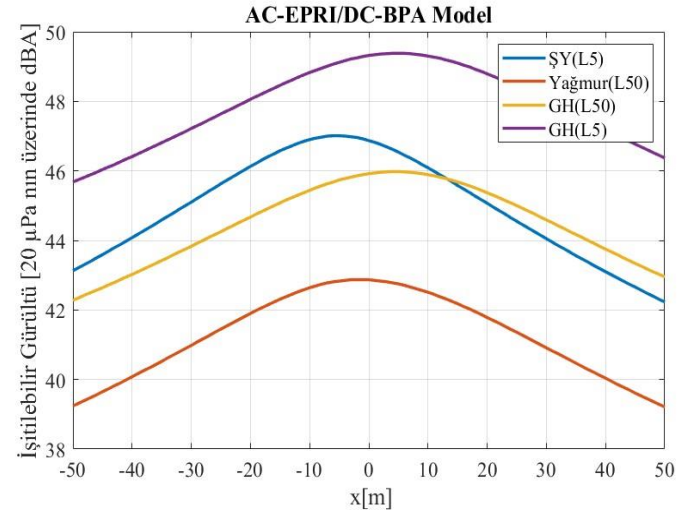
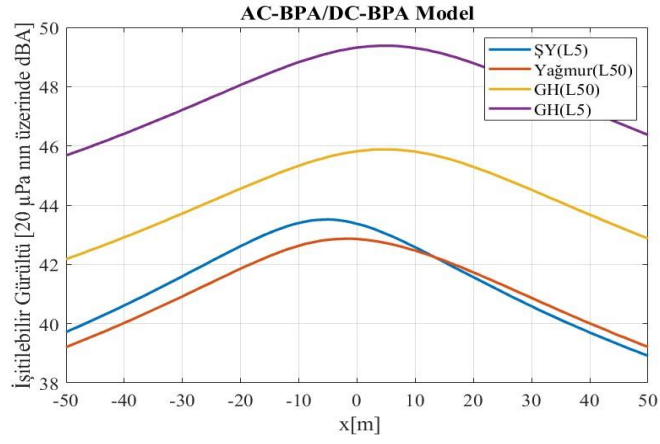
$$IG = 56.9 + 124 \log \frac{E_{max}}{25} + 25 \log \frac{d}{4.45} + 18 \log \frac{k}{2} - 10 \log D - 0.02D \quad (68)$$

- Hibrit Hatlarda İşitilebilir Gürültü

Hibrit direk ve koridorlarda yapılan deneysel çalışmalar yaygın değildir. Hibrit direk ve koridorların son yıllarda kullanımı artmaktadır. Bu yüzden literatürde bu yapıların etkilerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Hibrit durumlarda AC ve DC iletkenler birbirlerini etkilemektedir. Hibrit koridorlarda AC iletkenleri tarafından üretilen işitilebilir gürültü, DC hattın etkilenir. Çünkü DC etki, AC iletkenin yüzey gradyanının tepe değerini değiştirir (Clairmont vd., 1992).

Hibrit bir direktteki işitilebilir gürültü, pozitif bir DC etki (ön gerilim) veya AC dalgalanma yoluyla artabilir. Aynı zamanda bazı durumlarda da negatif bir DC ön gerilim yoluyla da azalabilir. Bu nedenle, gelişmiş bir korona performansı için optimize edilmiş bir iletken yerleşimi tasarlanmalıdır (Hedtke, 2019).

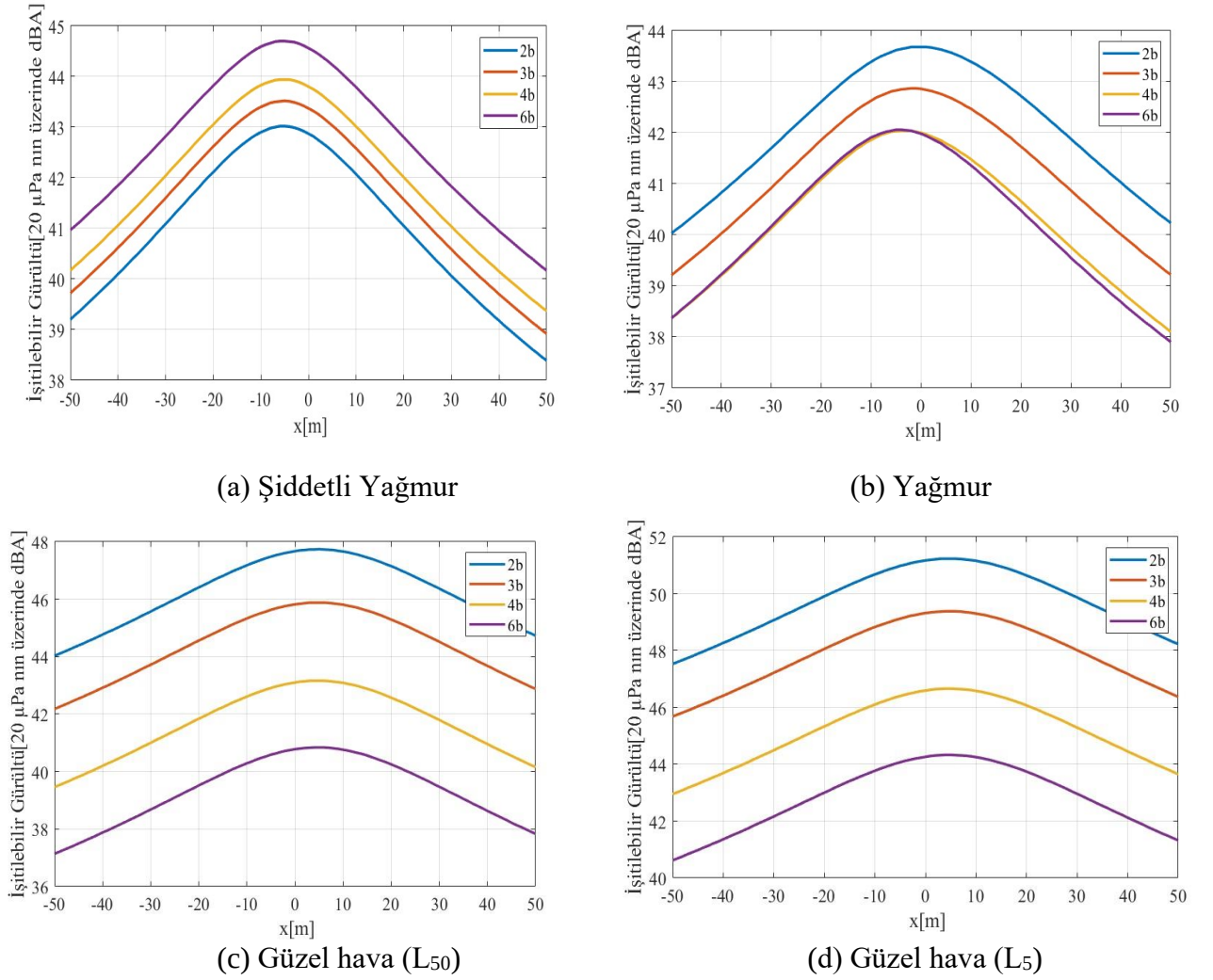
Hibrit AC-DC direkte oluşacak işitilebilir gürültünün mesafeye göre değişimi Şekil 28'de verilmiştir. AC ve DC devreler için hava koşullarının farklı etki ettiğinden bahsedilmiştir. Bu yüzden AC devre için BPA, EPRI ve IREQ standartlarına göre şiddetli yağmur (L_5), yağmur (L_{50}) ve güzel hava (L_{50}) kriterlerine göre belirlenmiştir. DC devre için ise BPA standardına göre oluşacak işitilebilir gürültü yağmur (L_{50}), güzel hava (L_{50}) ve güzel hava (L_5) kriterleri için belirlenmiştir. Şekil 28(a)'da AC devrenin işitilebilir gürültü seviyesi BPA standardı ile, Şekil 28(b)'de AC devrenin işitilebilir gürültü seviyesi EPRI standardı ile ve Şekil 28(c)'de AC devrenin işitilebilir gürültü seviyesi IREQ standardı ile hesaplanırken DC devrenin işitilebilir gürültü seviyesi her üç grafikte de BPA standardına göre hesaplanmıştır.



Şekil 28. AC-DC yerleşimde oluşacak işitilebilir gürültü

Hibrit hatta oluşacak işitilebilir gürültü daha önce bahsedildiği gibi ayrı ayrı AC ve DC devrelerin oluşturduğu gürültü miktarına göre belirlenir. Hibrit hatta DC devrenin işitilebilir gürültüsü BPA modeli ile oluşturulurken AC devrenin farklı modellerle oluşturulduğu işitilebilir gürültü miktarları Şekil 29’da görülmektedir.

Güzel havada beklendiği gibi DC devrelerin L_5 ’ten ve L_{50} ’den alınan işitilebilir gürültü miktarları önerilen 40 dB şiddetini aşmaktadır. Böyle bir durumda tasarım aşamasında demetlerde kullanılan alt iletken sayısı artırılarak işitilebilir gürültü seviyesi azaltılabilir (Tarko vd., 2021). Şekil 29’da AC devredeki alt iletken sayısı değiştirilmeden DC devrede farklı alt iletken sayısı kullanıldığında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları verilmiştir.

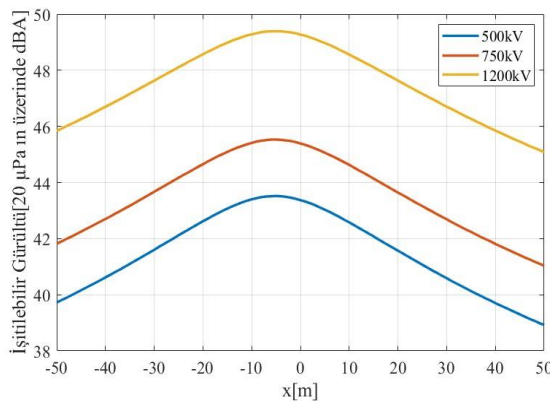


Şekil 29. HVDC sistemde demetlerde 2,3,4 ve 6 alt iletken kullanılması durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları

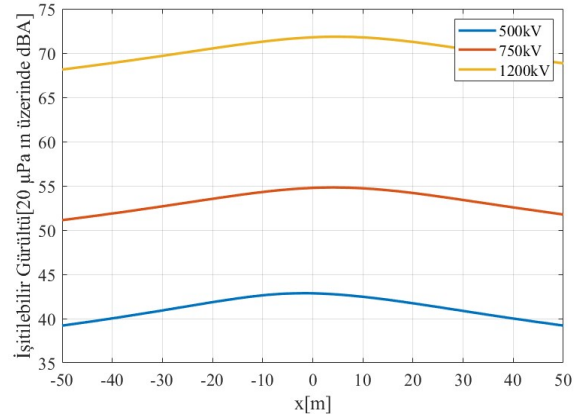
Şekil 29’dan görüleceği üzere hava koşulları işitilebilir gürültünün belirlenmesinde oldukça önemlidir. Böyle bir tasarımda beklendiği üzere oluşacak işitilebilir gürültü miktarı

yağmur ve güzel hava durumlarında alt iletken sayısı arttıkça azalmaktadır. Her ne kadar DC hatlarda işitilebilir gürültü güzel havalarda fazla olsa da şiddetli yağmur durumu hem AC hem DC hatlar için kritik bir faktördür. Çünkü şiddetli yağmur durumunda iletkenlerin yüzeyinin su tutma ihtimali artar. Shilong vd (2021), yaptıkları deneyle doymuş yağış oranını, demetlenmiş iletkenler üzerinde yağışın etkisinin boyutunu yansıtan bir kavram olarak değerlendirerek bu oran büyük olursa iletkenlerin korona özellikleri üzerindeki etkisinin de o kadar büyük olduğunu belirtmişlerdir. Wan vd (2017), ağır yağmur koşulları altında bir korona kafesi kullanarak demet iletkenlerin işitilebilir gürültü performansları inceleyerek ağır yağmur koşulları için ağırlıklı akustik güç seviyesi formülü türetmişlerdir.

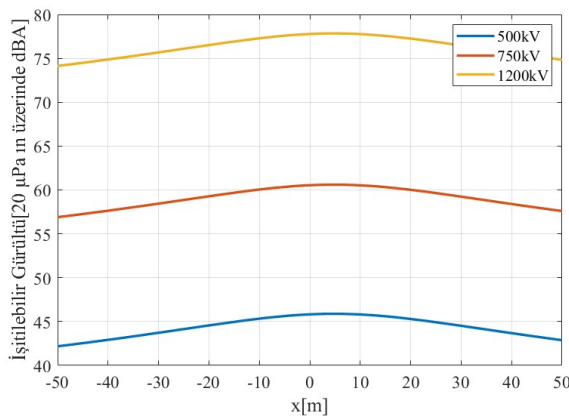
DC demet iletkenler için ağır yağmur koşullarında iletkenin su tutma oranı ve korona etkilerini belirlemeye yönelik deneysel bir çalışma henüz olmamakla birlikte simülasyon sonuçlarına göre AC iletkenler ile aynı özellikleri gösterdiği belirlenmiştir.



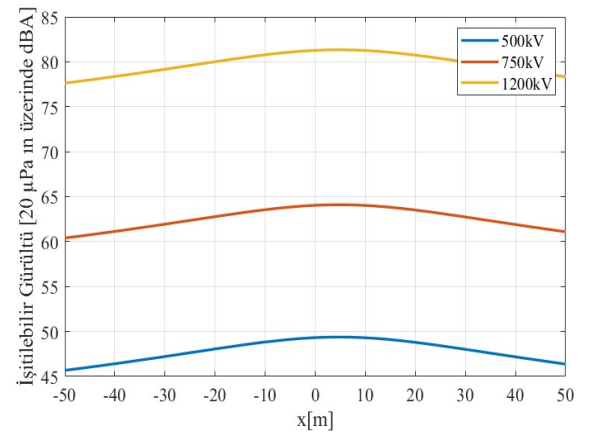
(a) Şiddetli yağmur



(b) Yağmur



(c) Güzel hava (L_{50})



(d) Güzel hava (L_5)

Şekil 30. HVDC sistemlerin farklı gerilim seviyelerinde işletilmesi durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları

Şekil 30’da AC devre aynı kalmak üzere DC devrenin farklı gerilimlerde işletilmesi durumunda oluşacak işitilebilir gürültü miktarları farklı hava koşulları için gösterilmektedir. Tüm koşullarda işitilebilir gürültü miktarının iletim hattının gerilim seviyesi ile arttığı açıktır.

3.2.4. Radyo Gürültüsü

Yüksek gerilimli iletim hatlarının neden olduğu radyo girişimi geniş bir elektromanyetik gürültü spektrumunda çevreyi etkiler. Radyo girişimlerinin azaltılması hem enerji iletim sistemlerinin hem de yakınlardaki iletişim ağlarının güvenilirliğini koruma noktasında önemlidir.

- AC Hatlarda Radyo Gürültüsü

AC devreleri için IREQ ve EPRI modelleri, bir bölgedeki yağış seviyelerine dayalı üç ayrı formüle sahiptir: yağmur ($Yağmur, L_{50}$), şiddetli yağmur ($ŞY, L_1$) ve güzel hava (GH, L_{50}). Yağmur ve güzel hava formülleri, düzeltme faktörlerinin eklendiği IREQ şiddetli yağmur formülüne dayanmaktadır. IREQ Radyo gürültüsü (Γ) oluşturma fonksiyonlarının ayrıntıları (Trinh ve Maruvada, 1979; Olsen vd., 1992; Olsen ve Schennum, 1995)’te bulunabilir. Yağmur ve güzel hava formülleri, düzeltme faktörlerinin eklendiği EPRI şiddetli yağmur formülüne dayanmaktadır.

1. IREQ Modeli: IREQ standardına göre şiddetli yağmur için AC hatların radyo gürültüsü denklem (69)-(72) ile hesaplanmaktadır.

$$\Gamma_{ŞY} = -90.25 + 92.42 \log(E_{max}) + 43.02 \log(2r) - B(n) \quad (69)$$

$$B(n) = \begin{cases} 0 & n = 1 \\ 3.7 & n = 2 \\ 6 & n \geq 3 \end{cases} \quad (70)$$

$$\Gamma_{Yağmur} = \Gamma_{ŞY} - 14 \quad (71)$$

$$\Gamma_{GH} = \Gamma_{ŞY} - 20 \quad (72)$$

2. EPRI Modeli: EPRI standardına göre şiddetli yağmur için AC hatların radyo gürültüsü denklem (73)-(77) ile hesaplanmaktadır.

$$\Gamma_{\text{SY}} = 81.1 - 580 / E_{\text{max}} + 38 \log(d / 3.8) \quad (73)$$

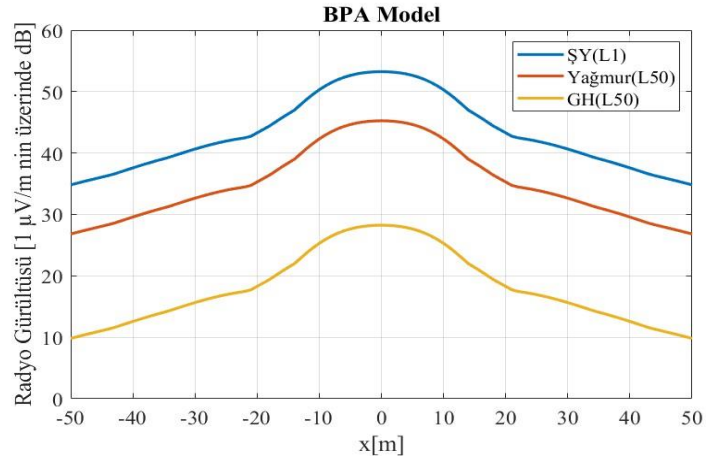
$$\Gamma_{\text{Yağmur}} = \Gamma_{\text{SY}} + \Delta_{\text{Yağmur}} \quad (74)$$

$$E_c = 24.4 / d^{0.24} - K_e \quad (75)$$

$$K_e = \begin{cases} 0 & n \leq 8 \\ 0.25(n-8) & n > 8 \end{cases} \quad (76)$$

$$\Gamma_{\text{GH}} = \Gamma_{\text{Yağmur}} - 17 \quad (77)$$

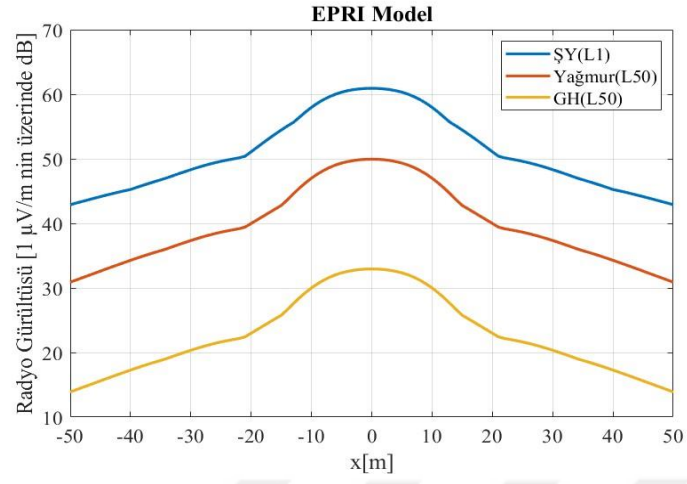
Mevcut direktte oluşacak radyo gürültüsü ise BPA, EPRI ve IREQ ve CIGRE standartlarına göre şiddetli yağmur, yağmur ve güzel hava kriterlerine göre belirlenmiştir. Oluşacak radyo gürültüsünün mesafeye göre değişimi Şekil 31’de verilmiştir.



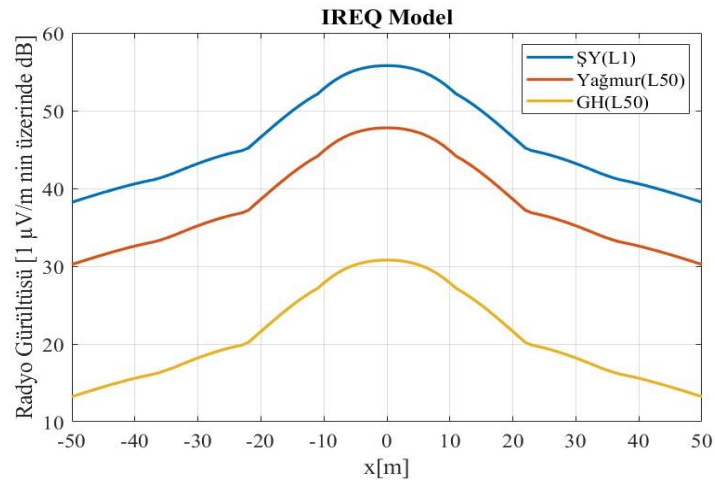
(a)

Şekil 31. AC-AC yerleşimde oluşacak radyo gürültüsü

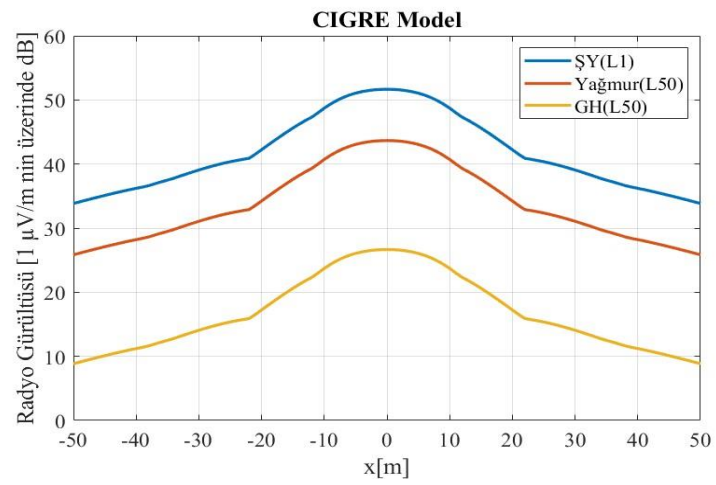
Şekil 31'in devamı



(b)



(c)



(d)

İşitilebilir gürültüde olduğu gibi radyo gürültüsü de hattın merkezinde en yüksek seviyelere çıkarken merkezden uzaklaştıkça azalma eğilimine girmektedir. EPRI modelinin kullandığı ampirik katsayılar diğer modellere kıyasla daha yüksek gürültü seviyeleri tahmin etme eğilimindedir. Tüm modellerde şiddetli yağış durumunda oluşan radyo gürültüsü diğer hava koşullarına göre fazla olmaktadır.

- DC Hatlarda Radyo Gürültüsü

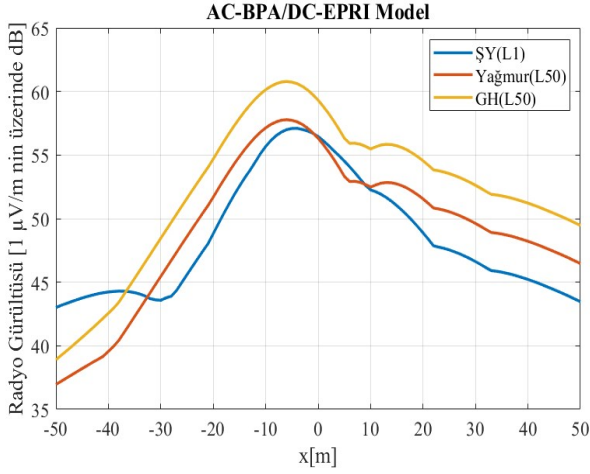
DC hatların radyo gürültüsü IREQ modeline göre şiddetli yağmur için denklem (78) ile ve BPA modeline göre güzel hava için denklem (79) ile hesaplanabilir.

$$\Gamma_{SY} = 90.25 + 94.42 \log(E_{max}) + 43.02 \log(2r) - B(n) \quad (78)$$

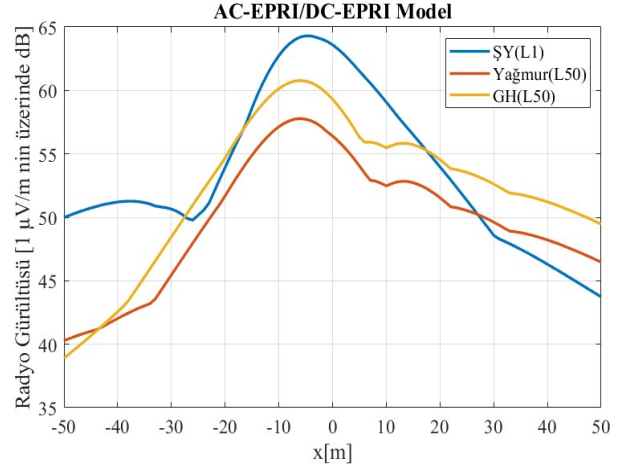
$$\Gamma_{GH} = 31 + 86 \log(g / g_0) + 40 \log(d / d_0) + 10 \log(n / n_0) \quad (79)$$

- Hibrit Hatlarda Radyo Gürültüsü

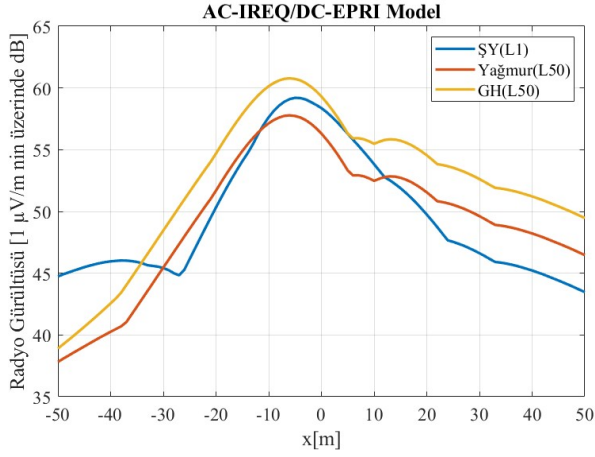
Hibrit AC-DC direkte oluşacak radyo gürültüsünün mesafeye göre değişimi Şekil 32’de verilmiştir. AC devre için BPA, EPRI, IREQ ve CIGRE standartlarına göre DC devre için ise EPRI standardına göre şiddetli yağmur (L_1), yağmur (L_{50}) ve güzel hava (L_{50}) kriterleri için belirlenmiştir. Şekil 32(a)’da AC hattın radyo gürültüsü BPA standardına göre hesaplanırken DC hattın radyo gürültüsü EPRI standardına göre hesaplanmıştır. Şekil 32(b)’de hem AC hattın hem de DC hattın radyo gürültüsü EPRI standardına göre hesaplanmıştır. Şekil 32(c)’de AC hattın radyo gürültüsü IREQ standardına göre hesaplanırken DC hattın radyo gürültüsü EPRI standardına göre hesaplanmıştır. Şekil 32(d)’de AC hattın radyo gürültüsü CIGRE standardına göre hesaplanırken DC hattın radyo gürültüsü EPRI standardına göre hesaplanmıştır.



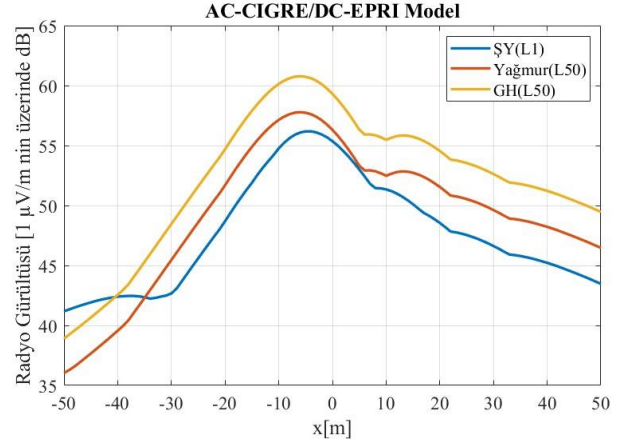
(a)



(b)



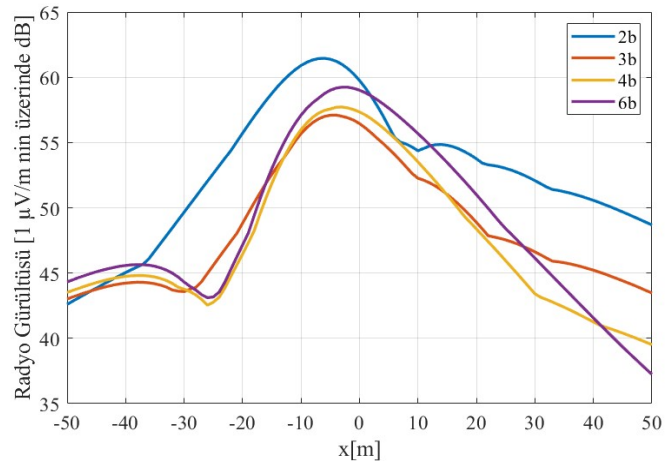
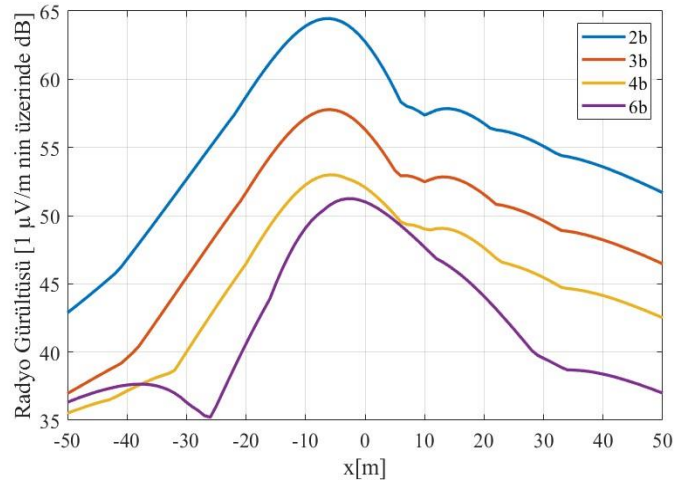
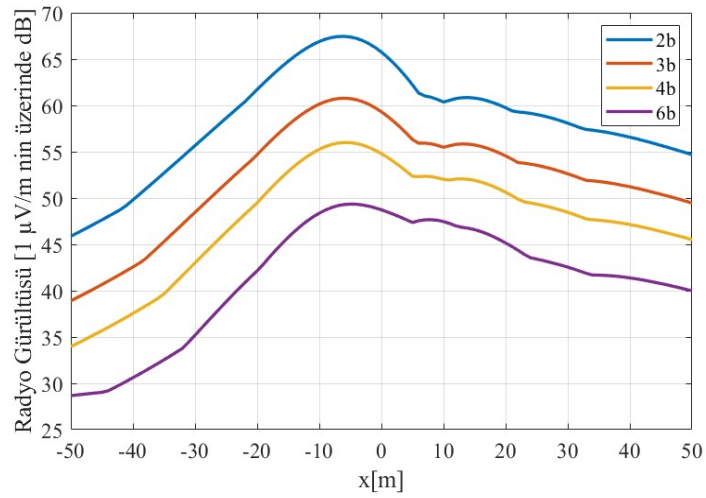
(c)



(d)

Şekil 32. AC-DC yerleşimde oluşacak radyo gürültüsü

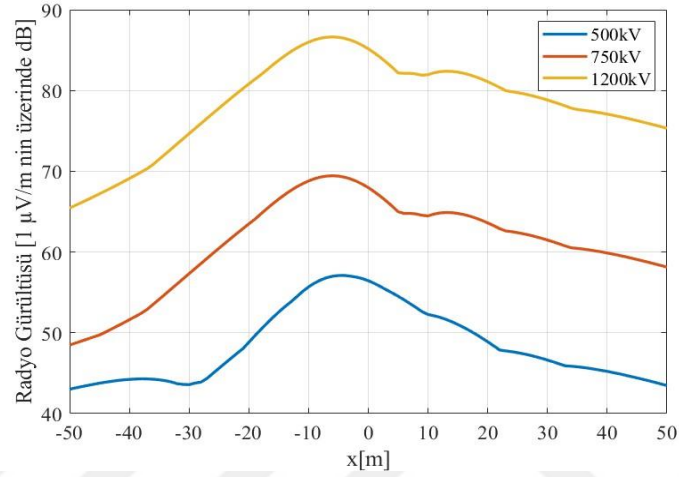
Hibrit işletimde şiddetli yağmur koşullarında daha düşük seviyelerde radyo girişimi üretilirken, EPRI modelinde diğer modellere göre daha yüksekte seyretmektedir. Ayrıca AC ve DC devrelerin farklı davranış şekillerinden ötürü hibrit yerleşimde radyo girişimlerinin genelde yüksek havada daha yüksek seyrettiği belirlenmiştir. Ama oluşabilecek radyo gürültüleri mevcut yerleşim ve hibrit yerleşim için kıyaslanacak olursa aralarında dikkate değer bir farklılık olmayacağı belirlenmiştir. Şekil 33'te AC devredeki alt iletken sayısı değiştirilmeden DC devrede farklı alt iletken sayısı kullanıldığında oluşacak iletilebilir gürültü miktarları verilmiştir.

(a) Şiddetli Yağmur (L_1)(b) Yağmur (L_{50})(c) Güzel Hava (L_{50})

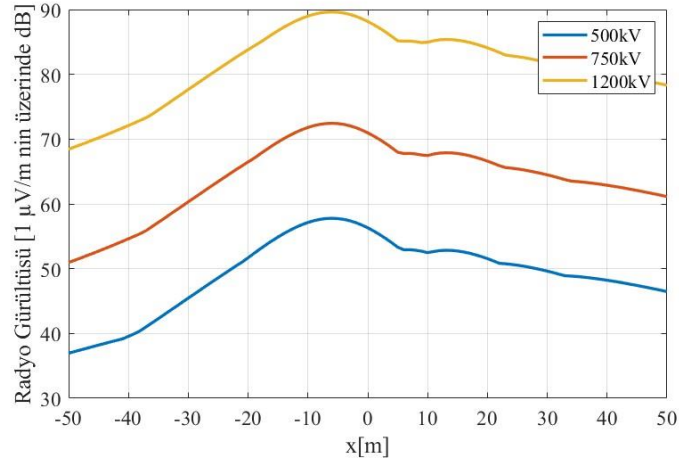
Şekil 33. HVDC sistemde demetlerde 2,3,4 ve 6 alt iletken kullanılması durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları

Şekil 33'ten görüleceği üzere şiddetli yağmur durumunda oluşan radyo gürültüsünün alt iletken sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği konusunda daha ayrıntılı araştırmalara ihtiyaç duyulduğu hatta yeni ampirik denklemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Şekil 34'te AC devre aynı kalmak üzere DC devrenin farklı gerilimlerde işletilmesi durumunda oluşacak işitilebilir gürültü miktarları farklı hava koşulları için gösterilmektedir. Tüm koşullarda işitilebilir gürültü miktarının iletim hattının gerilim seviyesi ile arttığı açıktır.



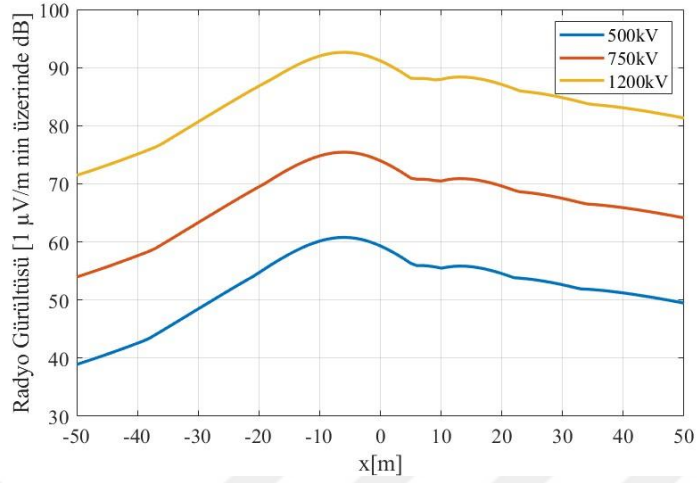
(a) Şiddetli Yağmur (L_1)



(b) Yağmur (L_{50})

Şekil 34. HVDC sistemlerin farklı gerilim seviyelerinde işletilmesi durumunda farklı hava koşullarında oluşacak işitilebilir gürültü miktarları

Şekil 34'ün devamı:

(c) Güzel Hava (L_{50})

3.3. İyonize Alanlar

Uzun mesafelerde elektriğin HVDC iletimi, HVAC iletimine göre avantajlar sunar. Bununla birlikte HVDC iletim hatları iyon üretir ve iyon yoğunluğuna bağlı olarak iyonize alanlar meydana gelir. Bu iyonize alanların niceliksel tespiti canlılar üzerindeki etkilerinden ötürü önem arz eder. Çünkü uzay yüklerinin oluşturduğu iyon akımının evlerin keskin köşelerinde yoğunlaşarak elektrik alanında bozulmalara yol açması muhtemeldir, bu da evlerin içindeki veya dışındaki insanların sağlığına zarar verebilir (Liu vd., 2022).

Alternatif akım koşulları altında, iyonlar ardışık yarım döngülerde iletkenine doğru çekilir ve sonraki döngüde ise iletkeniden itilir. Doğru akım koşullarında ise iyonlar akımın tek yönlü doğasından dolayı nötralize olamaz. Aynı polariteli iyonlar itildiğinde ters kutuptan emileceklerdir. Böylelikle hem kutup iletkenleri ile toprak arasındaki boşlukta hem de iki kutup iletkeni arasındaki boşlukta sürekli göç eden iyonlardan oluşan bir iyonize alan oluşur (Zhu vd., 2019). Bir AC iyon akımı, DC kutuplarda indüklenebilir. Ancak bu akım genellikle çok küçüktür ve dönüştürücü istasyon küçük AC bileşenlerini tolere edebilir. AC fazlarındaki iyonlar tarafından üretilen bir DC akım saptması çok daha kritiktir. Çünkü transformatörleri doyumluğa sürükleyebilir ve dönüştürücülerin çalışmasında sorunlara yol açabilir (Guilod vd., 2014).

İyon akış alanı rüzgarla sürüklenabilir ve statik alanı güçlendirebilir. Zemin seviyesindeki alan aynı zamanda rüzgâr hızı, bağıl nem ve hatlara dik hava basıncı gibi

değişkenlerden de etkilenir (Xie vd., 2024). Hibrit iletim hatları içinde aynı durum söz konusudur. İletim hattının etrafındaki boşluk yük iyonlarıyla doludur. Doğrusal olmayan iyon hareketliliğinin hesaplanması, korona etkisiyle oldukça karmaşıktır (Choopum vd., 2023). Statik iyon akış alanını hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi (FEM), sınır elemanları yöntemi (BEM) gibi birçok yöntem vardır. Genellikle elektrik alan dağılımını bilinen uzay iyon dağılımına göre hesaplarlar ve iyon yoğunluğu dağılımını da bilinen elektrik alanına göre yinelemeli olarak hesaplarlar. İyon akış alanı sadece doğrusal olmayan değil aynı zamanda zamanla değişeceğinden kurulması gereken denklemlerin ölçeği çok büyük olacaktır (Zhang vd., 2016). Öte taraftan rüzgâr, nem, basınç gibi çevresel etkenlerde işin içine girdiğinde yüzlerce parametre permütasyonunu simüle edebilen, hızlı ve kararlı bir simülasyon yöntemine bugün hala ihtiyaç duyulmaktadır.

Son zamanlarda, kısmi diferansiyel denklemleri ve iki noktalı sınır değer problemlerini çözerek uzay yükü ve iyon akımı akışı hesaplamak için sofistike sayısal yöntemler önerilmiştir (Maruvada & Bisnath, 2011). Ancak bu yöntemleri kullanan bilgisayar programları yaygın olarak bulunabilir değildir ve algoritmalar belirsiz bir şekilde tanımlanmıştır.

İyon akışı problemini çözmek için önerilen yöntemlerden biri de elektrik alanının yönünün iyonlardan etkilenmediğini belirten ‘Deutsch’ varsayımdır. FACE programında iyonize alanlar, Deutsch varsayımını kullanılarak ve doğrusal olmayan denklemler için etkili bir algoritma uygulanarak hesaplanır. Maxwell denklemlerine dayalı olarak korona davranışını tanımlayan bir dizi denklem türetmek amacıyla literatürde genellikle aşağıdaki varsayımlar kullanılır:

- İletkenlerin etrafındaki iyonizasyon tabakasının kalınlığı ihmal edilebilir düzeydedir.
- Alternatif iletken yüzeylerindeki elektrik alanının büyüklüğü başlangıç değerlerinde kalır.
- İyonların hareketliliği sabittir veya elektrik alanı ve uzay koordinatlarının bilinen bir fonksiyonudur.
- İyon difüzyonu ihmal edilmiştir.

Bu varsayımlarla elektrik alanla ilişkili iyonize alanlar denklem (80) ile tanımlanabilir (Zhang vd., 2007).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = (\rho_- - \rho_+) / \epsilon_0 \quad (80)$$

Pozitif ve negatif akım yoğunlukları iyon hareketliliği ve rüzgâr hızına bağlı olarak denklem (81)-(85) ile ifade edilebilir.

$$J_+ = \rho_+(k_+E + w) \quad (81)$$

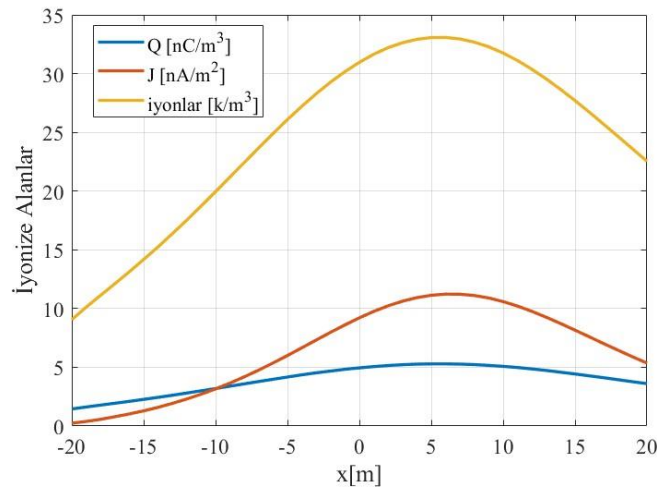
$$J_- = \rho_-(k_-E - w) \quad (82)$$

$$J = J_+ + J_- \quad (83)$$

$$\nabla \cdot J_+ = -R_{iyon} \rho_+ \rho_- / e \quad (84)$$

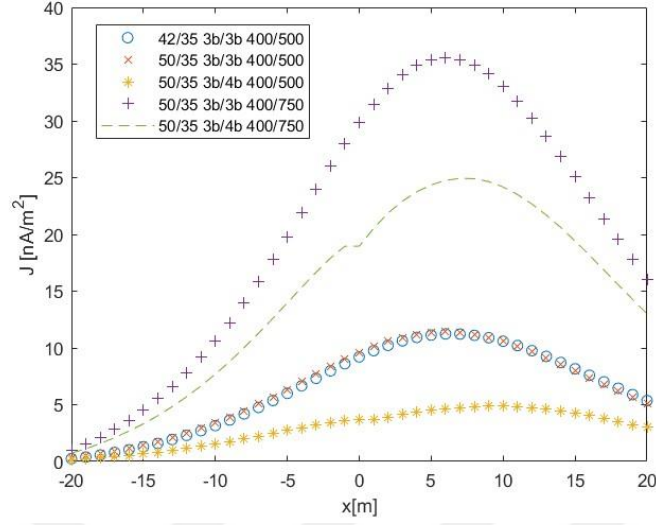
$$\nabla \cdot J_- = R_{iyon} \rho_+ \rho_- / e \quad (85)$$

İyon akış alanı hakkında yapılan çalışmalar bugün itibari ile hala çok kısıtlıdır. CIGRE yer seviyesindeki elektrik alanı için 25 kV/m ve iyon akım yoğunluğu için 100 nA/m² limitler önermektedir (Cigre, 2009). Farklı ülkelerde yüksek gerilim hatları için yapılan hesaplamalar iyon akımları için tahminleri içerir. Ama hava koşulları iyon akış alanında oldukça etkin parametredir. Örneğin Itaipu'da yapılan hesaplamalar kötü hava koşullarında bu limitlerin kolayca aşılabileceğini göstermiştir. Tasarlanan hibrit yapıda iyon akış alanının nasıl seyredeceği PSCAD simülasyon yazılımının alt modülü FACE kullanılarak hesaplanmıştır. Hibrit yapı ile oluşması muhtemel iyonize alanlar Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35. Hibrit yerleşimde oluşacak iyonize alanların mesafeye bağlı değişimi

İyon yoğunluğunun devrelerin farklı gerilim (AC/DC), demet sayısı (AC/DC) ve alt iletkenler arası mesafe ile çapa (DC) göre değişimi Şekil 36’da verilmektedir.



Şekil 36. Hibrit yerleşimde oluşacak iyonize alanların farklı parametreler bağlı değişimi

Şekil 36’dan görüleceği üzere DC devrenin gerilimin 500 kV’tan 750 kV seviyelerine çıkması iyon yoğunluğunun 3 katına çıkmasına sebebiyet vermiştir. Aynı şekilde DC devrenin demet iletkeninde dört alt iletken kullanılması da iyon yoğunluğunun iki katına çıkarmıştır.

4. OPTİMUM HİBRİT DİREK YAPISI

Genel olarak optimizasyon, eldeki problemin tüm koşullarını karşılayan olası çözümler kümesi arasında en iyi çözümü bulmak anlamına gelmektedir. Optimum çözüm arayışı, belirli bir sorun bağlamında maksimum veya minimum bir değerin sistematik olarak aranmasına karşılık gelir. Analitik yöntemlerle optimizasyon problemlerinin çözümü, problemin karmaşıklığı izin verdiği sürece mümkündür. Daha karmaşık problemlerde ise metasezgisel algoritmalar kullanılabilir çünkü metasezgisel algoritmalar, karmaşık problemleri makul sürede çözülebilir hale getirir (Desale vd., 2015). Metasezgisel algoritmalar, doğal olaylardan esinlenen, verimli ve hızlı bir şekilde optimuma yakın çözümlere yakınsamak üzere tasarlanmış hesaplamalı yaklaşımlardır (Chandra & Anand, 2022). Kesin bir çözüm garanti etmeseler de optimum sonuca yakın çözümler bulmada oldukça etkilidirler.

Hareket halindeki parçacıkların özelliklerine dayanan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Nayak vd., 2023), arıların yiyecek arama davranışından esinlenen Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu (Sharma & Pant, 2013), karıncaların yiyecek arama sürecindeki davranışlarını taklit eden Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Blum, 2005) ve evrim ilkesinden yola çıkarak en iyi bireyin hayatta kalması prensibine dayanan Genetik Algoritma Optimizasyonu (Katoch vd., 2021) iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan meta sezgisel algoritmalarındandır.

Bir iletim hattının tasarımı da yinelemeli bir optimizasyon sürecidir. Tasarım kriterlerinin yanı sıra çok sayıda tasarım değişkeninin de mevcut olması optimizasyon probleminin açık bir çözümüne ulaşmayı genellikle zorlaştırmaktadır. Literatürde farklı optimizasyon çeşitleri kullanılarak farklı amaç fonksiyonlarını gerçeklemek üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Al Salameh ve Alnemrawi (2022), yaptığı çalışmada havai iletim hatlarında iletkenlerin yerleşimini elektrik ve manyetik alanı minimuma indirmek için karınca aslanı algoritması ile optimize etmişlerdir. Tejada-Martinez ve diğerleri (2019), ± 500 ve ± 600 kV bipolar HVDC iletim hatları için korona deşarjının neden olduğu radyo enterferans düzeylerini genetik algoritma kullanarak optimize etmişlerdir. Ghassemi (2019), mevcut havai hat tasarımlarının yerine yeni bir yaklaşım getirerek her alt iletkenin en uygun konumunu bularak bir güç sisteminin güç aktarım kapasitesini genetik algoritma ile optimize etmişlerdir. Genetik algoritma ile ulusal şebekelerinde kullanılan tek devre ve çift devre direkleri için iletkenlerin yerleşimini optimize etmek üzerine çalışmalar da bulunmaktadır.

Ranković ve diğerleri (2017), Sırbistan havai hatlarında paralel havai enerji iletim hatlarının ürettiği elektromanyetik alanı minimize etmeye çalışırken, El Dein (2014), ise Mısır havai hatlarında aynı işlemi farklı kısıtlar uygulayarak elde etmeye çalışmıştır. Al Salameh ve Hassouna (2010), çalışmalarında farklı tek devre ve çift devre iletim hatları için hat iletkenlerinin yerini parçacık sürü algoritması ile düzenleyerek elektromanyetik alanı minimize etmeye çalışmışlardır.

Literatürde hibrit direklerdeki iletkenlerin konumunu düzenleyerek çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada dönüştürülmesi planlanan hibrit direk yapısı için iletkenlerin konumunu yeniden düzenleyerek havai iletim hatlarının kullanımını iyileştirmede denizanası arama optimizasyon yöntemi önerilmiştir. Bu bölümde, önerilen hibrit direk yapısında iletkenlerin konumlarını düzenlemek suretiyle zemin seviyesinde tüm çevresel etkiler minimize edilmeye çalışılmıştır.

4.1. Denizanası Arama Algoritması

Optimizasyon probleminin temel amacı, iletim hattı tasarımında zeminde oluşan elektrik ve manyetik alan seviyelerini minimize etmektir. Optimizasyon probleminin çözümünde amaç fonksiyonunun yanı sıra, dikkate alınması gereken başka önemli faktörler de vardır. Bunlar, amaç fonksiyonunun maksimize edilmesi mi yoksa minimize edilmesi mi gerektiği, tasarım değişkenlerinin ne olduğu ve uygulanacak kısıtlamaların teknik, operasyonel veya ekonomik nitelikte olup olmadığıdır.

Bir optimizasyon problemi, problemin bağlı olduğu ve yan kısıtlamaları sağlayan değişkenler vektörü x , problemin amacını matematiksel olarak temsil eden amaç fonksiyonu $f(x)$ ve son olarak koşullar veya kısıtlamalar $g(x)$ ve $h(x)$ olmak üzere denklem (86)-(88)'deki gibi tanımlanabilir. Koşullar ve kısıtlamalar eşitlikler ($h(x) = 0$) veya eşitsizlikler ($g(x) \leq 0$) şeklinde olabilir (Vanderplaats, 1999).

$$\min(\max) f_i(x), x = \{x_1, x_2, \dots, x_a\} \quad (86)$$

$$g_j(x) \leq 0, (j = 1, 2, \dots, b) \quad (87)$$

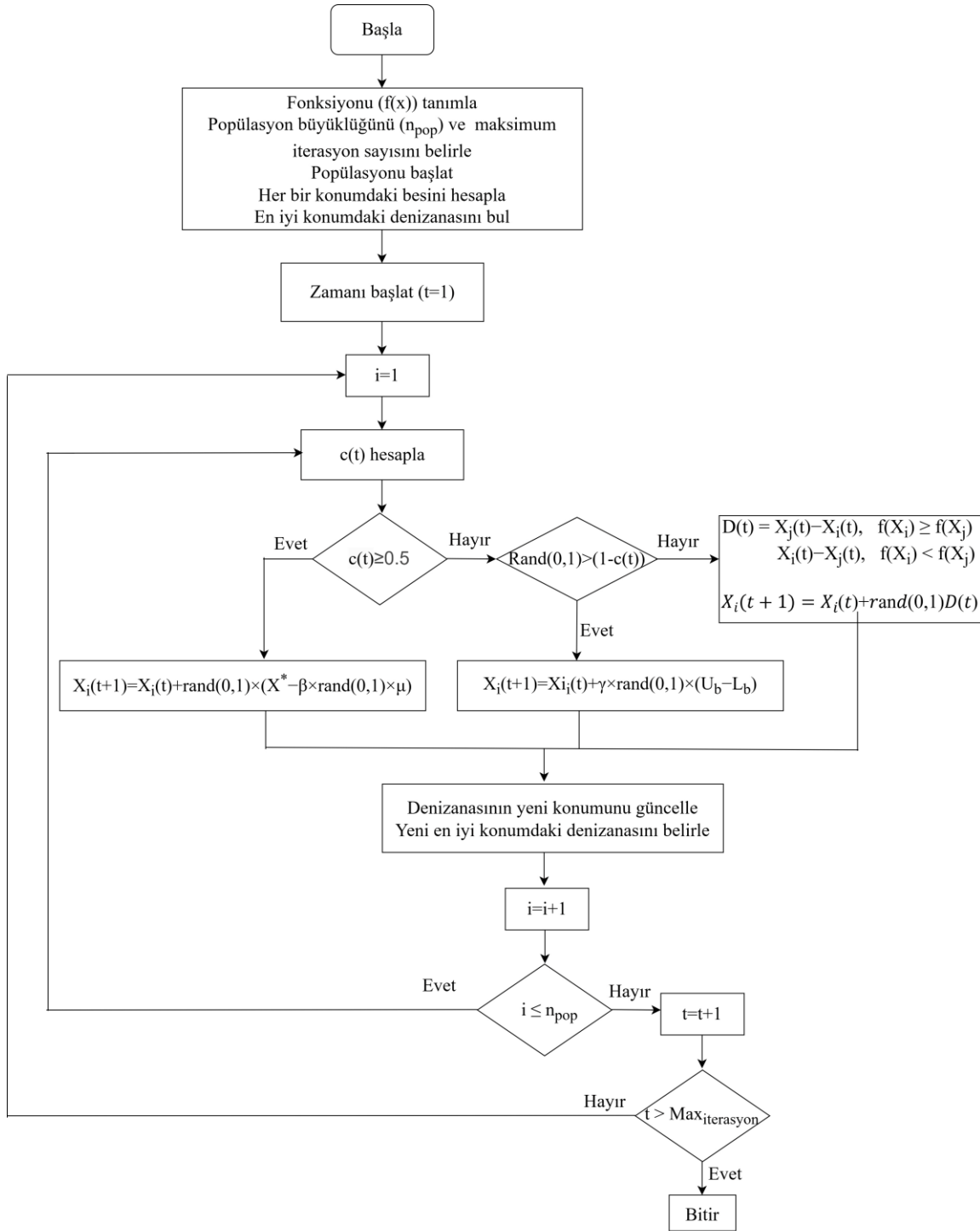
$$h_k(x) = 0, (k = 1, 2, \dots, c) \quad (88)$$

Denizanası Arama (JS) Algoritması, denizanelerinin denizlerde ve okyanuslarda yiyecek arama davranışlarına dayalı bir optimizasyon algoritmasıdır (Chou & Truong,

2021). Denizanaları iki farklı hareket türüne sahiptirler. İlki okyanus akıntılarına ve gelgitlere bağlı olarak sürüklenerek yaptıkları harekettir. İkincisi ise sürüye bağlı olarak yaptıkları harekettir (Chou & Truong, 2021). Algoritma denizanasının hareketine bağlı olarak besin bulmaya çalışır. Besin kaynağı çözüm uzayında herhangi bir çözüme denk gelen amaç fonksiyonu tarafından belirlenir. Denizanası arama algoritması akış şeması Şekil 37'deki gibidir (Chou & Truong, 2021). Şekil 37'den görülebileceği üzere algoritma, fonksiyonun tanımlanması ve popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı gibi parametrelerin belirlenmesi ile başlar. Herhangi bir popülasyona dayalı metasezgide olduğu gibi, her denizanası bir bireyi temsil eder ve sayısı n_{pop} olarak gösterilir. Popülasyon, denklem (89) ile başlatılır (Chou & Truong, 2021).

$$X_{i+1} = 4X_i(1 - X_i), 0 \leq X_0 \leq 1 \quad (89)$$

X_i, i . Denizanasının konumunu X_0 ise 0 ile 1 değerinde rastgele oluşturulan başlangıç değerini temsil eder. Daha sonra algoritma popülasyonu başlatarak her bir bireyin uygunluğunu hesaplayarak en iyi konumdaki denizanasını belirler. Sonra her bir konum için besin miktarı hesaplanarak en iyi uygunluk derecesine sahip denizanası belirlenir. Şekil 37'de gösterildiği gibi deniz anası ya kendi kendine ya da sürü içinde muhakkak zaman fonksiyonuna bağlı olarak hareket eder. Eğer zaman fonksiyonu $c(t) \geq 0.5$ ise birey okyanus akıntısını takip eder. Aksi takdirde ise denizanası sürü içinde hareket eder. Denizanasının sürü içindeki hareketi de aktif ve pasif olmak üzere kendi arasında ikiye ayrılmaktadır. Eğer $Rand(0,1) > (1 - c(t))$ ise deniz analarının sürü içindeki hareketi pasif olarak adlandırılır. Aksi takdirde ise deniz analarının sürü içindeki hareketi aktif olarak adlandırılır. Pasif harekette genellikle denizanası kendi konumları çevresinde hareket ederken aktif harekette rastgele bir başka denizanasına göre yönünü belirleyerek hareket eder (Chou & Truong, 2021).



Şekil 37. Denizanası Arama Algoritması akış şeması

Zaman fonksiyonuna ($c(t)$) bağılı olarak hareketi belirlenen denizanasının arama uzayının alt (L_b) ve üst (U_b) sınırlarında yeni konumu hesaplanır. Belirli durma kriteri karşılanana kadar algoritma devam eder en iyi sonuçları göstererek sonlandırılır.

4.2. Problemin Matematiksel Modeli

Yüksek gerilim hatları direkler üzerinde konumlanmış faz başına bir veya daha fazla iletkenlerden oluşan yapılardır. Yüksek gerilim hatlarında güç akışı, maliyet, enerji kaybı ya da farklı parametreler için ihtiyaca yönelik problem tanımlanabilir. İletim hatları tarafından yer seviyesinde üretilen elektromanyetik alanlar, insan güvenliği, çevresel hususlar ve düzenleyici standartlara uyum üzerindeki etkisi nedeniyle güç sistemi tasarımında önemli faktörlerdendir (Tarko vd., 2021). Yüksek elektrik alanları, korona deşarjı, radyo paraziti ve sağlık sorunları gibi istenmeyen etkilere yol açabilir. Bu nedenle, verimli güç iletimi sağlarken iletim hatlarının altındaki zemindeki elektromanyetik alanı en aza indirmek esastır.

Geleneksel iletim hatlarında fazlar arasındaki mesafeler ve iletkenlerin geometrik konfigürasyonları standartlaştırılmış ve simetriktir. Ama yapılan çalışmalar göstermiştir ki demet iletkenleri asimetrik olarak düzenlemek iletilen gücü arttırmada rol oynamaktadır (Borghei & Ghassemi, 2019; Khan & Ghassemi, 2023). Diğer taraftan böyle bir değişiklik iletkenin etrafındaki elektrik ve manyetik alanları da etkileyecektir. Moura ve arkadaşları (2022), çalışmalarında üç farklı direk tipi için iletkenlerin direk üzerinde yerleşimlerini düzenleyerek güç kapasitesinin 17.5% artabileceğini ve elektromanyetik alanların ise 30% civarında azalabileceğini ifade etmişlerdir.

4.2.1. Amaç Fonksiyonu

Bu çalışmada dönüştürülmesi planlanan hibrit direkte Denizanası Arama Algoritması kullanılarak optimum iletken yerleşimi ile zemindeki çevresel etkilerin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Literatürde hibrit direklerin çevresel etkilerinin minimize edilmesine yönelik çalışma bulunmamaktadır. Direğin merkezi orijin kabul edilerek direktteki her iletkenin yatayda (x_i) ve düşeyde (y_i) konumları optimizasyon probleminin karar değişkenlerini oluşturan (x_i, y_i) çiftlerini temsil eder. Herhangi bir noktadaki elektrik alan, manyetik alan direkt iletkenlerin konumuna bağlı bir $f(x, y)$ fonksiyonu ile ifade edilebilir.

Optimizasyon probleminin dört adet amaç fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlardan ilki denklem (90)'da ifade edildiği gibi iletkenlerin zeminde oluşturmuş olduğu toplam elektrik alanının minimize edilmesidir.

$$\min |E(f(x, y))| = \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \sqrt{\left(\frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right)^2 + \left(\frac{y-y_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \frac{y+y_i}{(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2} \right)^2} \quad (90)$$

İkinci amaç fonksiyonu ise denklem (91)'de ifade edildiği gibi iletkenlerin zeminde oluşturmuş olduğu toplam manyetik alanının minimize edilmesidir.

$$\min |B(f(x, y))| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N \frac{I_i}{2\pi} \left(\frac{y-y_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \right) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \frac{I_i}{2\pi} \left(\frac{x-x_i}{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \right) \right)^2} \quad (91)$$

Üçüncü ve dördüncü amaç fonksiyonları ise sırasıyla denklem (92)-(93) ve denklem (94)-(95)'te ifade edildiği gibi iletkenlerin zeminde oluşturmuş olduğu toplam işitilebilir gürültü ve radyo gürültüsünün minimize edilmesidir. AC hatlar için her fazın işitilebilir ve radyo gürültüsüne olan katkısı alınırken DC hatlar için yalnızca pozitif kutbun etkisi hesaba katılmıştır. İşitilebilir gürültü için BPA, radyo gürültüsü için de IREQ formülasyonları kullanılmıştır.

$$\dot{I}G_{SY}(AC) = 81.7 + 120 \log \frac{E_{max}}{E_0} + 55 \log \frac{d_{eq}}{d_0} - 11.4 \log D - 2.3 \quad (92)$$

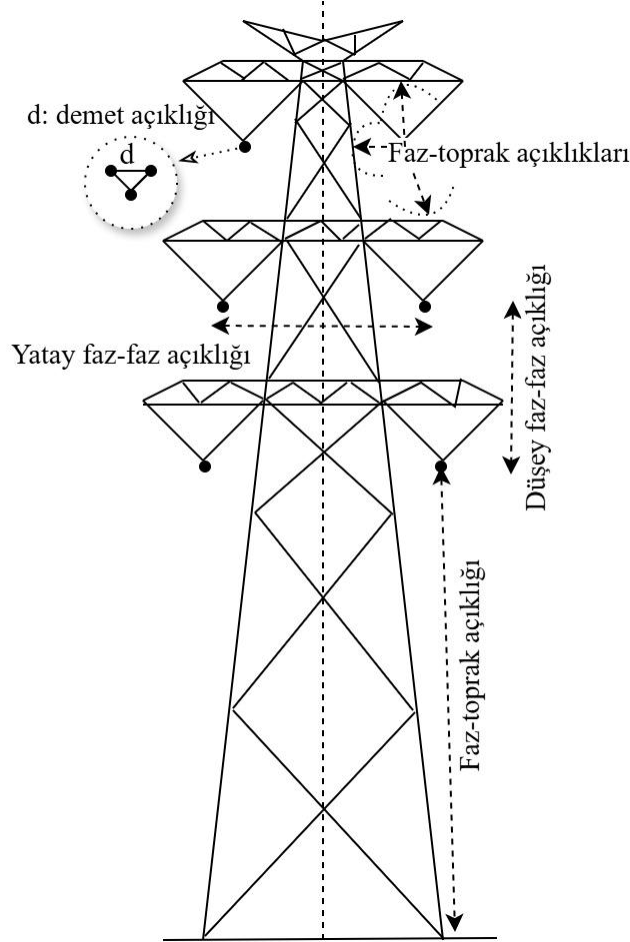
$$\dot{I}G_{GH}(DC) = 86 \log E + 25.6 \log(n) + 40 \log(d) - 11.4 \log(D) - 98.6 \quad (93)$$

$$RG_{SY}(AC) = -90.25 + 92.42 \log(E_{max}) + 43.02 \log(2r) - 6 \quad (94)$$

$$RG_{SY}(DC) = 90.25 + 94.42 \log(E_{max}) + 43.02 \log(2r) - 6 \quad (95)$$

4.2.2. Kısıtlamalar

Her algoritmada fonksiyonun sağlanması gereken eşitlikler ve eşitsizlikler en iyi çözüm kümesi elde edilebilmesi için tanımlanmalıdır. İletkenler, direk üzerinde yerleştirilirken belli elektriksel ve mekanik açıklık kriterlerini sağlanması gerekmektedir. Şekil 38’de tipik bir yüksek gerilim iletim direğinin elektriksel ve mekanik açıklıklarının gösterildiği geometrik konfigürasyon bulunmaktadır.



Şekil 38. Direkteki açıklıkların şematik gösterimi

Çalışmada kullanılan kısıtlar ve matematiksel ifadeler aşağıdaki gibidir.

- Demet Açıklığı:

Aynı demetteki iletkenlerin arasındaki mesafe ‘spacer’ ile korunur. Aksi takdirde rüzgâr sebebi ile fazların birbirine değmesi direğe ek kuvvet bindirir. Bu mesafe Amerika standartlarına göre 45,7 cm, Avrupa standartlarına göre 40 cm’dir. Demet açıklığı ile ilgili bir üst sınır bulunmamaktadır. Türkiye’de 400 kV hatların tümünde demet iletkenler

kullanılır ve genellikle 954 MCM kesit için 45 cm, 1272 MCM için 50 cm spacer damperler tercih edilir (M.Arı, 2011). Bu çalışmada alt iletkenler arası mesafe denklem (96)'deki gibi sınırlandırılmıştır.

$$40 \leq d \leq 50 \quad (96)$$

- Faz Açıklıkları:

Elektrik kuvvetli akım yönetmeliğine göre yüksek gerilimli havai hatlarda iletkenler arasında olması gereken en küçük mesafe denklem (97)'deki gibi hesaplanır.

$$D = 0.5\sqrt{(F_{mak} + I)} + \frac{U}{150} \quad (97)$$

Burada; ' F_{mak} ' hesaplanan direğin en büyük açıklığına ilişkin en büyük salgıyı, ' I ' taşıyıcı zincir izolatörün uzunluğunu ve ' U ' ise fazlar arası anma gerilimini göstermektedir. Üstteki denklem malzeme, kesit, salgı ve anma gerilimleri aynı olan iletkenler için geçerliken eğer direkt birden fazla sistem varsa her devre için en küçük mesafe hesaplanmalı ve elde edilen en küçük mesafelerden bulunacak değerlerin en büyüğü minimum mesafe olarak alınmalıdır (Resmî Gazete, 2000). Maksimum mesafe ise için belirlenen bir standart yoktur. Ortam kirliliği, gerilim seviyesi gibi faktörler büyük mesafeler gerektirse de direğin mekanik stabilitesi maksimum mesafeyi sınırlayan en önemli etkidir. Ekonomik etmenlerde yine maksimum mesafenin korunmasında etkilidir.

Enerji iletim hatlarında oluşan iç ve dış aşırı gerilimler arızaya neden olarak sistemin sürekliliğinde kesintiye neden olabilir. En bilindik aşırı gerilim çeşitleri güç frekansı, anahtarlama ve yıldırım aşırı gerilimleridir. İletim hatlarının daha güvenli çalışması ve atlama, geri atlama gibi olayların yaşanmaması fazlar arasında bulunması gereken minimum açıklıklar Tablo 9'da verilmiştir (Bhattarai vd., 2010; IEC, 60071-1). ± 500 kV DC hatlar içinde aşırı gerilimlerden kaynaklı olumsuz olayların yaşanmaması için minimum güvenlik mesafesi 2,2 m olarak belirlenmiştir (LaForest, 1981).

Tablo 9. 400 kV Havai hatlar için aşırı gerilim türlerine göre gerekli minimum açıklıklar (m)

Açıklık tipi	Güç Frekansı	Anahtarlama	Yıldırım
Faz-toprak	0.7	2.6	2.6
Faz-faz	1.17	3.6	2.85
Toprak	7.3		

- $E_{\max}$ Kısıtı:

İletkenlerin yüzeysel elektrik gradyanlarını belli bir değeri aşmamalıdır yoksa korona etkisi ile kayıplar artacaktır. Bu da yüksek gerilim iletim hatlarının verimliliğini düşürür.

- Yatay ve Dikey Sınırların Kısıtı:

İletkenlerin konumlandırılacağı bölgenin geometrik olarak sınırlanması gerekmektedir. Bu çalışmada geometrik sınırlar iletkenlerin yatayda ve dikeyde en yakın ve en uzak mesafe arasında sınırlanmasını gerektirir. Direk üzerinde bulunan her iletkenin sınırları denklem (98)-(99)'daki gereklilikleri sağlamakla yükümlüdür.

$$x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}, \quad i=1,2,...,N \quad (98)$$

$$y_{\min} \leq y_i \leq y_{\max}, \quad i=1,2,...,N \quad (99)$$

4.3. Optimizasyon Sonuçları

İletim hatlarının çevresel etkilerinin minimize edilmesi modern güç sistemlerinde kritik bir gerekliliktir. Elektriğin güvenli bir şekilde iletilmesini sağlayan iletim hatları yaydıkları elektromanyetik alanlar sebebiyle insan sağlığı üzerinde önemli olumsuz etkiler oluşturabilir. Bu etkiler, düzgün bir şekilde yönetilmezse, çevreyi ve halk sağlığını korumak için tasarlanmış düzenleyici kısıtlamaları aşabilir. İletim hatlarının çevresel ayak izlerini en aza indirmek için hatların tasarımını ve işletimini optimize etmek yalnızca düzenleyici bir gereklilik değil, aynı zamanda etik bir zorunluluktur. Bu tez kapsamında dönüştürülmesi planlanan hibrit direk üzerinde iletkenlerin konumu, belli gereksinim ve standartları karşılayarak farklı senaryolar için optimize edilerek en iyi performansı sağlaması

amaçlanmıştır. Hibrit direğin işletiminde dikkate alınması gereken amaç fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

- F_1 : Elektrik alanının minimizasyonu
- F_2 : Manyetik alanının minimizasyonu
- F_3 : İşitilebilir gürültünün minimizasyonu
- F_4 : Radyo gürültüsünün minimizasyonu

Yapılan tek amaçlı ve çok amaçlı optimizasyon işlemleri Tablo 10'da görüleceği gibi yedi farklı senaryo kapsamında çalıştırılmıştır.

Tablo 10. Optimizasyon senaryoları

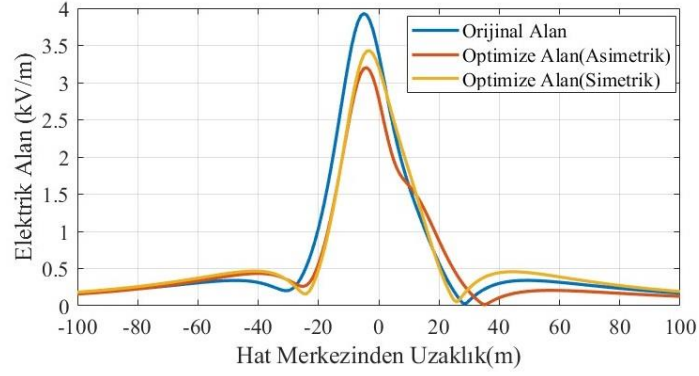
	F_1	F_2	F_3	F_4
Senaryo 1	X			
Senaryo 2		X		
Senaryo 3			X	
Senaryo 4				X
Senaryo 5	X	X		
Senaryo 6	X		X	X
Senaryo 7	X	X	X	X

Bu optimizasyon işlemleriyle, elektromanyetik alanlar ve gürültü seviyeleri gibi çevresel etkilerin kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamak, enerji sektörünün sürdürülebilir büyümesini desteklemek ve çevre standartlarına uyum sağlaması hedeflenir. Bu bağlamda hem teknik hem de çevresel faktörleri göz önünde bulunduran tek ve çok amaçlı optimizasyon yaklaşımları, iletim hatlarının çevreye uyumlu bir şekilde entegre edilerek ekosistemlerin ve toplulukların olası zararlardan korunması için çok önemlidir.

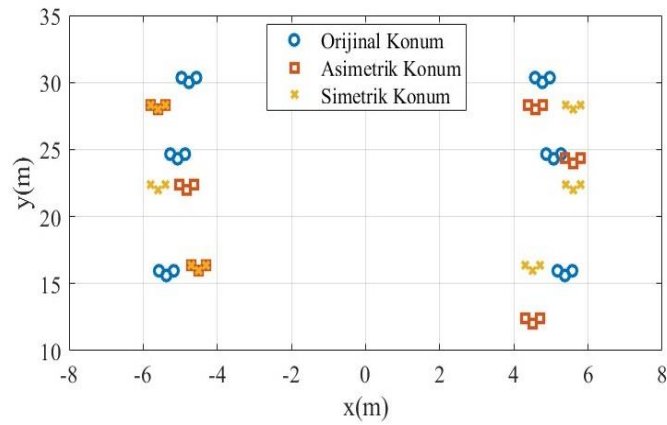
4.3.1. Tek amaçlı optimizasyon

- Senaryo 1:

İlk senaryoda hibrit direkte iletkenlerin konumu yerdeki elektrik alanı minimize etmek için optimize edilmiştir. Elektrik alanının minimizasyonu, özellikle yüksek gerilim iletim sistemlerinin tasarımı ve yönetiminde olumsuz çevresel etkileri azaltmak için elektrik alan yoğunluğunu en aza indirmeyi hedeflemektedir. İletkenlerin direk üzerinde yerleşimi genellikle simetrik tercih edilse de bazı çalışmalar geleneksel olmayan asimetrik yerleşimler ile de efektif kullanılacağını öngörmektedir (Arruda vd., 2020; Stephen & Iglesias, 2024; Arafat vd., 2024). Şekil 39'da tasarlanan hibrit direğin orijinal yapısının oluşturacağı alan ile optimize edilen yapılar ve oluşturacağı alanlar verilmiştir.



(a)



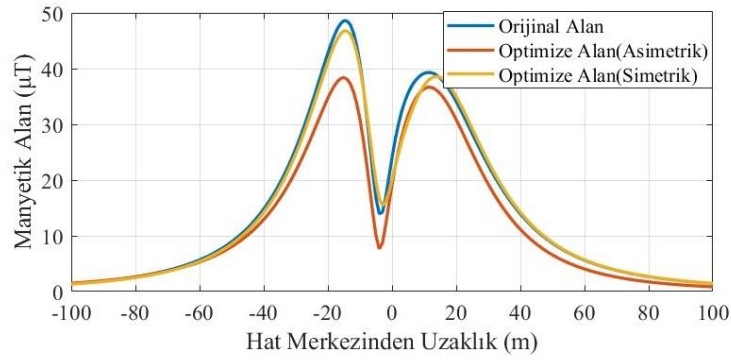
(b)

Şekil 39. F_1 amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen elektrik alan değerleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları

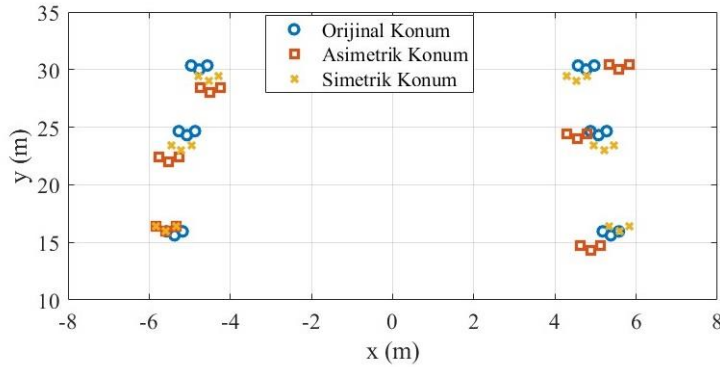
Konumlar optimize edilerek zemin üzerinde elektrik alan değeri azaltılabilir. Bu azalma, iletkenlerin simetrik yerleşimi ile 12.5% civarlarında iken asimetrik yerleşim ile %20'ye kadar çıkabilir.

- Senaryo 2:

İkinci senaryoda hibrit direkte iletkenlerin konumu yerdeki manyetik alanı minimize etmek için optimize edilmiştir. Manyetik alanın minimizasyonu, özellikle yüksek gerilim iletim sistemlerinin tasarımı ve yönetiminde olumsuz çevresel etkileri azaltmak için manyetik alan yoğunluğunu en aza indirmeyi hedeflemektedir. İlk senaryoda olduğu gibi bu senaryoda da iletkenlerin direk üzerinde yerleşimi simetrik ve asimetrik olması durumu için incelenmiştir. Şekil 40'ta tasarlanan hibrit direğin orijinal yapısının oluşturacağı manyetik alan ile optimize edilen yapılar ve oluşturacağı manyetik alan seviyeleri verilmiştir.



(a)



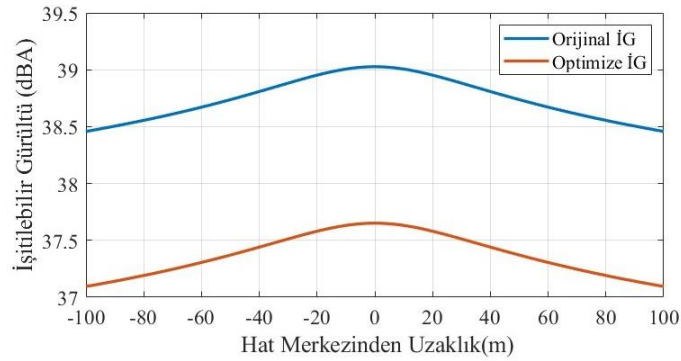
(b)

Şekil 40. F_2 amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen manyetik alan değerleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları

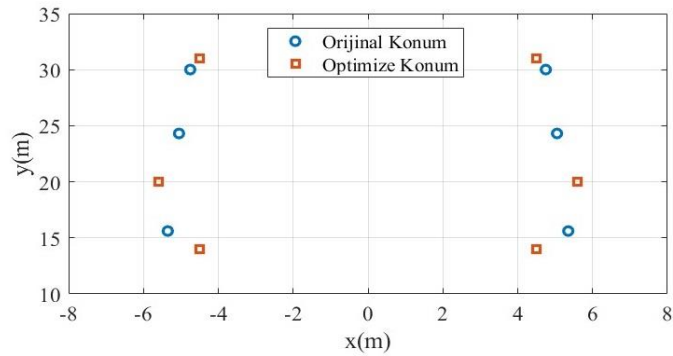
Konumlar optimize edilerek zemin üzerinde manyetik alan seviyeleri azaltılabilir. Bu azalma, iletkenlerin asimetrik yerleşimi ile %24 civarlarında iken simetrik yerleşimde çok daha az seviyelerde olmaktadır.

- Senaryo 3:

Üçüncü senaryoda hibrit direkte iletkenlerin konumu yerdeki işitilebilir gürültü (İG) seviyesini minimize etmek için optimize edilmiştir. Kentsel faaliyetlerin artması iletim hatları ile halk arasındaki mesafenin azalmasına neden olarak işitilebilir gürültü nedeniyle oluşan halk şikayetlerini artmasına neden olabilir. İG minimizasyonu, özellikle yüksek gerilim iletim sistemlerinin tasarımında olumsuz çevresel etkileri azaltmak için işitilebilir gürültü seviyesini en aza indirmeyi hedeflemektedir. İG hesaplanırken formülünün doğası sebebiyle demet iletkenlerin sayısını baz aldığı için sadece simetrik yerleşim için optimize edilmiştir. Şekil 41’te tasarlanan hibrit direğin orijinal yapısının oluşturacağı işitilebilir gürültü ile optimize edilen yapılar ve oluşturacağı işitilebilir gürültü seviyeleri verilmiştir.



(a)



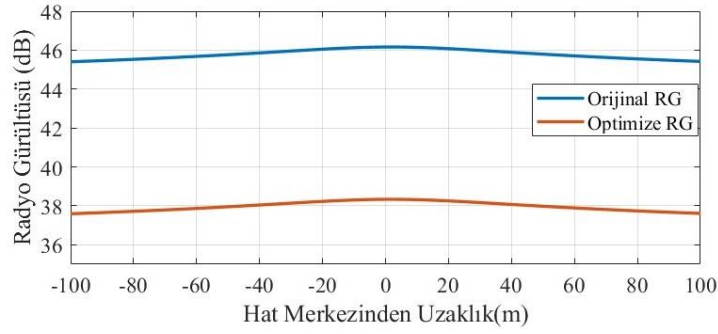
(b)

Şekil 41. F_3 amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen işitilebilir gürültü seviyeleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları

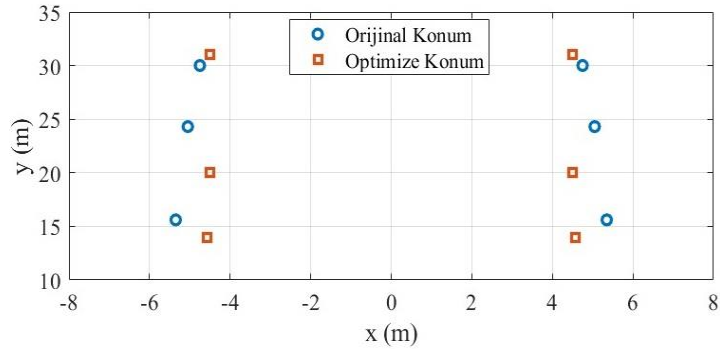
Konumlar optimize edilerek zemin üzerinde ışıtilebilir gürültü seviyesi 1.5 dBA azaltılabilir.

- Senaryo 4

Dördüncü senaryoda hibrit direkte iletkenlerin konumu yerdeki radyo gürültü seviyesini minimize etmek için optimize edilmiştir. Radyo gürültüsü yüksek gerilim güç altyapısına yakın bölgelerde iletişim sistemlerinin performansını ve güvenilirliğini etkileyen kritik bir parametredir. Özellikle yüksek gerilimli iletim hatları yakın mesafedeki radyo frekanslarını etkileyen girişimlere sebep olarak sistemlerde sinyal bozulmasına ya da tam sinyal kaybına neden olabilir. Radyo gürültüsü hesaplanırken formülünün doğası sebebiyle demet iletkenlerin sayısını baz aldığı için sadece simetrik yerleşim için optimize edilmiştir. Şekil 42’de tasarlanan hibrit direğin orijinal yapısının oluşturacağı radyo gürültüsü ile optimize edilen yapılar ve oluşturacakları radyo gürültü seviyeleri verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 42. F₄ amaç fonksiyonu için: (a) orijinal ve optimize edilen radyo gürültü seviyeleri, (b) orijinal ve optimize edilen iletken konumları

Konumlar optimize edilerek zemin üzerinde radyo gürültü seviyesi 7.5 dB azaltılmıştır. Hibrit 1 konfigürasyonu için iletkenlerin orijinal ve optimize edilmiş koordinatları Tablo 11’de verilmektedir. 400 kV AC devrenin faz iletkenleri AC_1 , AC_2 , AC_3 ve ± 500 kV DC devrenin kutup iletkenleri DC_+ , DC_- , DC_0 olmak üzere senaryo 1 ve senaryo 2 için optimize edilen asimetric ve simetrik iletken konumları ile senaryo 3 ve senaryo 4 kapsamında optimize edilen simetrik iletken konumları metre cinsinden Tablo 11’de gösterilmektedir.

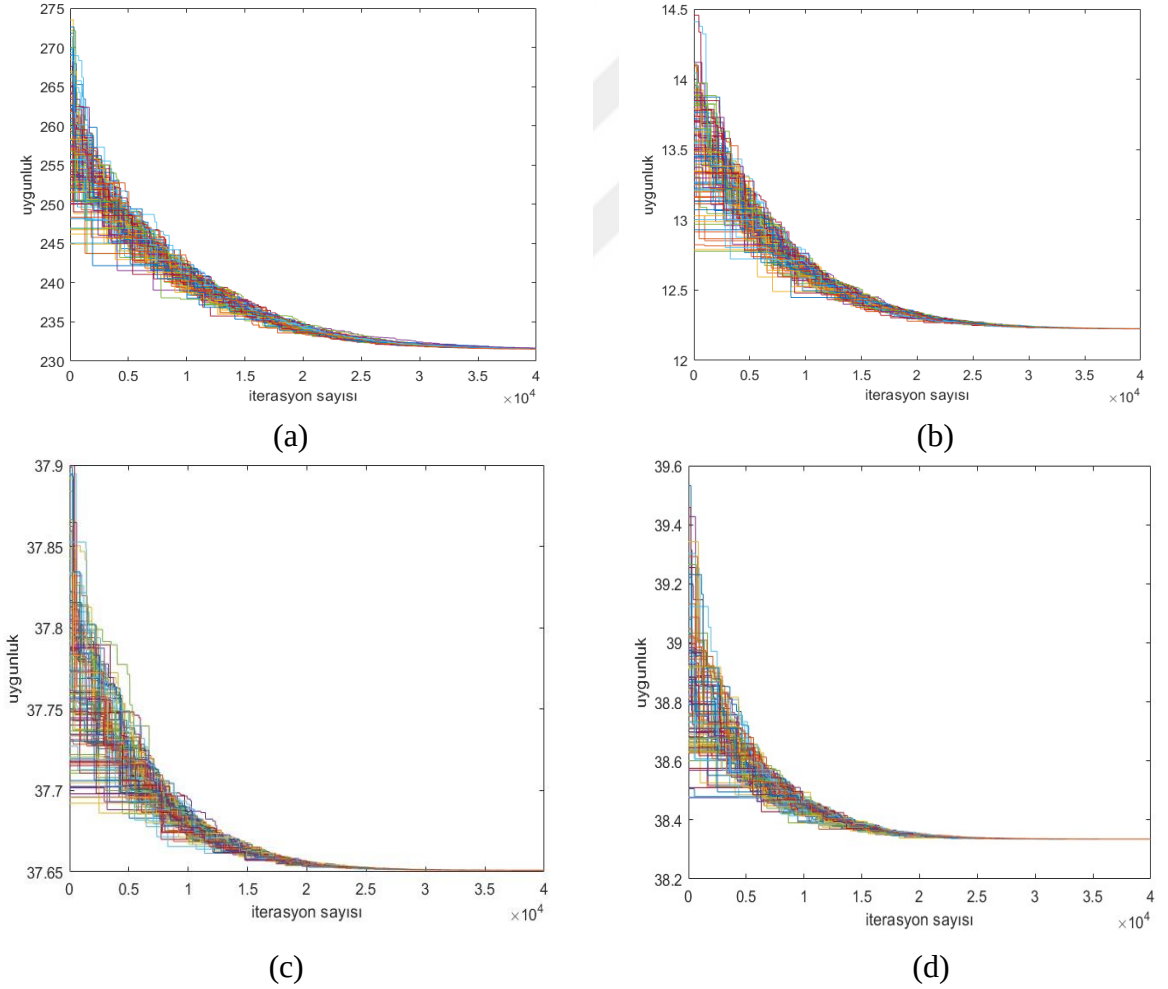
Tablo 11. Faz ve kutup iletkenlerinin direk üzerinde yerleşimi

Faz/Kutup		AC_1 (m)	AC_2 (m)	AC_3 (m)	DC_+ (m)	DC_- (m)	DC_0 (m)
Orijinal		x(-4.75) y(30.4)	x(-5.05) y(24.7)	x(-5.35) y(16)	x(4.75) y(30.4)	x(-5.05) y(24.7)	x(5.35) y(16)
F_1	Asimetrik	x(-5.589) y(28.231)	x(-4.818) y(22.232)	x(-4.5) y(16.23)	x(4.578) y(28.231)	x(5.587) y(24.228)	x(4.501) y(12.258)
	Simetrik	x(-5.589) y(28.231)	x(-5.589) y(22.23)	x(-4.5) y(16.23)	x(5.589) y(28.231)	x(5.589) y(22.23)	x(4.5) y(16.23)
F_2	Asimetrik	x(-4.503) y(28.313)	x(-5.494) y(22.484)	x(-5.588) y(16.287)	x(5.577) y(30.283)	x(4.545) y(24.283)	x(4.873) y(14.587)
	Simetrik	x(-4.538) y(29.274)	x(-5.212) y(23.269)	x(-5.588) y(16.287)	x(4.538) y(29.274)	x(5.212) y(23.269)	x(5.588) y(16.287)
F_3	Simetrik	x(-4.5) y(31)	x(-5.589) y(20)	x(-4.502) y(13.99)	x(4.5) y(31)	x(5.589) y(20)	x(4.502) y(13.99)
F_4	Simetrik	x(-4.5) y(31)	x(-4.5) y(20)	x(-4.577) y(14)	x(4.5) y(31)	x(4.5) y(20)	x(4.577) y(14)

Tablo 11’den görüleceği üzere ışıtilebilir gürültü ve radyo gürültüsünün minimize edilmeye çalışıldığı senaryolarda iletkenler aynı dikey yükseklikte konumlandırılmıştır. Ortadaki faz ve kutup iletkenlerinin diğer iletkenlere olan mesafeleri arttığında ışıtilebilir gürültü azalmıştır. Simetrik düzenleme ile daha dengeli bir yerleşim ile elektrik alan ve manyetik alan seviyeleri azaltılabilir. Asimetrik yerleşim ise elektromanyetik alan etkilerini sınırlamak için daha esnek bir yapı sunmaktadır. Ayrıca yeni direk tesis edilirken de bu yaklaşımla farklı kısıtlar eklenerek daha kompakt direkler tasarlanabilir. Böylelikle hem maliyetler azaltılabilir hem de irtifak hakkı izin süreçleri kolaylaştırılabilir.

4.3.2. Çok amaçlı optimizasyon

Tez kapsamında, ilk kez, Hibrit AC/DC iletim direğinde çok amaçlı optimizasyon problemi denizanası arama sezgisel algoritması kullanılarak çözülmüştür. Hibrit direklerin ilerleyen yıllarda kullanımının artacağı öngörülerek optimizasyon problemi farklı senaryolar için her biri 200 üye ile 40000 iterasyon olmak üzere 100 kez çalıştırıldı. Bu yaklaşım ile çözüm kümesinin daha geniş bir alanda taranması ve böylece kapsamlı ve çeşitli bir veri kümesinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Şekil 43(a) elektrik alan, Şekil 43(b) manyetik alan, Şekil 43(c) iletilebilir gürültü ve Şekil 43(d) radyo gürültüsü fonksiyonunun uygunluk değerlerinin iterasyon sayısı boyunca her bağımsız koşmada nasıl değiştiğini göstermektedir. Tüm grafikler iterasyon sürecinde arama uzayında daha iyi çözümlere doğru ilerleme eğilimi göstermektedir.



Şekil 43. a) Elektrik alan için b) Manyetik alan için c) İletilebilir gürültü için d) Radyo gürültüsü için iterasyon sayısı ile uygunluk derecesi değişimi gösterimi

Çok amaçlı optimizasyon problemi için 3 farklı senaryo belirlenmiştir. Fakat amaç fonksiyonları farklı birimlerde olduğu için hepsinin hemzeminde değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden oluşturulan veri setlerine normalizasyon işlemi uygulanması gerekmektedir. Literatürde verileri normalize etmek için min-max, Z-skor, medyan gibi farklı çeşitlerde normalizasyon teknikleri vardır (Singh & Singh, 2020).

Çok amaçlı optimizasyon işlemi için veri setine min-max normalizasyonu uygulanmıştır. Bu yöntemde, bir grup verinin içerisindeki en büyük ve en küçük değerler ele alınır. Diğer bütün veriler, bu değerlere göre normalleştirilir. Buradaki amaç en küçük değeri 0 ve en büyük değeri 1 olacak şekilde normalleştirmek ve diğer bütün verileri 0-1 aralığına yaymaktır (Er, 2017). X_i Girdi değeri olmak üzere, Normalize veri (x'), denklem (100) ile hesaplanır.

$$x' = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (100)$$

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde amaç fonksiyonlarına normalizasyon işlemi uygulandıktan sonra çözümlerin elde edilmesinde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bunlardan ilki ağırlıklı toplam metodu olarak isimlendirilmektedir (Marler & Arora, 2010). Bu yaklaşımda tek bir çözüm, her amaç fonksiyonuna belli ağırlık katsayıları eklenerek tek amaçlı optimizasyon problemine çevrilerek elde edilir. Çünkü her amacın ortak bir amaca olan katkısı farklı olabilir. Ağırlıklı toplam metodunda denklem (101)'deki gibi her amaca bir katsayı atayarak tüm amaçların toplamına bağlı tek bir amaç fonksiyonuna elde edilir.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (101)$$

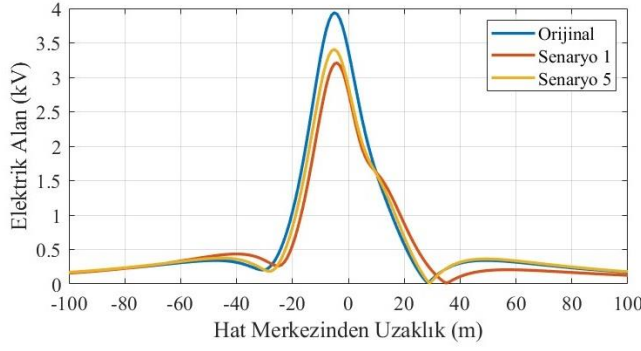
Ağırlıklı toplam metodunda tek bir çözüm elde edildiği için çözüm süreci daha basittir ve amaçlar arasında farklı katsayılar kullanılarak istenen sonuca göre tercih yapmak kolaylaşabilir. Diğer taraftan amaçlar çatıştığında herhangi bir çözümü yeterince optimize etmeyen bir çözüm elde edilebilir.

Çok amaçlı optimizasyonda kullanılan bir diğer yaklaşım ise Pareto yaklaşımıdır. Pareto yaklaşımında çözüm kümesi genellikle bir dizi pareto optimal çözümlerden oluşur. Pareto cephesi, arama uzayında birbirlerine baskın olmayan ancak diğer çözümlerden daha üstün olan çözümlerin bulunduğu kümedir. En az bir amacı dezavantajlı hale getirmeden

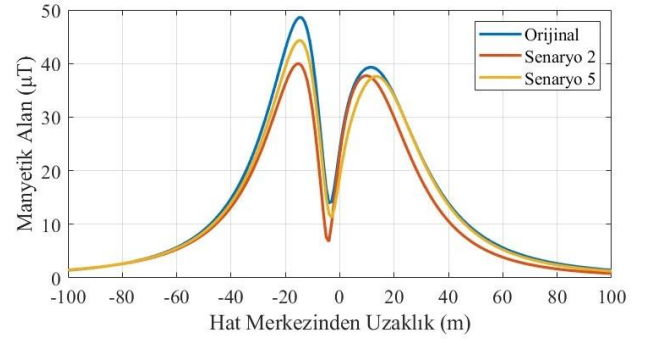
amaçların uzlaştığı dengeli çözüm kümesi Pareto optimalliği olarak isimlendirilir (Baumgartner vd., 2004).

- Senaryo 5

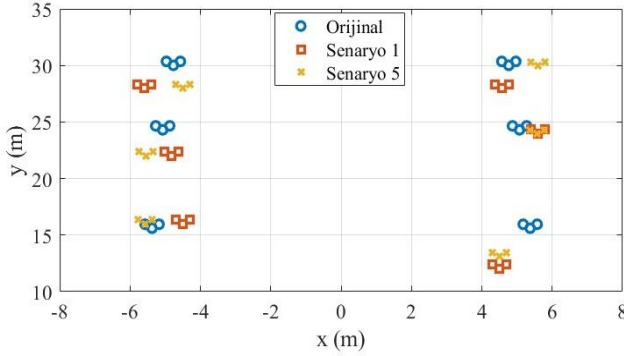
Bu senaryoda hibrit hattın elektrik alanı (F_1), manyetik alan (F_2) aynı anda minimize edilmeye çalışılmıştır. İlk olarak ağırlıklı toplam metoduna göre eşit derecede ağırlığa sahip iki amaç fonksiyonu simetrik ve asimetrik iletken yerleşimi için tek amaçlı optimizasyon problemine evrilmiştir. Elektrik alan ile manyetik alanın orijinal konfigürasyondaki değerleri ve iletkenlerin konumu, hem sadece elektrik alanın ya da manyetik alanın optimize edildiği hem de elektrik alan ile manyetik alanın birlikte optimize edildiği durum ile karşılaştırılmıştır. İletkenlerin asimetrik ve simetrik yerleşimi ile elde edilen karşılaştırma grafikleri sırasıyla Şekil 44 ve Şekil 45'te verilmektedir. Şekil 44(a)'da asimetrik iletken yerleşimli hibrit direğin orijinal konfigürasyonunda oluşan elektrik alan dağılımı, sadece elektrik alanın optimize edildiği Senaryo 1 ve elektrik ile manyetik alanın birlikte optimize edildiği Senaryo 5'teki elektrik alan dağılımları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 44(b)'de asimetrik iletken yerleşimli hibrit direğin orijinal konfigürasyonunda oluşan manyetik alan dağılımı, sadece manyetik alanın optimize edildiği Senaryo 2 ve elektrik ile manyetik alanın birlikte optimize edildiği Senaryo 5'teki elektrik alan dağılımları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 44(c), orijinal konfigürasyon ve optimize edilmiş senaryolarda (Senaryo 1 ve Senaryo 5) iletkenlerin yatayda ve dikeyde konumlarını göstermektedir. Şekil 44(d)'de yine orijinal konfigürasyon ve optimize edilmiş senaryolarda (Senaryo 2 ve Senaryo 5) iletkenlerin yatayda ve dikeyde konumlarını göstermektedir.



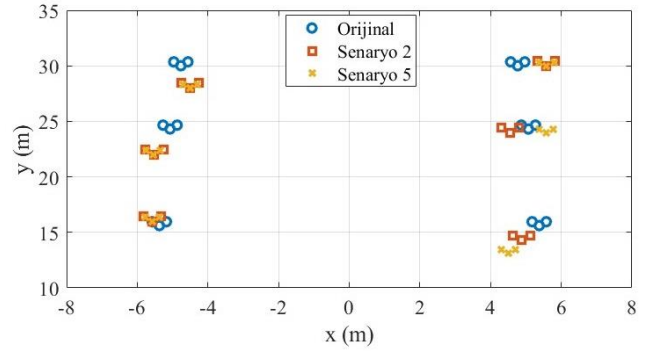
(a)



(b)



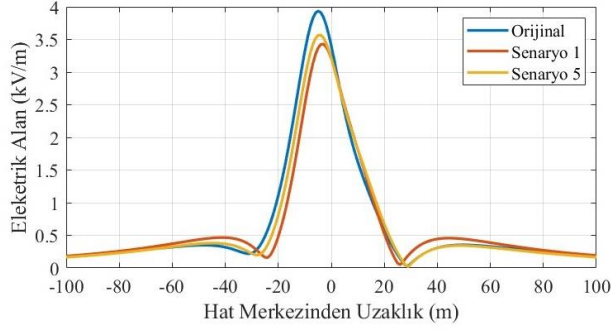
(c)



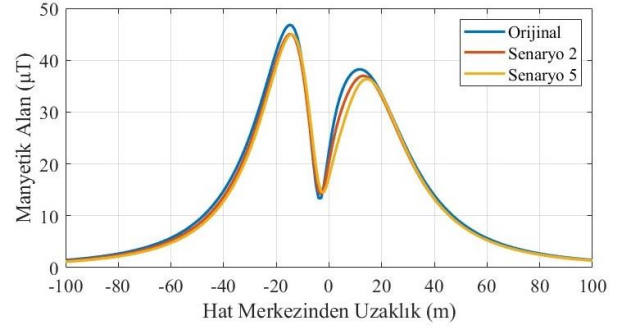
(d)

Şekil 44. Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen karşılaştırmalı elektrik alan ve manyetik alan ile iletkenlerin asimetrik konumları

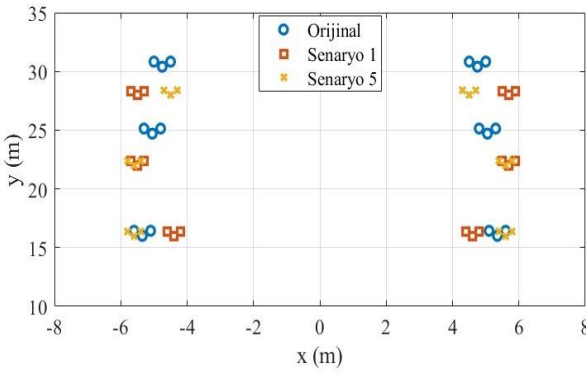
Şekil 45(a)'da simetrik iletken yerleşimli hibrit direğin orijinal konfigürasyonunda oluşan elektrik alan dağılımı, sadece elektrik alanın optimize edildiği Senaryo 1 ve elektrik ile manyetik alanın birlikte optimize edildiği Senaryo 5'teki elektrik alan dağılımları ile karşılaştırılmıştır. Şekil 45(b)'de simetrik iletken yerleşimli hibrit direğin orijinal konfigürasyonunda oluşan manyetik alan dağılımı, sadece manyetik alanın optimize edildiği Senaryo 2 ve elektrik ile manyetik alanın birlikte optimize edildiği Senaryo 5'teki elektrik alan dağılımları ile karşılaştırılmıştır.



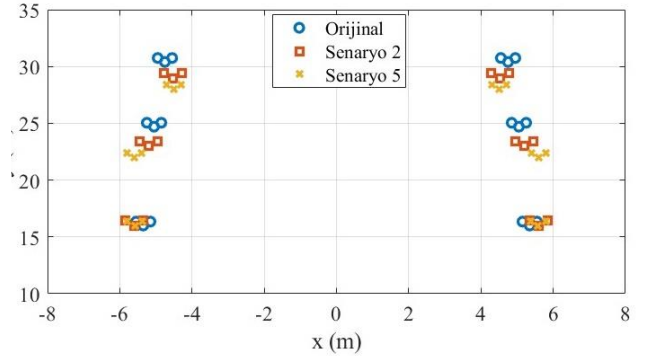
(a)



(b)



(c)



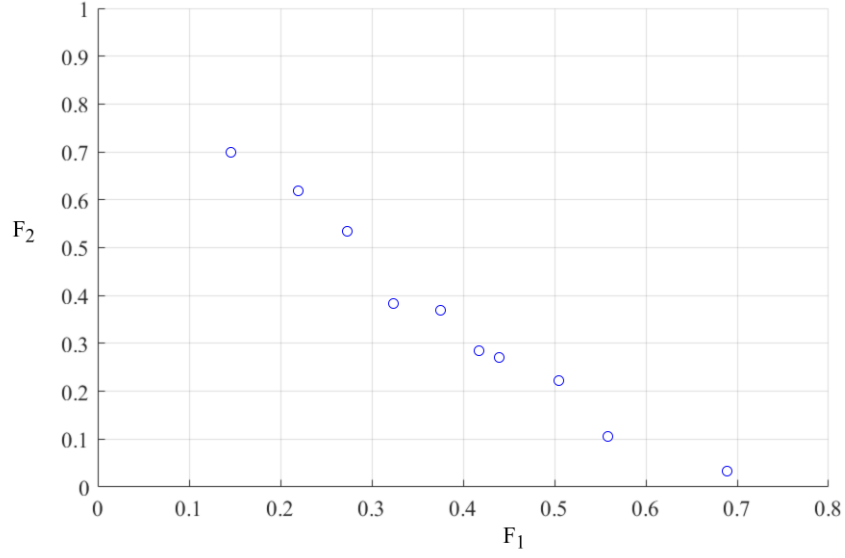
(d)

Şekil 45. Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen karşılaştırmalı elektrik alan ve manyetik alan ile iletkenlerin simetrik konumları

Şekil 45(c), orijinal konfigürasyon ve optimize edilmiş senaryolarda (Senaryo 1 ve Senaryo 5) iletkenlerin yatayda ve dikeyde konumlarını göstermektedir. Şekil 45(d)'de yine orijinal konfigürasyon ve optimize edilmiş senaryolarda (Senaryo 2 ve Senaryo 5) iletkenlerin yatayda ve dikeyde konumlarını göstermektedir.

Ağırlıklı toplam metodu ile çoklu amaç fonksiyonu optimize edildiğinde hem elektrik alan hem de manyetik alanın tepe değerlerinde azalma olmaktadır. Senaryo 2 ve Senaryo 5'in her ikisi de orijinaline göre iyileştirme elde etse de tek amaçlı optimizasyonda başarı oranı daha yüksektir. Ayrıca iletkenlerin simetrik yerleşimi söz konusu olduğunda iki amaç fonksiyonunun eşit ağırlıklandırılması manyetik alanın optimizasyonunda daha az başarılı olmuştur.

Elektrik ve manyetik alanın minimize etmeye çalışan iki amaçlı optimizasyon bağlamında tek bir çözüm yerine Pareto Yaklaşımı kullanılarak optimal çözümlerin kümesi elde edilebilir. Senaryo 5'teki optimizasyon probleminin Pareto çözüm kümesi Şekil 46'da görülmektedir.



Şekil 46. İki amacı optimize eden hibrit hattın Pareto cephesi görünümü

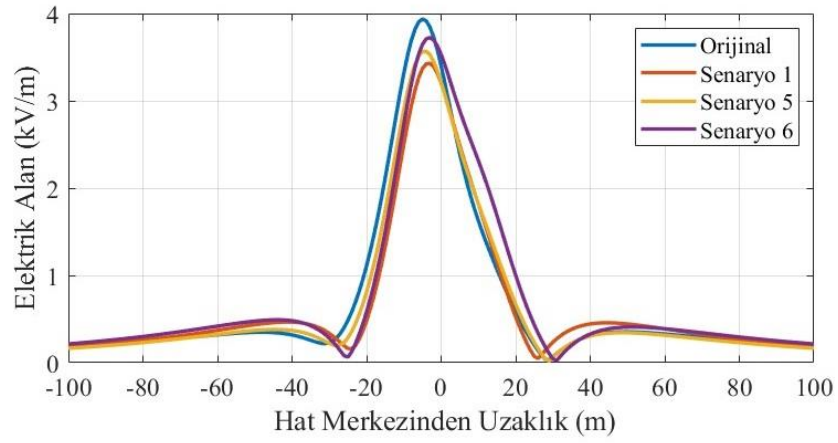
Belirli operasyonel gereksinimlere ve kısıtlamalara göre Pareto çözüm kümesinin kapsamlı değerlendirilmesi yapılarak çözüm alternatiflerinin avantaj ve dezavantajları belirlenebilir.

- Senaryo 6

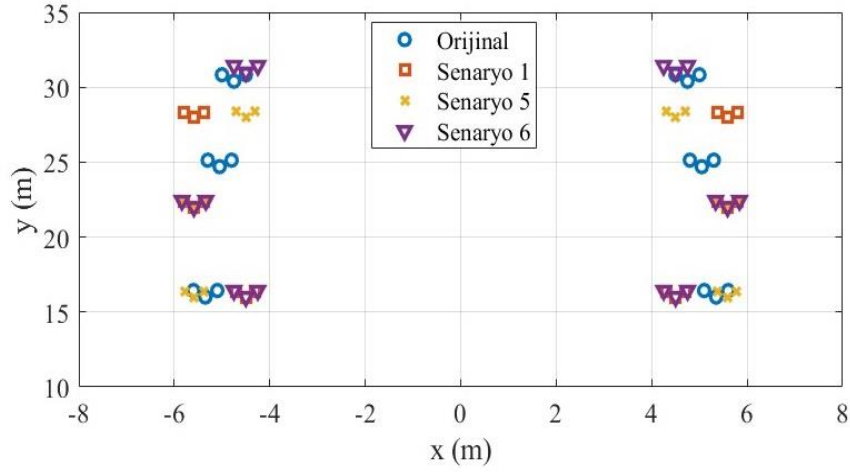
Bu senaryoda hibrit hattın elektrik alanı (F_1), işitilebilir gürültüsü (F_3) ve radyo gürültüsü (F_4) aynı anda minimize edilmeye çalışılmıştır. İlk olarak ağırlıklı toplam metoduna göre üç amaç fonksiyonu tek amaçlı optimizasyon problemine evrilmiştir. Ağırlık dereceleri denklem (102)'de verilmiştir.

$$F = 0.6 \times F_1 + 0.2 \times F_3 + 0.2 \times F_4 \quad (102)$$

Elektrik alanın orijinal ve farklı senaryolara göre optimize edilmiş değeri ile iletkenlerin konumunun değişimi Şekil 47'de verilmiştir. Şekil 47'den görüleceği üzere çok amaçlı optimizasyon işlemi yapıldığında yöntemin performansı birçok kritere odaklandığı için elektrik alandaki azalma tek amaçlı optimizasyona göre daha düşük olmuştur.



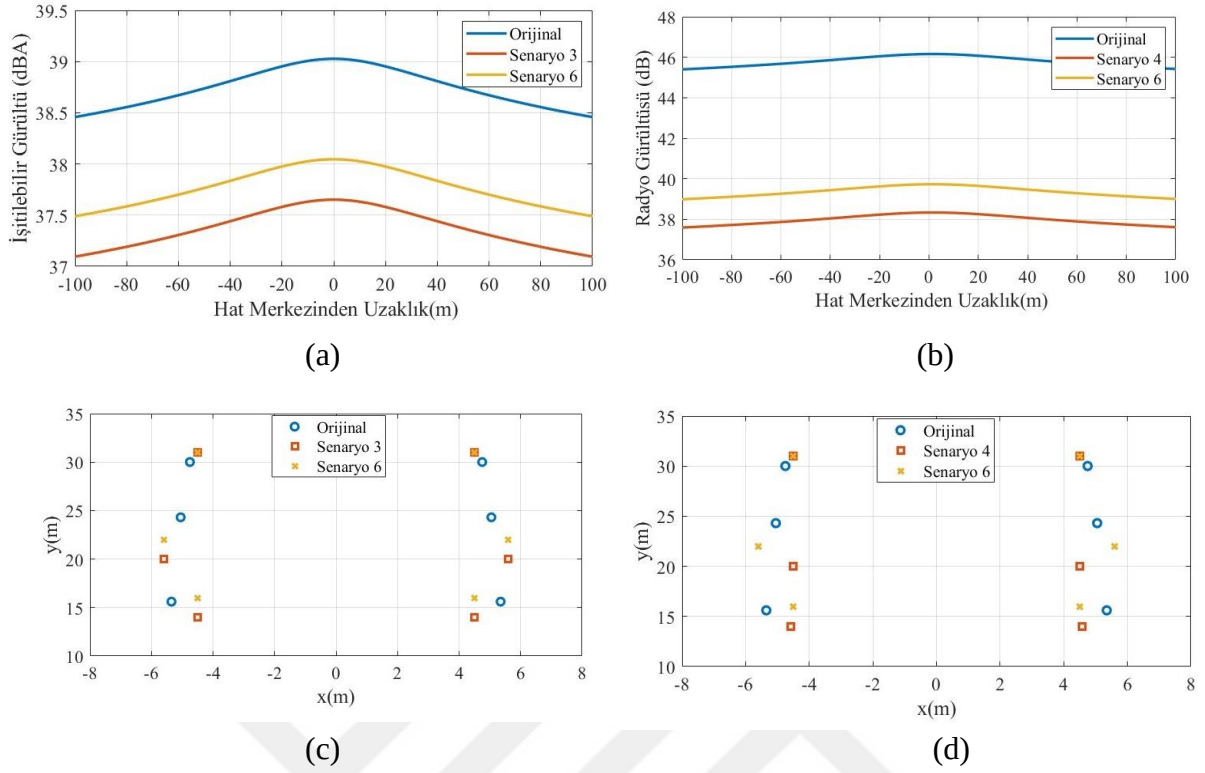
(a)



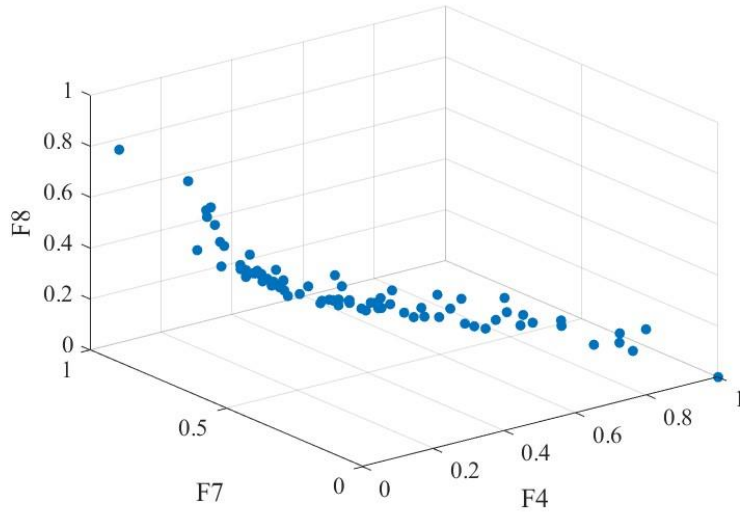
(b)

Şekil 47. Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen elektrik alan ile iletkenlerin konumları

İşitilebilir gürültü ile radyo gürültüsünün orijinal ve farklı senaryolara göre optimize edilmiş değeri ile iletkenlerin konumunun değişimi Şekil 48’de verilmiştir. Şekil 48’den görüleceği üzere çok amaçlı optimizasyon ile oluşması muhtemel işitilebilir gürültü seviyesinde 2.5% ve radyo gürültüsünde 13% azalma olmuştur.



Şekil 48. Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen ışıtlebilir gürültü ve radyo gürültüsü ile iletkenlerin konumları

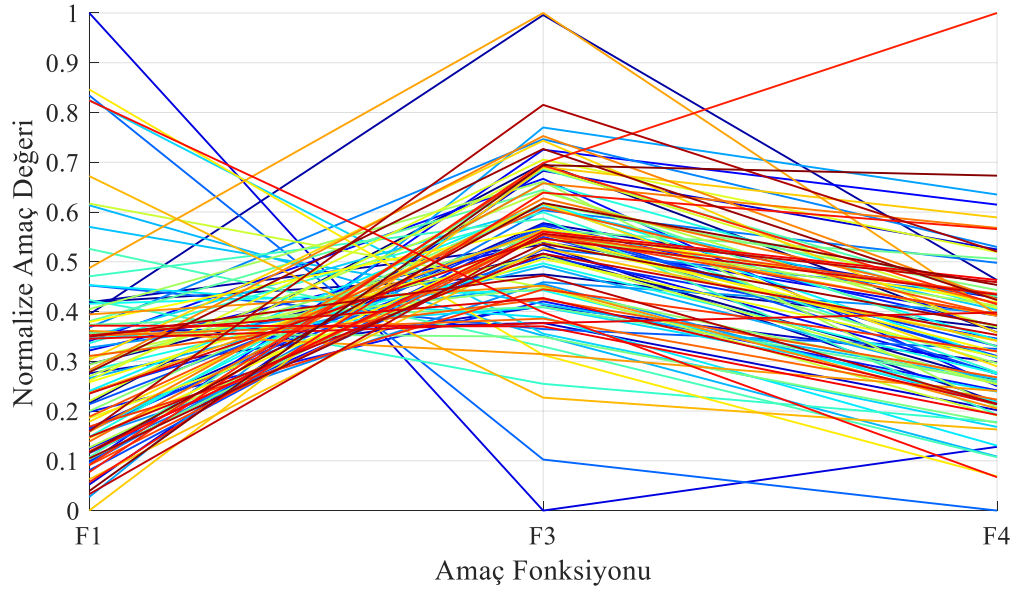


Şekil 49. Üç amacı optimize eden hibrit hattın Pareto cephesi görünümü

Şekil 49’da elektrik alan (F_1), ışıtlebilir gürültü (F_3) ve radyo gürültüsü (F_4) olmak üzere üç boyutlu optimizasyon probleminin pareto yüzeyi görülmektedir. Noktaların

dağılımı amaçlar arasında karmaşık bir ilişki olduğunu göstermektedir. Üç amacı aynı anda optimize etmek oldukça güçtür.

Büyük boyutlu uzayda amaçların görselleştirilmesi zor olabilir. İki çözümü birleştiren doğrunun eğimi ne kadar belirgince aralarında olası bir çatışma olasılığı o kadar yüksektir. Bu durum değer yolu grafiği ile gösterilebilir. Bu gösterim ile değişkenler arasındaki karmaşık etkileşim daha net gözükebilir. Bir veya daha fazla veride daha iyi sonuç elde edebilmek için diğerlerinde daha yüksek seviyeleri göze almak gerekebilir. Kısaca değer yolu grafiği çözüm yolu uzayının farklı amaçlar için performansını gösterir. İki amacı birleştiren doğrunun eğimi ne kadar sertse, amaçlar arasında çatışma olma olasılığı o kadar yüksektir (Angelo vd., 2023).



Şekil 50. Üç amacı optimize eden hibrit hattın değer yolu grafiği

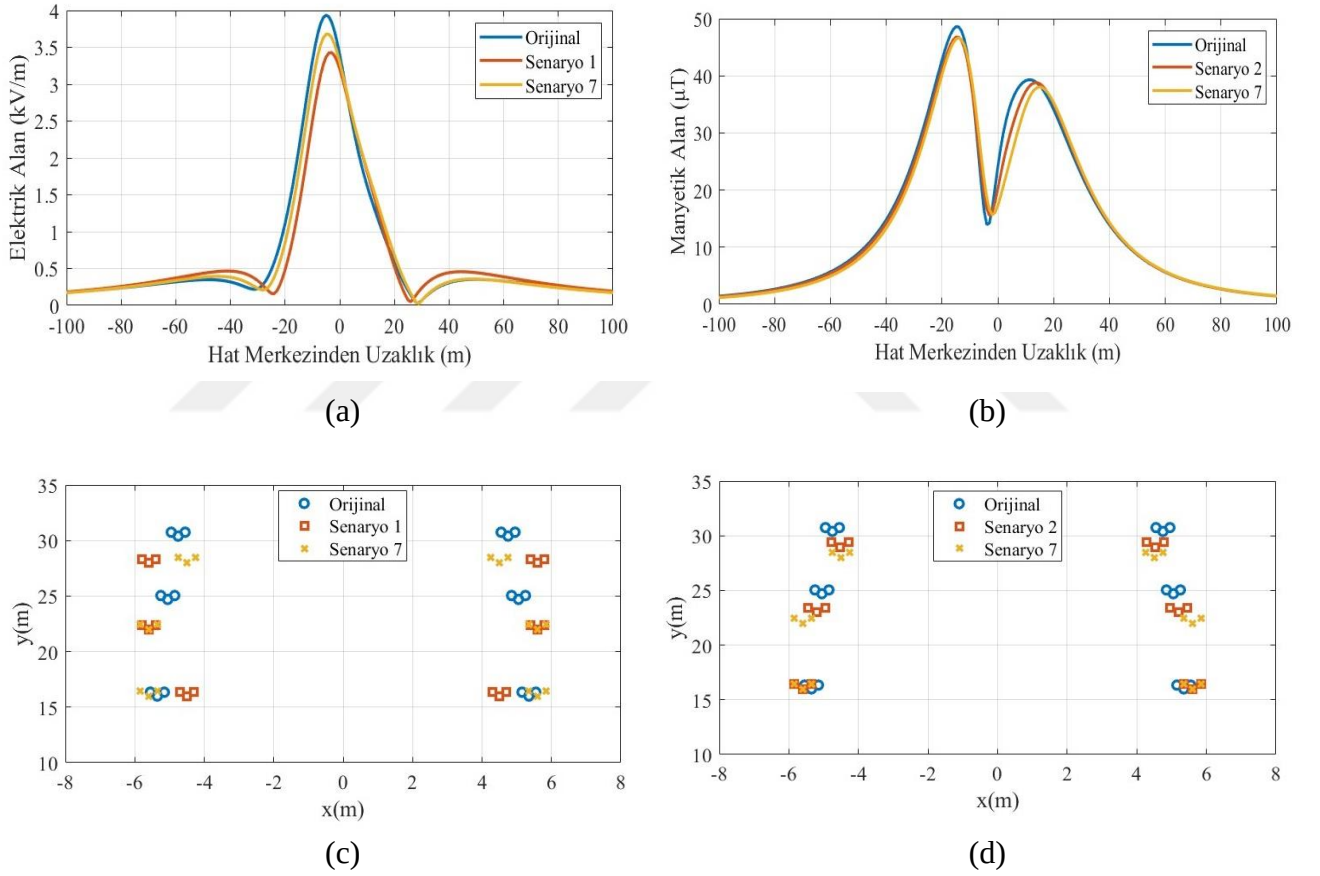
Şekil 50’de F_1 , F_3 ve F_4 fonksiyonlarının normalize değerlerinin farklı çözümler arasında nasıl değiştiği görülmektedir. F_3 fonksiyonu belli bir aralığa yakınsarken, F_1 ve F_4 fonksiyonları problemin çözümünde daha fazla değişkenlik göstermektedir. Grafik tüm amaçlar için çözüm alanını etkili bir şekilde araştırmaktadır.

- Senaryo 7

Bu senaryoda hibrit hattın elektrik alanı (F_1), manyetik alanı (F_2), işitilebilir gürültü seviyesi (F_3) ve radyo gürültü seviyesi (F_4) aynı anda minimize edilmeye çalışılmıştır.

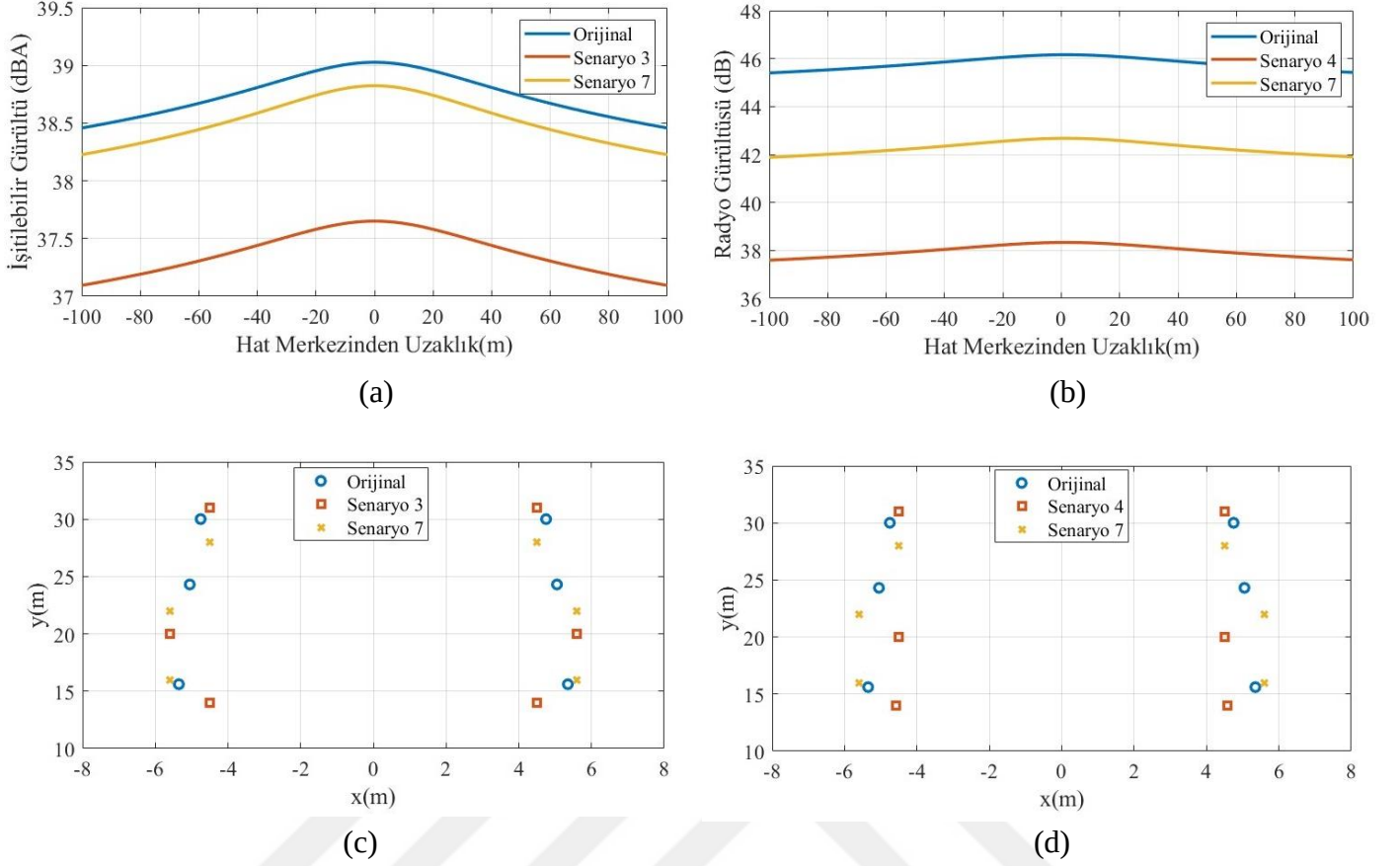
$$F = 0.4 \times F_1 + 0.4 \times F_2 + 0.1 \times F_3 + 0.1 \times F_4 \quad (103)$$

Elektrik alanının ve manyetik alanının orijinal ve farklı senaryolara göre optimize edilmiş değeri ile iletkenlerin konumunun değişimi Şekil 51’de verilmiştir.



Şekil 51. Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen elektrik alan ve manyetik alan ile iletkenlerin konumları

İşitilebilir gürültü ve radyo gürültüsünün orijinal ve farklı senaryolara göre optimize edilmiş değeri ile iletkenlerin konumunun değişimi Şekil 52’de verilmiştir.



Şekil 52. Ağırlıklı toplam metoduyla optimize edilen işitilebilir gürültü ve radyo gürültüsü ile iletkenlerin konumları

İşitilebilir gürültüyü minimize etmek için farklı senaryolar kapsamında faz ve kutup iletkenlerinin yatayda ve düşeyde en uygun geometrik konumları Tablo 12’de metre cinsinden verilmektedir.

Tablo 12. İşitilebilir gürültü için iletken konumlarının karşılaştırılması

Orijinal	Senaryo 3	Senaryo 6	Senaryo 7
AC_1 (-4.75,30.4)	AC_1 (-4.5,31)	AC_1 (-4.5,31)	AC_1 (-4.5,28)
AC_2 (-5.05,24.7)	AC_2 (-5.589,20)	AC_2 (-5.589,21.99)	AC_2 (-5.589,22)
AC_3 (-5.35,16)	AC_3 (-4.502,13.99)	AC_3 (-4.501,16.39)	AC_3 (-5.589,16.25)
DC_+ (4.75,30.4)	DC_+ (4.5,31)	DC_+ (4.5,31)	DC_+ (4.5,31)
DC_- (5.05,24.7)	DC_- (5.589,20)	DC_- (5.589,21.99)	DC_- (5.589,22)
DC_0 (5.35,16)	DC_0 (4.502,13.99)	DC_0 (4.501,16.39)	DC_0 (5.589,16.25)

Tablo 12’de gösterildiği gibi topraktan en uzak faz ve kutup iletkenleri orijinal yatay konumuna daha yakın konumlanmıştır. Diğer faz ve kutup iletkenlerinin yatayda ve düşeyde konumu senaryo bazlı değişmektedir.

Radyo gürültüsünü minimize etmek için farklı senaryolar kapsamında faz ve kutup iletkenlerinin yatayda ve düşeyde en uygun geometrik konumları Tablo 13’te metre cinsinden verilmektedir. Tablo 13’te gösterildiği gibi çok amaçlı senaryolar kapsamında en yüksekteki ve ortadaki faz-kutup iletkenleri yatayda, ortadaki ve en alttaki faz-kutup iletkenleri düşeyde benzer koordinatlarda konumlanmaktadır.

Tablo 13. Radyo gürültüsü için iletken konumlarının karşılaştırılması

Orijinal	Senaryo 4	Senaryo 6	Senaryo 7
AC_1 (-4.75,30.4)	AC_1 (-4.5,31)	AC_1 (-4.5,31)	AC_1 (-4.5,28)
AC_2 (-5.05,24.7)	AC_2 (-4.5,20)	AC_2 (-5.589,21.99)	AC_2 (-5.589,22)
AC_3 (-5.35,16)	AC_3 (-4.577,14)	AC_3 (4.501,16.39)	AC_3 (-5.589,16.25)
DC_+ (4.75,30.4)	DC_+ (4.5,31)	DC_+ (4.5,31)	DC_+ (4.5,28)
DC_- (5.05,24.7)	DC_- (4.5,20)	DC_- (5.589,21.99)	AC_2 (5.589,22)
DC_0 (5.35,16)	DC_0 (4.577,14)	DC_0 (4.501,16.39)	DC_0 (5.589,16.25)

Elektrik alanı minimize etmek için farklı senaryolar kapsamında faz ve kutup iletkenlerinin yatayda ve düşeyde en uygun geometrik konumları Tablo 14’te metre cinsinden verilmektedir. Tablo 14’te verilen koordinatlar her biri üç alt iletkenlerden oluşan iletkenlerin ağırlık merkezinin temsil etmektedir ve alt iletkenlerin her birinin konumu ilgili şekillerden görülebilir. Tablo 14’ten görüleceği üzere Senaryo 5 kapsamında faz iletkenlerinin konumu yatayda ve düşeyde benzerlik göstermektedir. Ama kutup iletkenlerin yatayda ve düşeyde bulundukları koordinatlar farklılık göstermektedir.

Tablo 14. Elektrik alan için iletken konumlarının karşılaştırılması

Senaryo 5 (Asimetrik)	Senaryo 5 (Simetrik)	Senaryo 6	Senaryo 7
$AC_1(-4.501,28.236)$	$AC_1(-4.5,28.24)$	$AC_1(-4.5,31.28)$	$AC_1(-4.5,28.289)$
$AC_2(-5.538,22.234)$	$AC_2(-5.58,22.24)$	$AC_2(-5.589,22.288)$	$AC_2(-5.589,22.288)$
$AC_3(-5.575, 16.229)$	$AC_3(-5.585,16.23)$	$AC_3(-4.5,16.28)$	$AC_3(-5.589,16.288)$
$DC_+(5.585, 30.172)$	$DC_+(4.5,28.24)$	$DC_+(4.5,31.28)$	$DC_+(4.5,28.289)$
$DC_-(5.57,24.172)$	$DC_-(5.58, 22.24)$	$DC_-(5.589,22.288)$	$DC_-(5.589,22.288)$
$DC_0(4.5,13.33)$	$DC_0(5.58,16.23)$	$DC_0(4.5,16.28)$	$DC_0(5.589,16.288)$

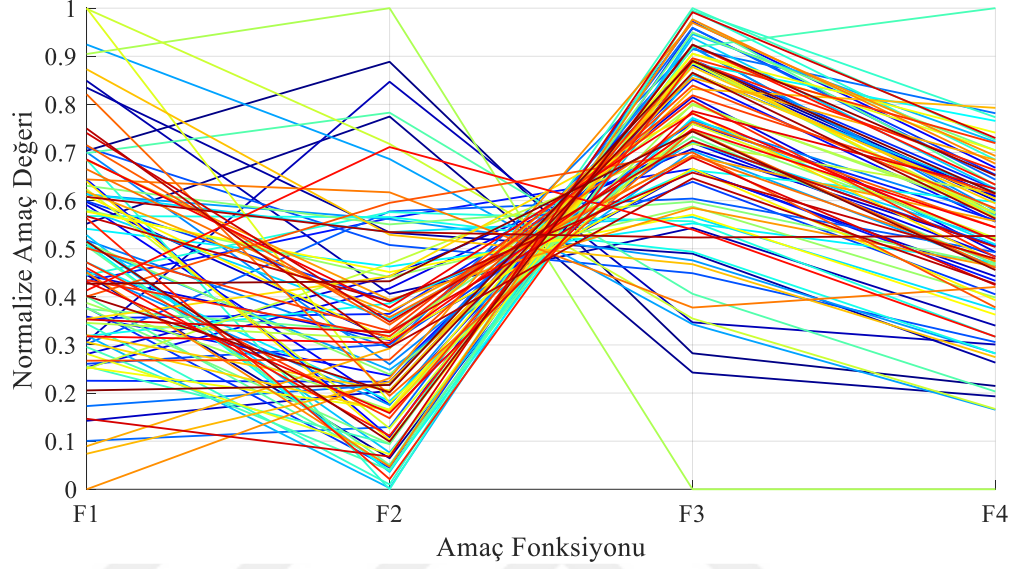
Manyetik alanı minimize etmek için farklı senaryolar kapsamında faz ve kutup iletkenlerinin yatayda ve düşeyde en uygun geometrik konumları Tablo 15'te metre cinsinden verilmektedir. Tabloda verilen koordinatlar her biri üç alt iletkenlerden oluşan iletkenlerin ağırlık merkezinin temsil etmektedir ve alt iletkenlerin her birinin konumu ilgili şekillerden görülebilir.

Tablo 15. Manyetik alan için iletken konumlarının karşılaştırılması

Senaryo 5 (Asimetrik)	Senaryo 5 (Simetrik)	Senaryo 6
$AC_1(4.501,28.236)$	$AC_1(-4.5,28.24)$	$AC_1(-4.5,28.289)$
$AC_2(-5.538,22.234)$	$AC_2(-5.58,22.24)$	$AC_2(-5.589,22.288)$
$AC_3(-5.575, 16.229)$	$AC_3(-5.585,16.2308)$	$AC_3(-5.589,16.288)$
$DC_+(5.585, 30.172)$	$DC_+(4.5,28.24)$	$DC_+(4.5,28.289)$
$DC_-(5.57,24.172)$	$DC_-(5.58, 22.24)$	$DC_-(5.589,22.288)$
$DC_0(4.5,13.33)$	$DC_0(5.58,16.23)$	$DC_0(5.589,16.288)$

Tablo 15'ten görüleceği üzere çok amaçlı optimizasyon senaryoları kapsamında faz iletkenlerinin konumu yatayda ve düşeyde benzerlik göstermektedir. Ama kutup iletkenlerinin yatayda ve düşeyde bulundukları koordinatlar farklılık göstermektedir. Kutup iletkenleri manyetik alanın minimize edilmesinde farklı senaryolar için farklı yüksekliklere konumlanmıştır.

Dört boyutlu bir pareto cephesi oluşturulduğunda amaçlar arasında direkt bir ilişki kurmak mümkün olmamaktadır. Her çözüm için amaçların normalleştirilmiş değerini sunan değer yolu grafiği Şekil 53'te verilmektedir. Değer yolu grafiği ile amaçlar arasındaki denge daha net şekilde ortaya konulabilir.



Şekil 53. Dört amacı optimize eden hibrit hattın değer yolu grafiği

Değerler pareto cephesindeki amaçların mevcut değerlerine göre normalize edildiği için bir amaçta elde edilen “1” değerinin 100% iyileşme anlamına gelmediğine dikkat edilmelidir. Dolayısıyla iletken yerleşimleri farklı sistem parametreleri ile değerlendirilerek işitilebilir gürültü, radyo gürültüsü, elektrik alan ve manyetik alan gibi çevresel etkiler optimize edilebilmektedir. Böylece gerek yeni direk tesisinde gerekse dönüştürülmesi planlanan direklerde iletkenlerin konumları değiştirilerek çevresel etkilerin azalmasına katkı sağlanabilir.

5. İLETİM SİSTEMİ MODELLENMESİ

Türkiye elektrik iletim altyapısı ülke genelinde elektriğin güvenilir ve verimli bir şekilde iletilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi tarafından işletilen şebeke 2024 yılı itibarı ile 75.526 km enerji iletim hattı uzunluğu ve 798 adet transformatör merkezinden oluşmaktadır (URL-5, 2024). İletim şebekesi, termik, hidroelektrik ve yenilenebilir enerji santralleri gibi elektrik üretim tesislerini son kullanıcılara hizmet veren dağıtım şebekelerine iletim hatları aracılığıyla bağlar. Türkiye elektrik iletim sisteminin nominal gerilimleri Türkiye Elektrik Şebeke Yönetmeliği'ne göre 400 kV, 154 kV ve 66 kV olarak belirlenmiştir (Resmî Gazete, 2014). Türkiye, son yıllarda artan elektrik talebini karşılamak ve özellikle rüzgâr ve güneş olmak üzere daha yüksek oranda yenilenebilir enerji kaynaklarını entegre etmek ve iletim altyapısını modernize etmek için önemli yatırımlar yapmıştır. Türkiye'nin Avrupa ve Asya'yı birbirine bağlayan stratejik konumu, komşu ülkelerle sınır ötesi bağlantıları geliştirme çabalarını da teşvik etmiş ve Türkiye'yi bölgesel elektrik ticaretinde önemli bir oyuncu haline getirmiştir. Bu gelişmelere rağmen, şebeke istikrarını korumak ve yoğun nüfuslu veya endüstriyel bölgelerdeki iletim darboğazlarını ele almak gibi zorluklar devam etmekte olup, sürekli yükseltmeler ve stratejik planlama gerektirmektedir. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024-2028 Stratejik Planı'nda hedeflenen maddelerden biri de elektrik iletim şebekesinin günümüz koşullarına göre güçlendirilmesidir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024).

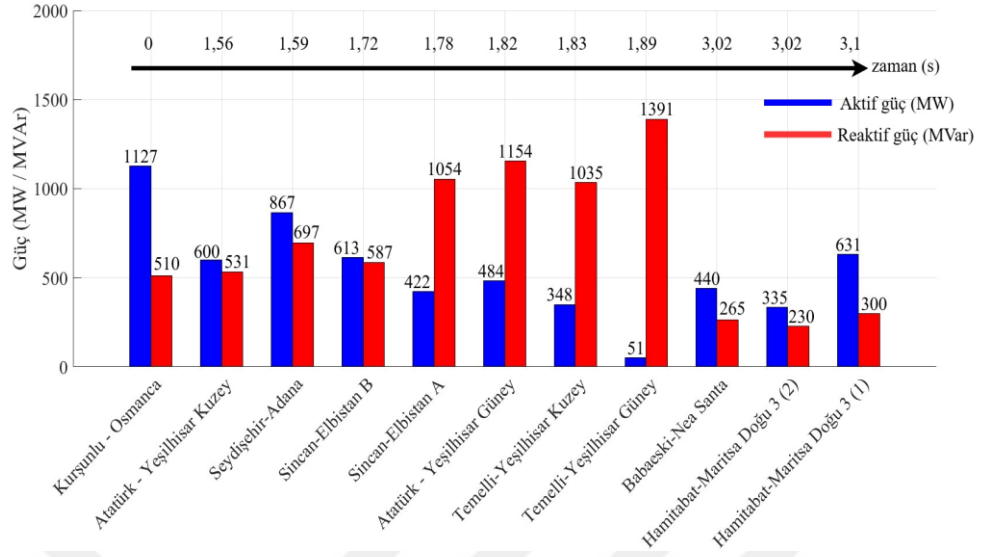
Türkiye elektrik iletim sistemi göz önüne alındığında Türkiye'nin doğu bölgesi hidrolik kaynaklar bakımından oldukça zengindir. Batı bölgesinde ise nüfus ve sanayinin yoğunlaşmasından mütevellit elektrik talebi fazladır. Dolayısıyla özellikle karların erimeye başladığı feyezan döneminde doğu bölgesinde elektrik üretimi artarak batı bölgesine elektrik iletim hatları ile taşınmaktadır. Doğu-batı aksında bulunan bu elektrik iletim koridorları üretim kaynaklarından dağıtım şebekelerine kadar uzun mesafelerde elektriğin güvenli bir şekilde iletilmesini sağlamada rol oynamaktadır. Doğu-batı aksında bulunan sekiz enerji koridoru Karadeniz, Doğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde üretilen elektriği Marmara, Ege ve Akdeniz Bölgelerine taşır. Yeni koridorlar tesis etmek yerine mevcut koridorların hibrit AC-DC'ye dönüştürülerek güçlendirilmesi bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Bu tez çalışması ile ulusal elektrik iletim sistemimizde geleceğe yönelik hibrit HVAC-HVDC yapılarının kullanımının mevcut elektrik şebekesi üzerindeki potansiyel etkilerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Bu tezde gerçekleştirilecek olan dinamik

çalışmaların temel amacı ulusal sistemin karşılaştığı bir dizi acil durum senaryosuna karşı sistemin davranışını değerlendirmektir. Bu çalışma 31 Mart 2015 tarihinde gerçekleşmiş olan Türkiye genelinde yaşanan büyük çaplı elektrik kesintisi vakasına dayanarak hibrit sistemin kesintilere olan etkisini analiz etmeyi hedeflemektedir. Türkiye yüksek gerilim iletim şebekesinin modellenmesi ve simülasyonlar Digsilent PowerFactory yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.1. 31 Mart 2015 Elektrik Kesintisi

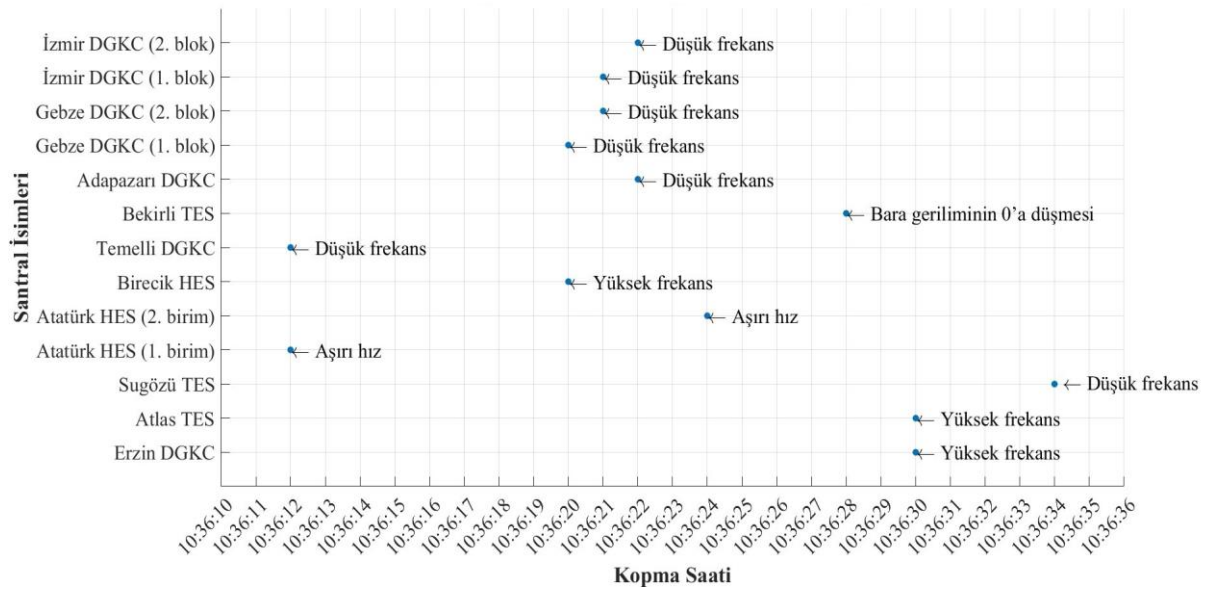
31 Mart 2015'te gerçekleşen elektrik kesintisi, 17 Ağustos 1999 depreminden sonraki en ciddi elektrik kesintilerinden biri olarak tarihe kaydedilmiştir. Türkiye elektrik sistemi, 400 kV iletim hatlarının aşırı yüklenerek servis dışı kalmasıyla başlayan olaylar silsilesi sonucu 12 sn içerisinde çökmüştür. Yaklaşık 8 saatlik kesinti, ülke ekonomisinde 1 milyar euroluk kayba neden olmuştur. TEİAŞ'ın yayınladığı 'Türkiye 31 Mart 2015 Sistem Çökmesi Raporu'nda 31 Mart 2015'te Doğu Karadeniz, Güneydoğu Anadolu ve Doğu Anadolu Bölgesindeki hidroelektrik santrallerin karların erimesi sebebi ile tam yükte çalıştığı ve Türkiye'nin doğu-batı aksında 400 kV Kayabaşı-Bağlum, Gölbaşı-Kayseri Güney, Gölbaşı-Kayseri Kuzey ve Oymapınar-Ermenek hatları ile 16 adet seri kapasitör bankının o gün farklı sebeplerden ötürü servis dışı olduğu ifade edilmiştir (TEİAŞ & ENTSO-E, 2015).

Kesintinin yaşandığı gün Türkiye'nin batı tarafının toplam talebi 21000 MW civarındadır. 16000 MW batıdaki santrallerden üretilirken 500 MW 'da Bulgaristan'dan ithal edilmektedir. Doğudan batıya iletilen güç ise toplam 4700 MW civarındadır. Rapora göre Çoruh nehri üzerinde bulunan Kuzey Doğu'daki HES'ler, yaklaşık 1300 km uzaklıktaki İstanbul'un büyük yük bölgesini beslerken, sistemde olmayan elemanlar doğu-batı transfer empedansının yükselmesine sebebiyet vermiştir. 1127 MW taşıyan Kurşunlu-Osmanca hattı aşırı yükten dolayı koparak sistemde açısız kararsızlığı başlatmıştır. Bu kritik hattın kopmasının ardından diğer hatlar da Şekil 54'te görüleceği üzere çok kısa süre içerisinde peş peşe açmış ve sistem doğu ve batı şeklinde ikiye bölünmüştür (TEİAŞ & ENTSO-E, 2015).



Şekil 54. Açma öncesi hatların güç değerleri ile hatların kopma sırası

Böylece bir anda batının yaklaşık 5000 MW'lık enerji açığı oluşmuştur ve bu ani dengesizlik doğu-batı ayrımından bir saniye sonra ENTSO-E ile senkronizasyonun kaybolmasına neden olarak Bulgaristan ve Yunanistan bağlantılarını da koparmıştır. Doğudaki santraller genellikle yüksek frekans sebebiyle batıdaki santraller genellikle düşük frekans sebebiyle Şekil 55'te görüleceği gibi şebekeden kopmuştur (TEİAŞ & ENTSO-E, 2015). Bu yüzden bölünmüş doğu ve batı alt sistemleri de çok kısa süre içerisinde tamamen çökmüştür.



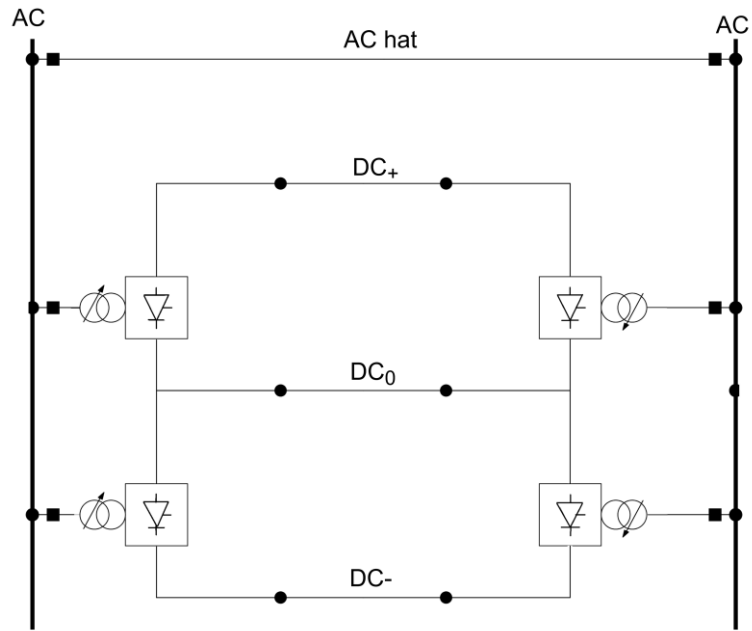
Şekil 55. Santrallerin şebekeden kopma saatleri ve sebepleri

Sonuç olarak 31 Mart 2015 tarihindeki elektrik kesintisi, Türkiye'de büyük çapta bir enerji krizine neden olarak elektrik iletim altyapısının sürekli iyileştirmelere tabii tutulması gerekliliğini doğurmuştur. HVDC sistemlerin küresel enerji altyapısındaki payı uzun vadede gittikçe artmaktadır. Dünya çapında birçok ülkede HVDC projesi uygulanıyor veya yapım aşamasındadır (Ludin vd., 2022). Bu tez çalışmasında da ulusal elektrik iletim altyapımızda hibrit şekilde HVDC sistemlerinin kullanımının etkisi 31 Mart elektrik kesintisi bağlamında analiz edilmiştir.

5.2. Türkiye Elektrik İletim Sistemi Modeli

Türkiye'nin mevcut elektrik iletim sistemi 400 kV gerilim seviyesindeki iletim hatları ve santraller 31 Mart 2015 tarihinde TEİAŞ'tan alınan gerçek zamanlı üretim ve tüketim bilgileri ışığında Digsilent PowerFactory programında modellenmiştir. Ayrıca 154 kV ve altındaki üretimlerin toplam değeri de yine modele dahil edilmiştir. Elektrifikasyon şemasına göre Türkiye elektrik iletim sistemi illerin bulunduğu coğrafi bölge baz alınarak her biri farklı renkte yedi ayrı bölge şeklinde modellenmiştir. Bölgelerin bu görsel farklılaştırılması, simülasyon içindeki farklı alanlar arasındaki sınırların ve etkileşimlerin daha etkili bir şekilde analiz edilmesini sağlamaktadır. Mavi ile temsil edilen Akdeniz bölgesi Şekil Ek 5.1'de gösterilmektedir. Tüm baralar elektrifikasyon şemasına göre isimlendirilmiştir. Akdeniz bölgesinde Sanibey, Ermenek, Oymapınar Hidroelektrik Santralleri, Atlas ve Sugöze Termik Santrali ve Erzin Doğalgaz Kombine Çevrim Santralleri direkt 400 kV iletim hatlarına bağlı büyük santraller bulunmaktadır. Bu bölgede yapılan elektrik üretimi Seydişehir-Adana ve Oymapınar-Ermenek hatlarının bulunduğu iki koridor üzerinden batıya iletilmektedir. Kırmızı ile temsil edilen Ege bölgesi Şekil Ek 5.2'de gösterilmektedir. Ege Bölgesi de yine termik santraller bakımından oldukça zengin bir bölgedir. Bölgedeki üretim ve tüketim değerleri gerçek veriler ışığında modellenmiştir. Pembe renk ile temsil edilen Güneydoğu Anadolu bölgesi Şekil Ek 5.3'te gösterilmektedir. Güneydoğu Anadolu Bölgesinde Türkiye'nin en büyük hidroelektrik santrallerinden Atatürk, Keban, Karakaya Barajları bulunmaktadır. Dünya'nın en büyük 6. barajı olma özelliğine sahip olan Atatürk Barajı, Türkiye'deki hidroelektrik santrallerinde üretilen enerjinin %20'sini tek başına karşılayabilecek seviyededir. Bu bölgede büyük santrallerde üretilen elektrik iletimi Marmara Bölgesine Atatürk-Yeşilhisar, Atatürk-Elbistan B, Keban Elbistan A, Keban-Kangal, Keban-Kayseri hatları ile beş farklı enerji koridoru üzerinden

iletilmektedir. Mor renk ile temsil edilen Marmara Bölgesi Şekil Ek 5.4'te gösterilmektedir. Osmanca hattı üzerinden Karadeniz Bölgesi'ne bağlı olan Marmara Bölgesi tüketim yoğunluğuna sahip bir bölgedir. Türkiye'nin ilk doğalgaz kombine çevrim santrali olan Hamitabat DGKÇ ve diğer birçok doğal gaz santralleri yoğun olarak bu bölgede bulunmaktadır. Yeşil renk ile temsil edilen Karadeniz Bölgesi Şekil Ek 5.5'te gösterilmektedir. Karadeniz bölgesi hidroelektrik santraller bakımından zengin bir bölgedir. 31 Mart 2015'te elektrik kesintisini ilk başlatan hat olan Kurşunlu-Osmanca hattı da bu bölgede bulunmaktadır. Özellikle Doğu Karadeniz Bölgesi'nde hidrolik kaynaklardan üretilen elektrik Borçka'dan Osmanca'ya uzanan tek enerji koridoru boyunca iletilirken koridordaki hatların özellikle feyezan döneminde zorlanmasına neden olmaktadır. Turuncu renk ile temsil edilen Doğu Anadolu Bölgesi Şekil Ek 5.6'da gösterilmektedir. Siyah renk ile temsil edilen İç Anadolu Bölgesi Şekil Ek 5.7'de gösterilmektedir. Özellikle İç Anadolu Bölgesi doğu-batı aksında yer alan enerji koridorlarının büyük bir kısmına ev sahipliği yapmaktadır. Toplamda 152 adet bara, 275 adet iletim hattından oluşan şebekede 109 adet senkron makine ile 161 adet yük tarafından simüle edilmiştir. HVDC güç iletimi henüz ülkemizde kullanılmayan ama gelecekte ulusal şebekemize muhtemelen entegre olacağı bir uygulamadır. Bu noktada darboğaz yaşanan koridorlarda hibrit sistem, DC hat bipolar işletilecek şekilde Şekil 56'daki gibi modellenmiştir.



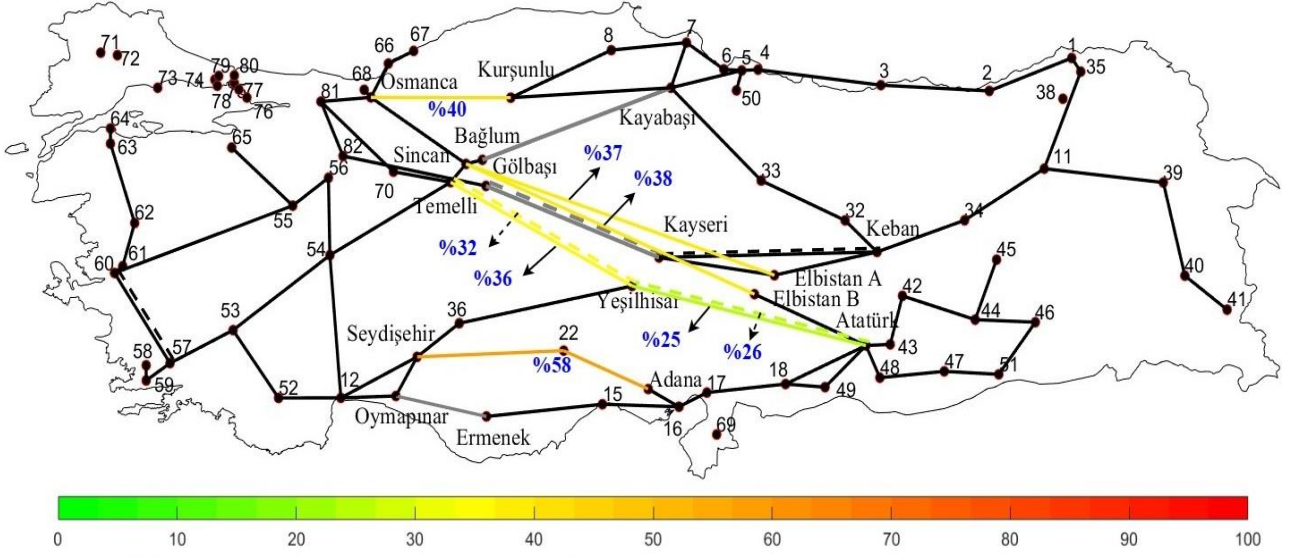
Şekil 56. Hibrit HVAC-bipolar HVDC şematik gösterimi

Tablo 16. Hat uzunlukları ve kesitleri

Hat İsmi	Kesit (MCM)	Uzunluk (km)
Kurşunlu-Osmanca	C3x954	207
Atatürk-Yeşilhisar Kuzey	3Phx1272	310
Seydişehir-Adana	C2x954	345
Sincan-Elbistan B	C3x954	469
Sincan-Elbistan A	C3x954	467
Atatürk-Yeşilhisar Güney	3Phx1272	312
Temelli-Yeşilhisar Kuzey	3Phx1272	295
Temelli-Yeşilhisar Güney	3Phx1272	295

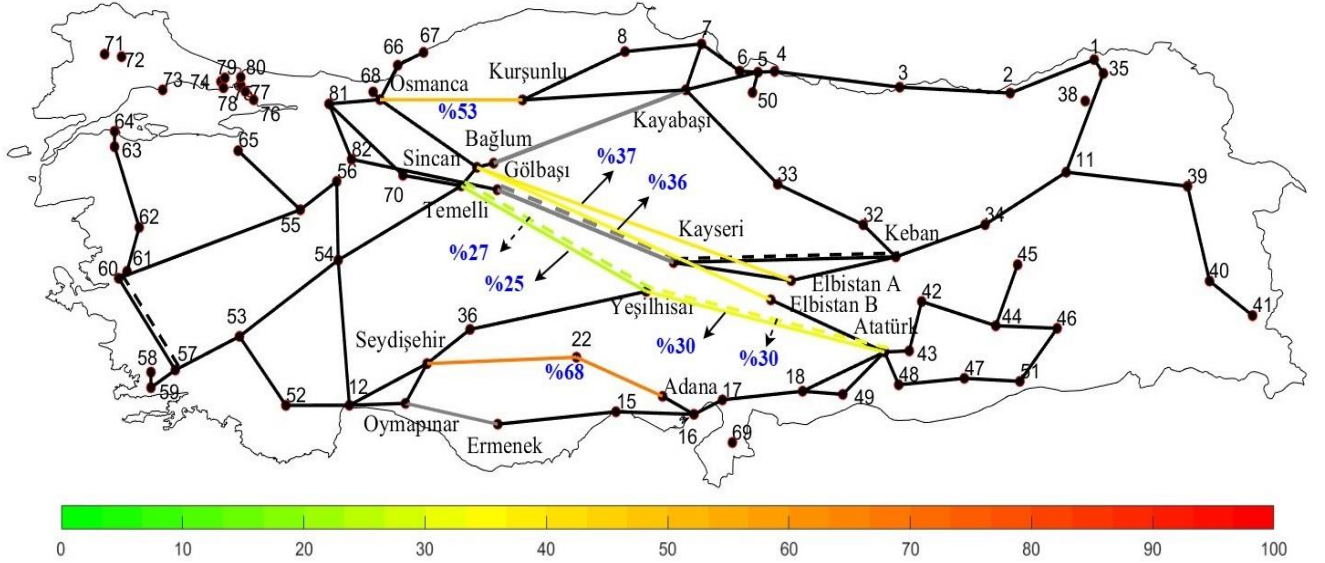
Tablo 16'den görüleceği üzere 400 kV Atatürk-Yeşilhisar ve Yeşilhisar-Temelli çift devre iletim hatlarında üçlü demet 1272 MCM kesitli Pheasant iletkenler kullanılırken diğer temel hatlarda farklı demet sayısına sahip 954 MCM Cardinal iletkenler kullanılmıştır. Bu çalışmada belirli iletim koridorlarına HVDC sistemin entegrasi ile ulusal güç sistemi üzerinde olası etkisi analiz edilmiştir. HVDC uygulamasının hat yüklenmelerine olası etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Böyle bir çalışmadan elde edilen sonuçlar ile hedeflenen koridorlarda hibrit sistemin kullanılmasının iletim verimliliğinde sağladığı avantajlar ile iletim altyapısına olan katkısı belirlenmeye çalışılmıştır.

Hibrit sistem ilk olarak Kurşunlu-Osmanca arasında, ikinci olarak Temelli-Yeşilhisar arasında, son olarak Sincan-Elbistan B arasında olmak üzere 3 kritik hat üzerinde modellenerek 31 Mart 2015'te yaşanan uzun süreli elektrik kesintisine olan olası etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 58'den görüleceği üzere Kurşunlu-Osmanca hibrit sistemin varlığında tüm hatlarda kayda değer azalma meydana gelmiştir.



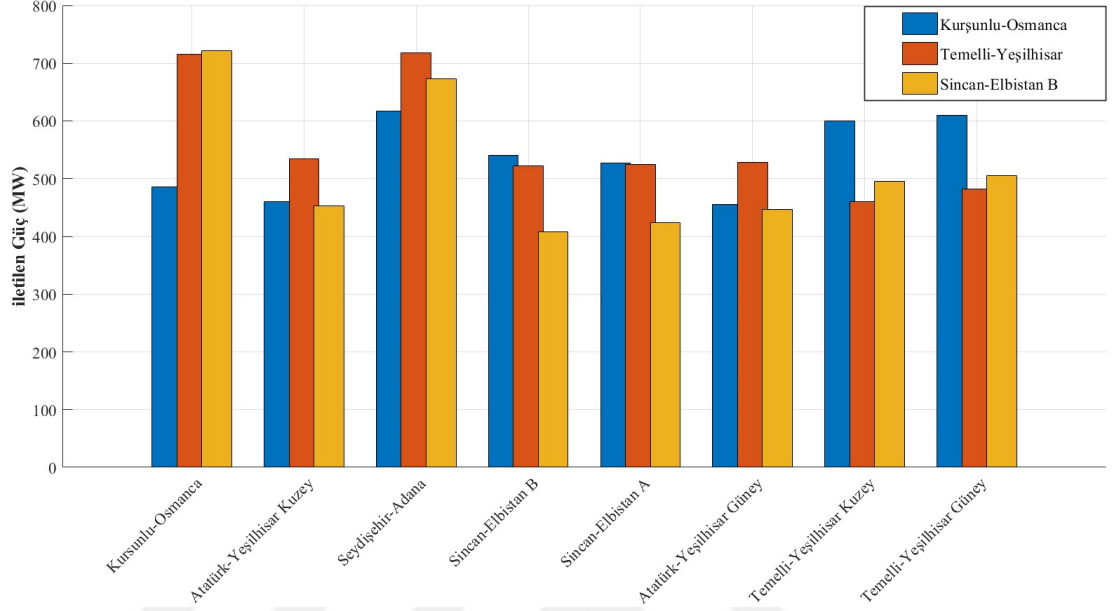
Şekil 58. Kurşunlu-Osmanca hibrit sistemin hat yüklenmelerine etkisi

Hibrit sistem ile en çok yüklenme Seydişehir-Adana hattında meydana gelmiştir. Diğer hatlar kısmen rahatlamakla birlikte %75 ve üzerinde doğu-batı aksında yüklenen hat kalmamıştır. Bir diğer koridor olarak Temelli-Yeşilhisar hattı seçilmiştir. Temelli-Yeşilhisar hattı Türkiye'nin tam ortasında bulunan kritik bir konumda bulunmaktadır. Özellikle Güneydoğu'da bulunan HES'lerin ürettiği enerjinin taşınmasında da önemli bir konumdur. Hibrit hattın Temelli-Yeşilhisar arasında işletilmesi durumunda hatların yüklenme miktarları Şekil 59'da gösterilmektedir.



Şekil 59. Temelli-Yeşilhisar hibrit sistemin hat yüklenmelerine etkisi

Hibrit HVDC sistem Kurşunlu-Osmanca, Temelli-Yeşilhisar, Sincan-Elbistan B olmak üzere üç farklı koridorda ayrı ayrı tesis edildiğinde doğu-batı aksında iletim hatlarının taşıdığı güç miktarlarının değişimi Şekil 61’de verilmiştir.



Şekil 61. Doğu-batı aksında iletim hatlarının taşıdığı güç miktarları

Kurşunlu-Osmanca ve Seydişehir-Adana hatları diğer hatlara göre genellikle daha fazla güç taşımaktadır. Bu durum bu hatların koridorda önemli bir yük taşıma potansiyelini göstermektedir. Bu iletimlerin dinamiğini analiz ederek, iletim altyapısındaki güvenilirlik ve verimliliği sağlamak için altyapı planları yapmak önemlidir. HVDC iletimin en önemli avantajlarından biri de uzun mesafede ekonomik hale gelmesi olduğundan planlanan hibrit sistemin yerini belirlemede ekonomik fizibilite raporları da göz önüne alınmalıdır.

6. SONUÇLAR

Küresel çapta uygulamaları olan HVDC sistemler özellikle uzun mesafeli güç iletimi söz konusu olduğunda geleneksel HVAC sistemlere göre çeşitli avantajlar sunar. AC ve DC iletimin bir arada yapıldığı hibrit sistemler ise çok daha yeni bir uygulama olmakla birlikte geniş bir kullanım alanına henüz sahip değildir. Hibrit sistemler hem AC hem de DC iletimin avantajlarını birleştirmeyi hedeflemektedir. Nüfus yoğunluğu arttıkça ulusal çapta iletim altyapısı iyileştirme çalışmalarında yeni iletim hatlarının inşası gittikçe zorlaşmaktadır. Kamulaştırma için arazi edinmek, sınırlı alan ve yüksek arazi maliyetleri nüfusla artan enerji talebini karşılamayı zorlaştırmaktadır. Hibrit sistemlerin mevcut direklerde dönüşüme uygunluğunun getireceği ekonomiklik ve güç kapasitesinin arttırılması da bu uygulamayı tercih edilir hale getirmektedir.

Bunun yanında hibrit sistemlerin teorik tasarımı iki farklı sistemin entegrasyonundan kaynaklı bir takım zorlukları bünyesinde barındırmaktadır. Bu zorluklardan ilki AC ve DC devrelerin birbirlerine yakınlığından kaynaklı karmaşık elektromanyetik etkileşimlere açık olmasıdır. Doğrusal olmayan bu etkileşimlerin doğru şekilde tespiti gelişmiş simülasyon araçları gerektirmektedir. Bir diğer zorluk ise iletkenlerin direkteki yerleşiminin belirlenmesidir. Çünkü iletkenlerin direk üzerinde yerleşimi, sistemin elektriksel, mekanik ve çevresel etkilerinde söz sahibidir. İletkenlerin sarkması, yayılan elektromanyetik alanlar ve korona kaynaklı oluşan işitilebilir gürültü ile radyo gürültü seviyeleri hesaba katılarak uygun iletken konum tespiti önemlidir.

Bu çalışmada ulusal elektrik iletim sistemimizde kullanılan mevcut 2PA çift devre direğe hibrit HVDC sisteminin entegrasyonunun sebep olacağı sonuçlar farklı perspektiflerden analiz edilmiştir. Aynı analizler ihtiyaç dahilinde farklı direk tipleri içinde uygulanarak uygunluk çalışmaları gerçekleştirilebilir. Öncelikle mevcut direk yapısı ile dönüştürülmesi planlanan hibrit konfigürasyon PSCAD/FACE modülünde modellenerek analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde hibrit hattın elektrik ve manyetik alanların standartları aşmadığı görülmüştür. Bununla birlikte hibrit hattın işitilebilir gürültü ile radyo gürültü seviyeleri özellikle güzel havalarda (güneşli ve kuru) DC iletkenlerdeki etkisinin fazla olması sebebi ile standartları aştığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlar dönüştürülmesi düşünülen hat güzergahındaki iletken konumlarının dikkatlice değerlendirilmesinin önemli olduğunu ortaya koymuştur.

Çalışmada Denizanası Arama Algoritması kullanılarak direk üzerinde iletkenlerin yerleşimi optimize edilmiş ve direğin çevresel etkilerinin en aza indirileceği bir konfigürasyon belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda etkiler hem tek tek ele alınıp değerlendirilmiş ve hem de ikili, üçlü ve dörtlü olarak birlikte değerlendirilmiştir. Elektrik alan, manyetik alan, ışıtilebilir gürültü ve radyo gürültü seviyeleri ayrı ayrı amaç fonksiyonu belirlenerek öngörülen kısıtlar içerisinde en uygun iletken konumları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen hibrit yapının sağlayacağı faydaları ve dikkat edilmesi gereken hususları göstermiştir. Daha sonra elektrik alan, manyetik alan, ışıtilebilir gürültü ve radyo gürültü seviyeleri birlikte ele alınarak en uygun iletken konumları elde edilmiştir. Önce min-max normalizasyon yöntemi ile her bir etki aynı düzleme dönüştürülmüştür. Daha sonra ağırlıklandırma yöntemi ile her bir etki ile alakalı amaç fonksiyonları bir araya getirilmiştir. Farklı çalışma senaryoları üzerinden en uygun iletken konumları tespit edilerek benzer analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen en uygun hibrit direk konfigürasyonları birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Tasarlanan en uygun hibrit direk konfigürasyonu ile sistemin ulusal iletim şebekemizdeki etkinliğini belirlemek için 31 Mart 2015 elektrik kesintisi baz alınarak yük akışı analizi yapılmıştır. Bu analiz ile eğer hibrit direk yapısı elektrik kesintisi öncesinde ulusal iletim şebekemize uygulanmış olsa idi “Kesintiye sebebiyet veren yük akış durumu nasıl olurdu?” sorusuna cevap aranmıştır. Elde edilen hibrit direk konfigürasyonu doğu-batı aksındaki 3 farklı ana iletim koridoru üzerinde ayrı ayrı uygulanarak Digsilent PowerFactory yazılımında Türkiye elektrik iletim şebekesi modellenmiştir. Hibrit direk konfigürasyonu uygulanması ile iletim koridorlarında yaşanmış olan aşırı yüklenmelerin ortadan kalktığı tespit edilmiştir. İhtiyaç duyulan güç HVDC bağlantısı üzerinden iletilerek komşu HVAC hatlardaki aşırı yüklenmeler azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlardan Seydişehir-Adana hattının rahatladığı ama yine de güçlendirilmesi gerektiği görülmüştür.

Sonuç olarak ulusal iletim şebekemizde hibrit HVAC-HVDC yapılarının kullanımı ile özellikle darboğaz yaşanan iletim koridorları rahatlatılabilir. Böylelikle iletimin sürekliliği artırılarak daha güvenilir şekilde şebeke işletilebilir. Güç iletimindeki kontrol edilebilirliği, HVDC iletimine şebeke güç yönetiminde avantaj sağlamaktadır. Dolayısıyla hibrit sistem kısmen AC güç iletiminin de yönetilebilirliğini sağlayabilir.

7. ÖNERİLER

Hibrit sistemler hem AC iletimin güvenilir altyapısını hem de DC iletimin artan verimliliğini, azaltılmış kayıplarını ve gelişmiş kontrol edilebilirliğini etkili şekilde bir araya getirmektedir.

Mevcut direkleri kullanma ve güç kapasitesini artırma noktasında daha da ekonomik hale gelme potansiyeli olan hibrit HVAC-HVDC iletimin gelecekte ulusal şebekemize entegresinin kaçınılmaz olduğu öngörülmektedir. Bu çalışma ile mevcut hatların dönüşümünün çevresel etkiler bakımından bir perspektifi sunulmuştur. Böyle bir dönüşüm çok boyutlu bir problem olduğu için gelecekteki çalışmaların aşağıdaki hususları da ele alması önerilmektedir.

- Yapılan analizlerin küçük ölçekli deneysel çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir.
- Dönüştürülmesi planlanan direk üzerinde mekanik analizlerin derinlemesine yapılması önemlidir. Hibrit sistemde kullanılacak direkler, iletkenler ve yalıtkanların çeşitli çevre ve yük koşulları altında mekanik gerilmeleri analiz edilmelidir.
- Dönüştürülmesi planlanan koridor ve kullanılması planlanan direk özelinde de ekonomik fizibilite raporları hazırlanarak hibrit sistemin ayrıntılı maliyet hesapları yapılmalıdır.
- AC ve DC sistemlerdeki etkileşimlerden dolayı koruma sistemleri de farklılık gösterecektir. Koruma sistemlerinin de bu bakış açısı ile analiz edilmesi gerekmektedir.

8. KAYNAKLAR

- Acaroğlu, H., Najafi, A., Kara, Ö., & Yürük, B. (2021). An Economic and Technical Review for The Utilization of HVDC in Turkey and in the World. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(3), 809-835.
- Al-geelani, N. A., Piah, M. A. M., & Abdul-Malek, Z. (2018). Identification of acoustic signals of corona discharges under different contamination levels using wavelet transform. *Electrical Engineering*, 100, 1059-1067.
- Al Salameh, M. S., & Alnemrawi, S. M. K. (2022). Ant Lion Optimization to Minimize Emissions of Power Transmission Lines. *Progress In Electromagnetics Research M*, 110, 171-184.
- Al Salameh, M. S., & Hassouna, M. A. S. (2010). Arranging Overhead Power Transmission Line Conductors Using Swarm Intelligence Technique to Minimize Electromagnetic Fields. *Progress in Electromagnetics Research B*, 26, 213-236.
- Alassi, A., Bañales, S., Ellabban, O., Adam, G., & MacIver, C. (2019). HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 530-554.
- Angelo, J. S., Guedes, I. A., Barbosa, H. J., & Dardenne, L. E. (2023). Multi and Many Objective Optimization: Present and Future in De Novo Drug Design. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1288626.
- Arafat, E., Porkar, B., Ghassemi, M. (2024). Electric Field Comparison of Conventional Transmission Line with Unconventional Transmission Line. *2024 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, USA, s. 1-5.
- Araujo, R. A. D., Torres, S. P., Filho, J. P., Castro, C. A. & Hertem, D. V. (2023). Unified AC Transmission Expansion Planning Formulation Incorporating VSC-MTDC, FACTS Devices, and Reactive Power Compensation, *Electric Power Systems Research*, 216, 109017.
- Arcia-Garibaldi, G., Cruz-Romero, P., & Gómez-Expósito, A. (2018). Future Power Transmission: Visions, Technologies and Challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 285-301.
- Arı, M. (2012). *154/380 kV Enerji İletim Hatları ve Proje Uygulamaları*. Ankara.
- Arruda, C. K., Domingues, L. A. M. C., Reis, A. L. E., Salas, F. M. A., Salari, J. C. (2020). The Optimization of Transmission Lines in Brazil: Proven Experience and Recent Developments in Research and Development. in *IEEE Power and Energy Magazine*, 18(2), s. 31-42.
- Arslan, C. (2020). *Yüksek Gerilim Tesislerindeki Elektromanyetik Alan Etkisinin Çalışanlarda Gözlemlenen Sağlık Belirtileri Açısından Değerlendirilmesi*, İstanbul Esenyurt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Ay, S. (2017). *Enerji İletim Hatları: Cilt 1, İletkenlerin Mekanik Hesabı*. İstanbul: Efe Akademi Yayınları.
- Baumgartner, U., Magele, C., & Renhart, W. (2004). Pareto Optimality and Particle Swarm Optimization. *IEEE Transactions on Magnetics*, 40(2), 1172-1175.
- Bayrak, Y., & TEİAŞ APK Dairesi Başkanlığı. (2007) Ankara İli Elektrik Üretim-Tüketim Durumu. *İÇEF-Ankara Enerji Forumu*, 24-25.
- Bharti, S., Dubey, S. P., Nagwanshi, K. K., Turkey, R.A., Bansal, R. C., Choubey, B. D. (2022). Analysis of Electromagnetic Environment in 1200 kV Single Circuit UHVAC Transmission Line by Using FACE Software and Semi-empirical Formulae, *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3), 101642.
- Bhattarai, R., Haddad, A., Griffiths, H., & Harid, N. (2010). Voltage Uprating of Overhead Transmission Lines. *45th International Universities Power Engineering Conference*, s. 1–6. Cardiff, UK.
- Bian, X., Chen, L., Yu, D., MacAlpine, J. M. K., Wang, L., Guan, Z., ... & Zhao, S. (2012). Influence of Aged Conductor Surface Conditions on AC Corona-Generated Audible Noise With A Corona Cage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 19(6), 2037-2043.
- Borghei, M., & Ghassemi, M. (2019). Geometrically Optimized Phase Configurations and Sub-conductors in the Bundle for Power Transmission Efficiency. *2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, s. 295-299. Canada.
- Britten, & Burger, A. (2005). *The Planning, Design & Construction of Overhead Power Lines. Bölüm 6: Corona*, s. 122–152. Eskom.
- Buono, L., Guarniere, M. R., Palone, F., Cortina, R., Papi, L., Spezie, R., Tresso, G., Marzinotto, M. & Pigini, A. (2023). Sustainability and Technical Constraints for HVDC Conversion of HVAC Overhead Lines. *2023 AEIT HVDC International Conference*, s. 1-6. Rome, Italy.
- Chandra, V. S., & Anand, H. S. (2022). Nature-inspired Meta Heuristic Algorithms for Optimization Problems. *Computing*, 104(2), 251–269.
- Chartier, V. L. (1983). Empirical Expressions for Calculating High Voltage Transmission Corona Phenomena. *Engineering Seminar of Bonneville Power Administration's Technical Career Program for Professional Engineers*, Portland, Oregon.
- Chartier, V. L., Sarkinen, S. H., Stearns, R. D., & Burns, A. L. (1981). Investigation of Corona and Field Effects of AC/DC Hybrid Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(1), 72-80.
- Choopum, C., Odethanu, K., & Techaumnat, B. (2023). Influence of Wind Direction on the Ion Flow Field of 500 kV HVDC Lines. *2023 International Electrical Engineering Congress*, pp. 264–267. Krabi, Thailand.

- Chou, J. S., & Truong, D. N. (2021). A Novel Metaheuristic Optimizer Inspired by Behavior of Jellyfish in Ocean. *Applied Mathematics and Computation*, 389, 1-47.
- CIGRE. (2014). WG. B2-41: Guide to the Conversion of Existing AC Lines to DC Operation.
- CIGRE. (1992). WG. 22.12: The Thermal Behaviour of Overhead Conductors. *Electra*, 144(3), 3.
- CIGRE. (2009). JWG-B2/B4/C1.17: Impacts of HVDC Lines on the Economics of HVDC Projects.
- CIGRE TB 601. (2014). WG. B2-43: Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines.
- Clairmont, B. A., Johnson, G. B., Zaffanella, L. E., & Zelingher, S. (1989). The Effect of HVAC-HVDC Line Separation in a Hybrid Corridor. *IEEE Power Engineering Review*, 9(4), 95-96.
- Clairmont, B. A., Johnson, G. B., & Zaffanella, L. E. (1992). *Hybrid Transmission Corridor Study, Volume 1: Phase 1–Scale Model Development*. Electric Power Research Institute (EPRI).
- Çanakoglu, A. İ. (2004). Lineer Üçgen Elemanları İçeren Sonlu Eleman Ağıнын Dörtgen Elemanlar Kullanılarak İnceltilmesi. In *Union Radio Science Internationale Türkiye Ulusal Komitesi*, Ankara, Türkiye.
- Desale, S.A., Rasool, A., Andhale, S., & Rane, P.V. (2015). Heuristic and Meta-Heuristic Algorithms and Their Relevance to the Real World: A Survey.
- El Dein, A. Z. (2014). Optimal Arrangement of Egyptian Overhead Transmission Lines Conductors Using Genetic Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 1049-1059.
- El-Deen, S. K., Abdel-Salam, M., & El-Mohandes, M. T. (2023). Analysis of Corona on Hybrid DC and AC Overhead Transmission Lines. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 51(10), 2926-2941.
- Elmorshdy, A., Samy, M. M., & Emam, A. M. (2019). Field Profiles Underneath and Between Proposed Hybrid Power Lines in Egyptian Grid. *2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, s. 724-730. IEEE, Egypt.
- Enerji İletim Hatları. (2017). Çevre ve Şehircilik Bakanlığının ÇED Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi İçin Teknik Yardım Projesi.
- EPRI. (1976). Transmission Line Reference Book - HVDC to ± 600 kV, EPRI, Palo Alto, USA.
- EPRI. (2010). Electrical Effects of HVDC Transmission Lines, 1st Edition, EPRI, California, CA, USA, 1020118, s. 322.

- Er, Y. (2017). *Kalitelere Göre İçeceklerin Farklı Algoritmalar ile Sınıflandırılması*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Fayazi, M., Joorabian, M., Saffarian, A., & Monadi, M. (2023). A Single-ended Traveling Wave Based Fault Location Method Using DWT in Hybrid Parallel HVAC/HVDC Overhead Transmission Lines on the Same Tower, *Electric Power Systems Research*, 220, 109302.
- Fayazi, M., Saffarian, A., Joorabian, M., & Monadi, M. (2024). Analysis of Induced Components in Hybrid HVAC/HVDC Transmission Lines on the Same Tower for Various Fault Conditions. *Electric Power Systems Research*, 226, 1-11.
- Foqha, T., Alsadi, S., Refaat, S. S., & Abdulmawjood, K. (2023). Experimental Validation of a Mitigation Method of Ferranti Effect in Transmission Line. *IEEE Access*, 11, 15878-15895.
- Ghassemi, M. (2019). High Surge Impedance Loading (HSIL) Lines: A Review Identifying Opportunities, Challenges, And Future Research Needs. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(5), 1909-1924.
- Goodman, J. S., & Swatek, D. R. (1994). *In Your Face: The Technical Reference Manual to the Field and Corona Effects Program (FACE)*. Manitoba HVDC Research Centre Inc.
- Guillod, T., Pfeiffer, M., & Franck, C. M. (2014). Improved Coupled Ion-Flow Field Calculation Method for AC/DC Hybrid Overhead Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(6), 2493-2501.
- Gutiérrez, S., Sánchez, C. N., Alvarez, J., & Domínguez-Soberanes, J. (2017, November). A Comparative Analysis of Finite Element Programs for Their Implementation in a Graphic Tool of Insulated Power Cables. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing*, s. 1–6. Ixtapa, Mexico.
- Güney, İ., & Ay, S. (2017). *Enerji İletim Hatları Problemleri*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Haes Alhelou, H., Hamedani-Golshan, M. E., Njenda, T. C., & Siano, P. (2019). A Survey on Power System Blackout and Cascading Events: Research Motivations and Challenges. *Energies*, 12(4), 682.
- Halamay, D. A., Saxby, K. M., Bala, J. L., & Spacek, R. (2005). Feasibility Study of a High-Voltage DC & AC Multi-Circuit Hybrid Transmission Line. In *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, s. 310-316. Ames, USA.
- Hameyer, K., Mertens, R., & Belmans, R. (1995). Numerical Methods to Evaluate the Electromagnetic Fields below Overhead Transmission Lines and Their Measurement. *Proceedings of the First International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, s. 32-36. Caracas, Venezuela.
- He, W. L., He, J. J., Wan, B. Q., Chen, Y. C., Pei, C. M., Zhang, J. G., & Zhang, J. (2015). Radio Interference Excitation Function of Conductor Bundles Based on Cage Test

Results and Comparison with Long-Term Data. *IET Science, Measurement & Technology*, 9(5), 621-627.

- Hedtke, S., Pfeiffer, M., & Franck, C. M. (2019). Corona Discharge Pulse Pattern and Audible Noise on Hybrid AC/DC Transmission Lines Under Electric Field Bias, Ripple and Ion Coupling. *Journal of Electrostatics*, 102, 103373.
- Hedtke, S., Zaffanella, L., Pfeiffer, M. D., Chan, J., Bell, J., & Franck, C. (2015). Audible Noise of Hybrid AC/DC Overhead Lines: Comparison of Different Prediction Methods and Conductor Arrangements. In *Electric Power Research Institute (EPRI) HVDC & Flexible AC Transmission System (FACTS) Conference*, s. 1-8. Zurich, Switzerland.
- Hedtke, S., Bleuler, P. C., & Franck, M. (2021). Outdoor Investigation of the Corona Characteristics and Audible Noise of a Hybrid AC/DC Overhead Line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36 (6), s. 3309-3317.
- Heydari, R., Barforoushi, T. (2024). HVDC/HVAC Transmission Network Expansion Planning in Electricity Markets in the Presence of Wind Resources. *Electric Power Systems Research*, 229, 110182.
- ICNIRP Publication. (2010). ICNIRP Guidelines, For Limiting Exposure to Time Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz – 100 kHz), *Health Physics*, 99(6), 818-834.
- I.E.C. 60071-1. (2006). Insulation Co-ordination-Part 1: Definitions, Principles and Rules. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu.
- IEEE. (2007). *IEEE Standard for Calculating the Current-temperature of Bare Overhead Conductors* (IEEE Std 738-2006, Revision of IEEE Std 738-1993).
- Ismail, H. M. (2009). Characteristics of the Magnetic Field Under Hybrid AC/DC High Voltage Transmission Lines. *Electric Power Systems Research*, 79(1), 1-7.
- Kalair, A., Abas, N., & Khan, N. (2016). Comparative Study of HVAC and HVDC Transmission Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1653-1675.
- Kalenderli, Ö., Kocatepe, C., & Arıkan, O. (2015). *Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Karaca, E., & Nuroğlu, F.M. (2024). Analysis of Hybrid AC/DC Transmission System: A Turkey Case Study. *IET Generation Transmission & Distribution*, 18(18), 3017-3028.
- Karimi, S., Musilek, P., Knight, A. M. (2018). Dynamic Thermal Rating of Transmission Lines: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 600-612.
- Khan, M. A., & Ghassemi, M. (2023). A New Method for Calculating Electric Field Intensity on Subconductors in Unconventional High Voltage, High Power Density Transmission Lines. *2023 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, USA.

- Khan, M. A., & Ghassemi, M. (2023). Corona Loss Calculation for Unconventional High Surge Impedance Loading Transmission Lines. *2023 North American Power Symposium (NAPS)*, Asheville, NC, USA.
- Kim, C. K., Sood, V. K., Jang, G. S., Lim, S. J., & Lee, S. J. (2009). *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. John Wiley & Sons, Singapore.
- Kishore, T. S., & Singal, S. K. (2014). Optimal Economic Planning of Power Transmission Lines: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 949-974.
- Kizilcay, M., Agdemir, A., & Losing, M. (2009, June). Interaction of a HVDC System with 400-kV AC Systems on the Same Tower. In *International Conference on Power System Transient*, s. 3–6. Kyoto, Japan.
- Konotop, I., Novitskiy, A., & Westermann, D. (2016). Influence of 380 kV AC Systems on the Maintenance Conditions of the HVDC System in a Hybrid AC/DC Overhead Line. In *2016 Electric Power Quality and Supply Reliability*, s. 243–248. Tallinn, Estonia.
- Kraus, J. D. (1984). *Electromagnetics* (3rd ed.). McGraw-Hill, USA.
- Kristensen, T. H., Shen, Z., Walti, M., Silva, F.F., Zhang, H., & Bak, C.L. (2024). Coordination of the Back Flashover Probability of HVAC and HVDC on a Hybrid Transmission Tower, *Electric Power Systems Research*, 237, 110989.
- Kumar, K. B., & Thomas, M. J. (2016). Computation of Audible Noise from a 1200 kV UHV Power Transmission Line. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(2), 974-978.
- Kumru, C. F., Kocatepe, C., & Arıkan, O. (2015). An Investigation on Electric Field Distribution Around 380 kV Transmission Line for Various Pylon Models. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 9(8), 138-141.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, New York.
- Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., Vittal, V. (2004). Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force On Stability Terms And Definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3), 1387-1401.
- Kutucu, K., & Kalenderli, Ö. (2007). Bir Elektrot Sisteminin Elektrik Alan Dağılımına Pürüz Etkisinin SEY ile Üç Boyutlu Analizi. In *TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Ulusal Çalıştayı*. Kocaeli, Türkiye.
- LaForest, J. J. (1981). *Transmission-Line Reference Book: 345 kV and Above* (No. EPRI-EL-2500). General Electric Co., Large Transformer Division; Electric Utility Systems Engineering Department.
- Lai, C. M., & Teh, J. (2022). Comprehensive Review of the Dynamic Thermal Rating System for Sustainable Electrical Power Systems. *Energy Reports*, 8, 3263-3288.

- Le Blond, S., Bertho Jr, R., Coury, D. V., & Vieira, J. C. M. (2016). Design of Protection Schemes for Multi-Terminal HVDC Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 965-974.
- Leitgeb, N. (2014). Limiting Electric Fields of HVDC Overhead Power Lines. *Radiation and Environmental Biophysics*, 53, 461-468.
- Li, X., Wang, J., Lu, T. and Cui, X. (2018), Statistical Analysis Of Audible Noise Generated By AC Corona Discharge From Single Corona Sources. *High Voltage*, 3, 207-216.
- Li, H., Guo, X., Qu, B., & Ren, H. (2018). Calculation and Analysis of Electromagnetic Environment Indexes and Influence Factors of ± 1100 kV UHVDC Transmission Lines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 452(3), 1-8.
- Liu, Y., Li, Z., Wan, B., Zhang, L., Yuan, H., & Lai, J. (2022). Research on Calculated Method for Space Electric Field Around HVDC Transmission Lines with Buildings Nearby. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 16(17), 3363-3373.
- Liu, Z. (2014). *Ultra-high Voltage AC/DC Grids*. Academic Press.
- Ludin, G. A., Nakadomari, A., Yona, A., Mikkili, S., Rangarajan, S. S., Collins, E. R., & Senjyu, T. (2022). Technical and Economic Analysis of an HVDC Transmission System for Renewable Energy Connection in Afghanistan. *Sustainability*, 14(3), 1468.
- Lundkvist, J., Gutman, I., & Weimers, L. (2009). Feasibility Study for Converting 380 kV AC Lines to Hybrid AC/DC Lines. In *EPRI's High-Voltage Direct Current & Flexible AC Transmission Systems Conference*, s. 11. California, USA.
- Malicki, P., Papenheim, S., & Kizilcay, M. (2018). Shielding Failure Analysis of a Hybrid Transmission Line with AC and DC Systems on the Same Tower. *Electric Power Systems Research*, 159, 2-8.
- Malyszko, O., Zenczak, M. (2009). Current-Carrying Capacity of Overhead Power Transmission Lines in Different Weather Conditions. *VXV International Symposium on Theoretical Engineering*, s. 1-4. Lübeck, Germany.
- Manickam, R., & Palaniappan, S. N. (2018). Upgrading Transmission Line Capability by AC–DC Conversion. *Computers & Electrical Engineering*, 68, 616-628.
- Margita, F., Beňa, Ľ., Malska, W., & Pijarski, P. (2024). Possibilities of Increasing the Ampacity of Overhead Lines Using High-Temperature Low-Sag Conductors in the Electric Power System of the Slovak Republic. *Applied Sciences*, 14(17), 7846.
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2010). The Weighted Sum Method for Multi-Objective Optimization: New Insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41, 853-862.
- Maruvada, P. A., Trinh, N. G., Dallaire, R. D., & Rivest, N. (1981). Corona Studies for Bipolar HVDC Transmission at Voltages Between ± 600 kV and ± 1200 kV Part 1: Long-term Bipolar Line Studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(3), 1453-1461.

- Maruvada, P. S., & Bisnath, S. (2011). *Corona in Transmission Systems: Theory, Design and Performance*. Crown Publications, Johannesburg.
- Maruvada, P. S., Trinh, N. G., Dallaire, D., & Rivest, N. (1977). Corona Performance of a Conductor Bundle for Bipolar HDVC Transmission at plusminus 750 kV. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 96(6), 1872-1881.
- Mohamed, A. T., Elmorshdy, A., Emam, A. M., & Samy, M. M. (2021). Optimum Configuration for Higher Transmission Ratings for Proposed Hybrid Overhead Power Lines in Egypt Electric Utility. *2021 22nd International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, Assiut, Egypt, 665–671.
- Morris, R. M., & Maruvada, P. S. (1976). Conductor Surface Voltage Gradients on Bipolar HVDC Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 95(6), 1934-1945.
- Morris, R. M., & Rakoshdas, B. (1964). An Investigation of Corona Loss and Radio Interference from Transmission Line Conductors at High Direct Voltages. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83(1), 5-16.
- Moura, R. A., Assis, F. A., Schroeder, M. A. O., Resende, L. C., & Afonso, M. M. (2022). Optimization of Overhead Transmission Lines Power Transfer Capability with Minimizing Electric and Magnetic Fields. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 33, 574-587.
- Nakra, H. L., Bui, L. X., & Iyoda, I. (1984). System Considerations in Converting One Circuit of a Double Circuit AC Line to DC. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(10), 3096-3103.
- Olsen, R. G., & Schennum, S. D. (1995). A Method for Calculating Wide Band Electromagnetic Interference from Power Line Corona. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(3), 1535-1540.
- Olsen, R. G., Schennum, S. D., & Chartier, V. L. (1992). Comparison of Several Methods for Calculating Power Line Electromagnetic Interference Levels and Calibration with Long Term Data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(2), 903-913.
- Peek, F. W. (1920). *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. McGraw-Hill Book Company, Incorporated.
- Petri, A. K., Schmiedchen, K., Stunder, D., Dechent, D., Kraus, T., Bailey, W. H., & Driessen, S. (2017). Biological Effects of Exposure to Static Electric Fields in Humans and Vertebrates: A Systematic Review. *Environmental Health*, 16(41), 1-23.
- Pfeiffer, M., & Franck, C. M. (2015). Impact of Conductor Surface Type and Rain Intensity on HVDC Corona Losses. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(5), 2284-2292.
- Pfeiffer, M., Hedtke, S., & Franck, C. M. (2017). Corona Current Coupling in Bipolar HVDC and Hybrid HVAC/HVDC Overhead Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1), 393-402.

- Qu, J., Zeng, M., Zhang, D., Yang, D., Wu, X., Ren, Q., & Zhang, J. (2021). A Review on Recent Advances and Challenges of Ionic Wind Produced by Corona Discharges with Practical Applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(15), 1-38.
- Rahman, H., & Khan, B. H. (2007). Power Upgrading of Transmission Line by Combining AC–DC Transmission. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1), 459-466.
- Ranković, A., Mijailović, V., Rozgić, D., Četenović, D. (2017). Optimization of Electric and Magnetic Field Emissions Produced by Independent Parallel Overhead Power Lines, *Serbian Journal of Electrical Engineering* 14(2), 199-216.
- Resmi Gazete. (2000). Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği. 24246.
- Resmi Gazete. (2014). Elektrik Şebeke Yönetmeliği. 29013.
- Resmi Gazete. (2010). İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyonun Olumsuz Etkilerinden Çevre ve Halkın Sağlığının Korunmasına Yönelik Alınması Gereken Tedbirlere İlişkin Yönetmelik. 27651.
- Riba, J. R., Bogarra, S., Gómez-Pau, Á., & Moreno-Eguilaz, M. (2020). Uprating Transmission Lines by Means of HTLS Conductors for a Sustainable Growth: Challenges, Opportunities, and Research Needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 1-13.
- Sarıkayha, N. M. (2014). *Bir İşyerinde Elektromanyetik Alan Ölçümü Yapılması ve Sonuçlarının İş Sağlığı ve Güvenliği Yönünden Değerlendirilmesi*, Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Scott-Walton, B., Clark, K. M., Holt, B. R., Jones, D. C., Kaplan, S. D., Krebs, J. S., ... & Young, J. R. (1979). Potential Environmental Effects of 765-kV Transmission Lines: Views before the New York State Public Service Commission, cases 26529 and 26559, 1976-1978, Menlo Park, USA.
- Seppa, T. O. (1993). A Practical Approach for Increasing the Thermal Capabilities of Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8(3), 1536-1550.
- Shah, K. R. (1979). Review of State/Federal Environmental Regulations Pertaining to the Electrical Effects of Overhead Transmission Lines. USA.
- Shah, R., Mithulananthan, N., Bansal, R. C., & Ramachandaramurthy, V. K. (2015). A Review of Key Power System Stability Challenges for Large-scale PV Integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1423-1436.
- Shahidehpour, M., & Fotuhi-Friuzabad, M. (2016). Grid Modernization for Enhancing the Resilience, Reliability, Economics, Sustainability, and Security of Electricity Grid in an Uncertain Environment. *Scientia Iranica*, 23(6), 2862-2873.
- Sharma, T. K., & Pant, M. (2013). Enhancing the Food Locations in an Artificial Bee Colony Algorithm. *Soft Computing*, 17, 1939-1965.

- Shilong, H., Zijian, Y., Yunpeng, L., Xiaoliang, Y., Chen, L., Yongshuang, L., Jian, T., & Wangling, H. (2021). Effects of the Rainfall Rate on Corona Onset Voltage Gradient of Bundled Conductors in Alternating Current Transmission Lines in High-altitude Areas. *Electric Power Systems Research*, 200, 107461.
- Sibilant, G.C., Britten, A.C., & Tlathhetji, N.P. (2003). A Novel Approach for Determining the Surface Roughness Factor of Stranded Conductors.
- Sidhu, T. S., Varma, R. K., Gangadharan, P. K., Albasri, F. A., & Ortiz, G. R. (2005). Performance of Distance Relays on Shunt-FACTS Compensated Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(3), 1837-1845.
- Singh, D. & Singh, B. (2020) Investigating the Impact of Data Normalization on Classification Performance, *Applied Soft Computing*, 97, Part B, 105524.
- Solovyev, Y., & Arevalo, L. (2021). DC Electric Fields in HVDC Stations. In *22nd International Symposium on High Voltage Engineering*, s. 97–101. Xi'an, China.
- Stanojev, O., Garrison, J., Hedtke, S., Franck, C. M., & Demiray, T. (2019). Benefit Analysis of a Hybrid HVAC/HVDC Transmission Line: A Swiss Case Study. *2019 IEEE Milan PowerTech*, s. 1–6. Milan, Italy.
- Stephen, R., Iglesias, J. (2024). *Phase/Pole Configuration*, Springer. Switzerland.
- Stracqualursi, E., Araneo, R., & Celozzi, S. (2021). The Corona Phenomenon in Overhead Lines: Critical Overview of Most Common and Reliable Available Models. *Energies*, 14(20), 6612.
- Straumann, U., & Franck, C. M. (2011). Discussion of Converting a Double-circuit AC-DC Overhead Line to an AC/DC Hybrid Line with Regard to Audible Noise. *The Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids, Cigré Bologna Symposium*. Bologna, Italy.
- Straumann, U., & Franck, C. M. (2012). Ion-flow Field Calculations of AC/DC Hybrid Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1), 294-302.
- Sun, J., Li, M., Zhang, Z., Xu, T., He, J., Wang, H., & Li, G. (2017). Renewable Energy Transmission by HVDC Across the Continent: System Challenges and Opportunities. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 3(4), 353-364.
- Tarko, R., Kochanowicz, K., Nowak, W., Szpyra, W., & Wszolek, T. (2021). Reduction of the Environmental Impact of Electric Field Generated by High Voltage Power Transmission Lines. *Energies*, 14(19), 6388.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2024). 2024-2028 Stratejik Planı.
- TEİAŞ. (2005). Çelik Özlü Alüminyum İletkenler Tip Teknik Şartnamesi.
- TEİAŞ & ENTSO-E. (2015). Report on Blackout in Turkey on 31st March 2015: Final Version 1.0. Project Group Turkey.

- Tejada-Martinez, C., Espino-Cortes, F. P., Ilhan, S., & Ozdemir, A. (2019). Optimization of Radio Interference Levels for 500 and 600 kV Bipolar HVDC Transmission Lines. *Energies*, 12(16), 1-14.
- TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası İzmir Şubesi. (2010). Elektromanyetik alanların Etkileri, İzmir.
- Trinh, N. G., & Maruvada, P. S. (1977). A Method of Predicting the Corona Performance of Conductor Bundles Based on Cage Test Results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 96(1), 312-325.
- Trinh, N. G., Maruvada, P. S., & Valotaire, J. R. (1982). A Study of the Corona Performance of Hydro-Québec's 735-kV Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(3), 681-690.
- URL-1. (2024, Temmuz 20). https://2024.entsos-tyndp-scenarios.eu/TYNDP_2024_IG_intermediate_version/ adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Temmuz 20). <https://www.amprion.net/Grid-expansion/Our-Projects/Ultranet/adresinden> alınmıştır.
- URL-3. (2024, Temmuz 20). <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/protection-norms/> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2024, Temmuz 20). Greenlink EMF Environmental Report Issue 7: <https://www.greenlink.org/environmental-defense/> adresinden alınmıştır.
- URL-5. (2024, Ekim 25). <https://www.teias.gov.tr/sayilarla-elektrik-iletimi/> adresinden alınmıştır.
- Vanderplaats, G.N. (1999). *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*. Vanderplaats Research & Development Inc., Colorado Springs.
- Wan, B., He, W., Pei, C., Wu, X., Chen, Y., Zhang, Y., & Lan, L. (2017). Audible Noise Performance of Conductor Bundles Based on Cage Test Results and Comparison with Long Term Data. *Energies*, 10(7), 958.
- Wan, Y., Zhang, X., & Li, J. (2018). Electromagnetic Environment of UHVDC System. *Ultra-high Voltage AC/DC Power Transmission*, 1059-1106.
- Wang, W., Li, B., He, J., Li, B., Xie, Z., & Xue, L. (2024). Coupling Characteristics Between MMC-HVDC and AC Transmission Lines on the Same Tower and Their Impact on Protective Relaying, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 159, 110000.
- Wang, W., Li, G., & Guo, J. (2022). Large-scale Renewable Energy Transmission by HVDC: Challenges and Proposals. *Engineering*, 19, 252-267.
- Watson, N. R., & Watson, J. D. (2020). An Overview of HVDC Technology. *Energies*, 13(17), 4342.

- Wei, S., Qingmin, L., Liang, Z., Li, Z., & Xinchang, L. (2013). Research on Lightning Performance of AC/DC Hybrid Transmission Lines on the Same Tower. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 7(2), 166-174.
- Wen, Y., Chung, C. Y., & Ye, X. (2017). Enhancing Frequency Stability of Asynchronous Grids Interconnected with HVDC Links. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(2), 1800-1810.
- Williamson, A. R. F. (2016). *Field-effect Limits and Design Parameters for Hybrid HVDC/HVAC Transmission Line Corridors*, Yüksek Lisans Tezi, Kwazulu Üniversitesi. South Africa.
- Wu, D., Seo, G. S., Xu, L., Su, C., Kocewiak, L., Sun, Y., & Qin, Z. (2024). Grid Integration of Offshore Wind Power: Standards, Control, Power Quality and Transmission. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 5, 583-604.
- Xie, H., Cui, X., Wan, B., & Zhang, J. (2016). Statistical Analysis of Radio Interference of 1000 kV UHV AC Double-circuit Transmission Lines in Foul Weather. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2(2), 47-55.
- Xie, H., Zhang, J., Yao, W., Zhang, Y., Xu, J., & Gan, Z. (2024). Statistical Analysis of Long-Term Measured Electric Field of the Operating ± 800 kV HVDC Bipolar Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 39(2), 1040-1050.
- Xue, W., Huang, S., Mao, J., Yan, X., Song, C., & Liu, Y. (2024). Experimental and Theoretical Study on the Influence of Bundle Number on Corona Loss Characteristics of Ultra High Voltage Corona Cage Positive/negative DC Conductors at high altitude. *Electric Power Systems Research*, 232, 110370.
- Zainuddin, N. M., Rahman, M. A., Kadir, M. A., Ali, N. N., Ali, Z., Osman, M., ... & Nasir, N. M. (2020). Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies For Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges. *IEEE Access*, 8, 120053-120081.
- Zhang, B., He, J., Zeng, R., Gu, S., & Cao, L. (2007). Calculation of Ion Flow Field Under HVDC Bipolar Transmission Lines by Integral Equation Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(4), 1237-1240.
- Zhang, B., Mo, J., He, J., & Zhuang, C. (2015). A Time-Domain Approach of Ion Flow Field Around AC–DC Hybrid Transmission Lines Based on Method of Characteristics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(3), 1-4.

9. EKLER

Ek 1. AC-AC Yerleşimde Oluşacak İşitilebilir Gürültü

Tablo Ek 1. Mevcut hatta IREQ, BPA ve EPRI Standartlarına göre oluşan işitilebilir gürültü seviyesinin mesafeye bağlı değişimi

AC-AC									
	IREQ			EPRI			BPA		
x [m]	Şiddetli Yağmur (L5)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Şiddetli Yağmur (L5)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Şiddetli Yağmur (L5)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)
-50.00	45.15	41.65	16.65	40.56	32.41	21.62	37.08	33.58	8.58
-49.00	45.23	41.73	16.73	40.65	32.50	21.71	37.17	33.67	8.67
-48.00	45.32	41.82	16.82	40.74	32.59	21.80	37.25	33.75	8.75
-47.00	45.40	41.90	16.90	40.83	32.68	21.89	37.33	33.83	8.83
-46.00	45.49	41.99	16.99	40.93	32.77	21.98	37.42	33.92	8.92
-45.00	45.57	42.07	17.07	41.02	32.87	22.08	37.51	34.01	9.01
-44.00	45.66	42.16	17.16	41.11	32.96	22.17	37.59	34.09	9.09
-43.00	45.75	42.25	17.25	41.21	33.06	22.27	37.68	34.18	9.18
-42.00	45.84	42.34	17.34	41.30	33.15	22.36	37.77	34.27	9.27
-41.00	45.93	42.43	17.43	41.40	33.25	22.46	37.86	34.36	9.36
-40.00	46.02	42.52	17.52	41.50	33.35	22.56	37.96	34.46	9.46
-39.00	46.12	42.62	17.62	41.60	33.44	22.66	38.05	34.55	9.55
-38.00	46.21	42.71	17.71	41.70	33.54	22.75	38.14	34.64	9.64
-37.00	46.31	42.81	17.81	41.80	33.64	22.85	38.24	34.74	9.74
-36.00	46.40	42.90	17.90	41.90	33.74	22.95	38.33	34.83	9.83
-35.00	46.50	43.00	18.00	42.00	33.85	23.06	38.43	34.93	9.93
-34.00	46.60	43.10	18.10	42.10	33.95	23.16	38.53	35.03	10.03
-33.00	46.70	43.20	18.20	42.21	34.05	23.26	38.63	35.13	10.13
-32.00	46.80	43.30	18.30	42.31	34.15	23.36	38.73	35.23	10.23
-31.00	46.90	43.40	18.40	42.41	34.26	23.47	38.83	35.33	10.33
-30.00	47.01	43.51	18.51	42.52	34.36	23.57	38.93	35.43	10.43
-29.00	47.11	43.61	18.61	42.62	34.47	23.68	39.04	35.54	10.54
-28.00	47.22	43.72	18.72	42.73	34.57	23.78	39.14	35.64	10.64
-27.00	47.32	43.82	18.82	42.84	34.68	23.88	39.24	35.74	10.74
-26.00	47.43	43.93	18.93	42.94	34.78	23.99	39.35	35.85	10.85
-25.00	47.53	44.03	19.03	43.05	34.88	24.09	39.45	35.95	10.95
-24.00	47.64	44.14	19.14	43.15	34.99	24.20	39.56	36.06	11.06
-23.00	47.75	44.25	19.25	43.26	35.09	24.30	39.66	36.16	11.16
-22.00	47.86	44.36	19.36	43.36	35.20	24.40	39.77	36.27	11.27
-21.00	47.96	44.46	19.46	43.47	35.30	24.50	39.87	36.37	11.37
-20.00	48.07	44.57	19.57	43.57	35.40	24.60	39.97	36.47	11.47
-19.00	48.17	44.67	19.67	43.67	35.50	24.70	40.07	36.57	11.57
-18.00	48.28	44.78	19.78	43.77	35.59	24.80	40.17	36.67	11.67
-17.00	48.38	44.88	19.88	43.87	35.69	24.89	40.27	36.77	11.77
-16.00	48.48	44.98	19.98	43.96	35.78	24.98	40.37	36.87	11.87
-15.00	48.58	45.08	20.08	44.05	35.87	25.07	40.46	36.96	11.96
-14.00	48.68	45.18	20.18	44.14	35.95	25.16	40.55	37.05	12.05

Tablo Ek 1'in devamı

-13.00	48.77	45.27	20.27	44.23	36.04	25.24	40.64	37.14	12.14
-12.00	48.86	45.36	20.36	44.31	36.11	25.31	40.72	37.22	12.22
-11.00	48.94	45.44	20.44	44.38	36.19	25.39	40.80	37.30	12.30
-10.00	49.02	45.52	20.52	44.45	36.26	25.45	40.87	37.37	12.37
-9.00	49.09	45.59	20.59	44.52	36.32	25.52	40.94	37.44	12.44
-8.00	49.16	45.66	20.66	44.58	36.38	25.57	41.00	37.50	12.50
-7.00	49.22	45.72	20.72	44.63	36.43	25.62	41.06	37.56	12.56
-6.00	49.27	45.77	20.77	44.68	36.47	25.67	41.11	37.61	12.61
-5.00	49.31	45.81	20.81	44.72	36.51	25.71	41.15	37.65	12.65
-4.00	49.35	45.85	20.85	44.75	36.54	25.74	41.18	37.68	12.68
-3.00	49.38	45.88	20.88	44.78	36.57	25.76	41.21	37.71	12.71
-2.00	49.40	45.90	20.90	44.80	36.59	25.78	41.23	37.73	12.73
-1.00	49.41	45.91	20.91	44.81	36.60	25.79	41.24	37.74	12.74
0.00	49.42	45.92	20.92	44.81	36.60	25.79	41.24	37.74	12.74
1.00	49.41	45.91	20.91	44.81	36.60	25.79	41.24	37.74	12.74
2.00	49.40	45.90	20.90	44.80	36.59	25.78	41.23	37.73	12.73
3.00	49.38	45.88	20.88	44.78	36.57	25.76	41.21	37.71	12.71
4.00	49.35	45.85	20.85	44.75	36.54	25.74	41.18	37.68	12.68
5.00	49.31	45.81	20.81	44.72	36.51	25.71	41.15	37.65	12.65
6.00	49.27	45.77	20.77	44.68	36.47	25.67	41.11	37.61	12.61
7.00	49.22	45.72	20.72	44.63	36.43	25.62	41.06	37.56	12.56
8.00	49.16	45.66	20.66	44.58	36.38	25.57	41.00	37.50	12.50
9.00	49.09	45.59	20.59	44.52	36.32	25.52	40.94	37.44	12.44
10.00	49.02	45.52	20.52	44.45	36.26	25.45	40.87	37.37	12.37
11.00	48.94	45.44	20.44	44.38	36.19	25.39	40.80	37.30	12.30
12.00	48.86	45.36	20.36	44.31	36.11	25.31	40.72	37.22	12.22
13.00	48.77	45.27	20.27	44.23	36.04	25.24	40.64	37.14	12.14
14.00	48.68	45.18	20.18	44.14	35.95	25.16	40.55	37.05	12.05
15.00	48.58	45.08	20.08	44.05	35.87	25.07	40.46	36.96	11.96
16.00	48.48	44.98	19.98	43.96	35.78	24.98	40.37	36.87	11.87
17.00	48.38	44.88	19.88	43.87	35.69	24.89	40.27	36.77	11.77
18.00	48.28	44.78	19.78	43.77	35.59	24.80	40.17	36.67	11.67
19.00	48.17	44.67	19.67	43.67	35.50	24.70	40.07	36.57	11.57
20.00	48.07	44.57	19.57	43.57	35.40	24.60	39.97	36.47	11.47
21.00	47.96	44.46	19.46	43.47	35.30	24.50	39.87	36.37	11.37
22.00	47.86	44.36	19.36	43.36	35.20	24.40	39.77	36.27	11.27
23.00	47.75	44.25	19.25	43.26	35.09	24.30	39.66	36.16	11.16
24.00	47.64	44.14	19.14	43.15	34.99	24.20	39.56	36.06	11.06
25.00	47.53	44.03	19.03	43.05	34.88	24.09	39.45	35.95	10.95
26.00	47.43	43.93	18.93	42.94	34.78	23.99	39.35	35.85	10.85
27.00	47.32	43.82	18.82	42.84	34.68	23.88	39.24	35.74	10.74
28.00	47.22	43.72	18.72	42.73	34.57	23.78	39.14	35.64	10.64
29.00	47.11	43.61	18.61	42.62	34.47	23.68	39.04	35.54	10.54
30.00	47.01	43.51	18.51	42.52	34.36	23.57	38.93	35.43	10.43
31.00	46.90	43.40	18.40	42.41	34.26	23.47	38.83	35.33	10.33
32.00	46.80	43.30	18.30	42.31	34.15	23.36	38.73	35.23	10.23
33.00	46.70	43.20	18.20	42.21	34.05	23.26	38.63	35.13	10.13
34.00	46.60	43.10	18.10	42.10	33.95	23.16	38.53	35.03	10.03
35.00	46.50	43.00	18.00	42.00	33.85	23.06	38.43	34.93	9.93

Tablo Ek 1'in devamı

36.00	46.40	42.90	17.90	41.90	33.74	22.95	38.33	34.83	9.83
37.00	46.31	42.81	17.81	41.80	33.64	22.85	38.24	34.74	9.74
38.00	46.21	42.71	17.71	41.70	33.54	22.75	38.14	34.64	9.64
39.00	46.12	42.62	17.62	41.60	33.44	22.66	38.05	34.55	9.55
40.00	46.02	42.52	17.52	41.50	33.35	22.56	37.96	34.46	9.46
41.00	45.93	42.43	17.43	41.40	33.25	22.46	37.86	34.36	9.36
42.00	45.84	42.34	17.34	41.30	33.15	22.36	37.77	34.27	9.27
43.00	45.75	42.25	17.25	41.21	33.06	22.27	37.68	34.18	9.18
44.00	45.66	42.16	17.16	41.11	32.96	22.17	37.59	34.09	9.09
45.00	45.57	42.07	17.07	41.02	32.87	22.08	37.51	34.01	9.01
46.00	45.49	41.99	16.99	40.93	32.77	21.98	37.42	33.92	8.92
47.00	45.40	41.90	16.90	40.83	32.68	21.89	37.33	33.83	8.83
48.00	45.32	41.82	16.82	40.74	32.59	21.80	37.25	33.75	8.75
49.00	45.23	41.73	16.73	40.65	32.50	21.71	37.17	33.67	8.67
50.00	45.15	41.65	16.65	40.56	32.41	21.62	37.08	33.58	8.58

Ek 2. AC-DC Yerleşimde Oluşacak İşitilebilir Gürültü

Tablo Ek 2.1. Hibrit hatta AC hattın BPA ve EPRI Standartlarına, DC hattın BPA Standardına göre oluşan işitilebilir gürültü seviyesinin mesafeye bağlı değişimi

AC-DC								
x(m)	AC: BPA- DC: BPA				AC: EPRI- DC: BPA			
	Şiddetli Yağmur (L5)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Güzel Hava (L5)	Şiddetli Yağmur (L5)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Güzel Hava (L5)
-50.00	39.72	39.21	42.18	45.68	43.13	39.24	42.28	45.68
-49.00	39.81	39.29	42.25	45.75	43.22	39.32	42.35	45.75
-48.00	39.89	39.37	42.32	45.82	43.31	39.40	42.43	45.82
-47.00	39.98	39.45	42.39	45.89	43.40	39.48	42.50	45.89
-46.00	40.07	39.53	42.47	45.96	43.50	39.56	42.57	45.96
-45.00	40.16	39.61	42.54	46.04	43.59	39.65	42.64	46.04
-44.00	40.25	39.69	42.61	46.11	43.69	39.73	42.72	46.11
-43.00	40.34	39.77	42.69	46.18	43.79	39.82	42.79	46.18
-42.00	40.43	39.86	42.76	46.26	43.88	39.90	42.87	46.26
-41.00	40.52	39.94	42.84	46.34	43.98	39.99	42.95	46.34
-40.00	40.62	40.03	42.92	46.41	44.08	40.08	43.02	46.41
-39.00	40.71	40.11	42.99	46.49	44.18	40.17	43.10	46.49
-38.00	40.81	40.20	43.07	46.57	44.28	40.26	43.18	46.57
-37.00	40.90	40.29	43.15	46.65	44.38	40.34	43.26	46.65
-36.00	41.00	40.38	43.23	46.73	44.48	40.43	43.34	46.73
-35.00	41.10	40.47	43.31	46.81	44.59	40.52	43.42	46.81
-34.00	41.20	40.56	43.39	46.89	44.69	40.62	43.50	46.89
-33.00	41.30	40.65	43.47	46.97	44.79	40.71	43.59	46.97
-32.00	41.40	40.74	43.56	47.05	44.90	40.80	43.67	47.05
-31.00	41.50	40.83	43.64	47.13	45.00	40.89	43.75	47.13
-30.00	41.60	40.92	43.72	47.22	45.10	40.98	43.83	47.22
-29.00	41.71	41.02	43.80	47.30	45.21	41.08	43.92	47.30
-28.00	41.81	41.11	43.89	47.38	45.31	41.17	44.00	47.38
-27.00	41.91	41.21	43.97	47.47	45.42	41.26	44.09	47.47
-26.00	42.01	41.30	44.06	47.55	45.52	41.36	44.17	47.55
-25.00	42.12	41.39	44.14	47.64	45.63	41.45	44.25	47.64
-24.00	42.22	41.49	44.22	47.72	45.73	41.54	44.34	47.72
-23.00	42.32	41.58	44.31	47.80	45.83	41.63	44.42	47.80
-22.00	42.42	41.67	44.39	47.89	45.93	41.72	44.51	47.89
-21.00	42.52	41.77	44.48	47.97	46.03	41.81	44.59	47.97
-20.00	42.62	41.86	44.56	48.06	46.13	41.90	44.67	48.06
-19.00	42.71	41.95	44.64	48.14	46.22	41.99	44.76	48.14
-18.00	42.81	42.03	44.72	48.22	46.32	42.07	44.84	48.22
-17.00	42.90	42.12	44.80	48.30	46.41	42.15	44.92	48.30
-16.00	42.99	42.20	44.88	48.38	46.49	42.23	45.00	48.38
-15.00	43.07	42.29	44.96	48.46	46.58	42.31	45.08	48.46
-14.00	43.15	42.36	45.04	48.54	46.65	42.38	45.16	48.54
-13.00	43.22	42.44	45.12	48.61	46.72	42.45	45.23	48.61
-12.00	43.29	42.51	45.19	48.69	46.79	42.52	45.30	48.69

Tablo Ek 2.1'in devamı

-11.00	43.35	42.57	45.26	48.76	46.85	42.58	45.37	48.76
-10.00	43.40	42.63	45.33	48.83	46.90	42.64	45.44	48.83
-9.00	43.44	42.69	45.40	48.89	46.94	42.69	45.51	48.89
-8.00	43.48	42.73	45.46	48.95	46.97	42.74	45.57	48.95
-7.00	43.50	42.77	45.52	49.01	47.00	42.78	45.63	49.01
-6.00	43.51	42.81	45.57	49.07	47.01	42.81	45.68	49.07
-5.00	43.52	42.83	45.63	49.12	47.01	42.83	45.74	49.12
-4.00	43.51	42.85	45.68	49.17	47.00	42.85	45.78	49.17
-3.00	43.49	42.86	45.72	49.22	46.98	42.87	45.82	49.22
-2.00	43.46	42.87	45.76	49.25	46.96	42.87	45.86	49.25
-1.00	43.42	42.87	45.79	49.29	46.92	42.87	45.89	49.29
0.00	43.37	42.86	45.82	49.32	46.87	42.87	45.92	49.32
1.00	43.32	42.84	45.84	49.34	46.82	42.85	45.94	49.34
2.00	43.26	42.82	45.86	49.36	46.76	42.83	45.96	49.36
3.00	43.19	42.79	45.88	49.37	46.69	42.81	45.97	49.37
4.00	43.11	42.76	45.88	49.38	46.62	42.78	45.98	49.38
5.00	43.03	42.72	45.88	49.38	46.54	42.75	45.98	49.38
6.00	42.95	42.68	45.88	49.38	46.45	42.71	45.97	49.38
7.00	42.86	42.63	45.87	49.37	46.37	42.66	45.96	49.37
8.00	42.77	42.58	45.85	49.35	46.28	42.61	45.94	49.35
9.00	42.67	42.52	45.83	49.33	46.18	42.56	45.92	49.33
10.00	42.58	42.47	45.81	49.30	46.09	42.51	45.89	49.30
11.00	42.48	42.40	45.77	49.27	45.99	42.45	45.86	49.27
12.00	42.38	42.34	45.74	49.24	45.89	42.38	45.82	49.24
13.00	42.28	42.27	45.70	49.19	45.79	42.32	45.78	49.19
14.00	42.18	42.20	45.65	49.15	45.69	42.25	45.73	49.15
15.00	42.08	42.13	45.60	49.10	45.58	42.18	45.68	49.10
16.00	41.97	42.05	45.55	49.04	45.48	42.10	45.63	49.04
17.00	41.87	41.97	45.49	48.99	45.38	42.03	45.57	48.99
18.00	41.77	41.90	45.43	48.92	45.27	41.95	45.51	48.92
19.00	41.67	41.81	45.36	48.86	45.17	41.87	45.44	48.86
20.00	41.57	41.73	45.29	48.79	45.07	41.78	45.37	48.79
21.00	41.47	41.65	45.22	48.72	44.96	41.70	45.30	48.72
22.00	41.37	41.56	45.15	48.65	44.86	41.62	45.23	48.65
23.00	41.27	41.48	45.08	48.57	44.76	41.53	45.15	48.57
24.00	41.17	41.39	45.00	48.50	44.65	41.44	45.08	48.50
25.00	41.07	41.31	44.92	48.42	44.55	41.36	45.00	48.42
26.00	40.97	41.22	44.84	48.34	44.45	41.27	44.92	48.34
27.00	40.87	41.13	44.76	48.26	44.35	41.18	44.84	48.26
28.00	40.78	41.04	44.68	48.18	44.25	41.09	44.76	48.18
29.00	40.68	40.96	44.60	48.10	44.15	41.00	44.67	48.10
30.00	40.59	40.87	44.52	48.01	44.05	40.91	44.59	48.01
31.00	40.49	40.78	44.43	47.93	43.95	40.82	44.51	47.93
32.00	40.40	40.69	44.35	47.85	43.85	40.74	44.42	47.85
33.00	40.31	40.61	44.26	47.76	43.76	40.65	44.34	47.76
34.00	40.22	40.52	44.18	47.68	43.66	40.56	44.25	47.68
35.00	40.13	40.43	44.10	47.59	43.56	40.47	44.17	47.59
36.00	40.04	40.35	44.01	47.51	43.47	40.38	44.09	47.51
37.00	39.96	40.26	43.93	47.43	43.38	40.29	44.00	47.43

Tablo Ek 2.1'in devamı

38.00	39.87	40.18	43.84	47.34	43.28	40.21	43.92	47.34
39.00	39.79	40.09	43.76	47.26	43.19	40.12	43.83	47.26
40.00	39.70	40.01	43.68	47.18	43.10	40.04	43.75	47.18
41.00	39.62	39.93	43.60	47.09	43.01	39.95	43.67	47.09
42.00	39.54	39.85	43.51	47.01	42.92	39.86	43.59	47.01
43.00	39.46	39.77	43.43	46.93	42.83	39.78	43.50	46.93
44.00	39.38	39.68	43.35	46.85	42.74	39.70	43.42	46.85
45.00	39.30	39.60	43.27	46.77	42.66	39.61	43.34	46.77
46.00	39.22	39.53	43.19	46.69	42.57	39.53	43.26	46.69
47.00	39.14	39.45	43.11	46.61	42.48	39.45	43.18	46.61
48.00	39.07	39.37	43.03	46.53	42.40	39.37	43.10	46.53
49.00	38.99	39.29	42.95	46.45	42.31	39.29	43.03	46.45
50.00	38.92	39.22	42.88	46.37	42.23	39.21	42.95	46.37

Tablo Ek 2.2. Hibrit hatta AC hattın IREQ Standardına, DC hattın BPA Standardına göre oluşan işitilebilir gürültü seviyesinin mesafeye bağlı değişimi

AC-DC									
AC: IREQ- DC: BPA					AC: IREQ- DC: BPA				
x(m)	Şiddetli Yağmur (L5)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Güzel Hava (L5)	x(m)	Şiddetli Yağmur (L5)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Güzel Hava (L5)
-50.00	45.83	43.27	42.19	45.68	1.00	49.62	47.04	45.86	49.34
-49.00	45.91	43.35	42.26	45.75	2.00	49.55	46.98	45.87	49.36
-48.00	46.00	43.44	42.33	45.82	3.00	49.47	46.92	45.89	49.37
-47.00	46.09	43.52	42.40	45.89	4.00	49.39	46.86	45.89	49.38
-46.00	46.18	43.61	42.48	45.96	5.00	49.30	46.79	45.89	49.38
-45.00	46.27	43.70	42.55	46.04	6.00	49.20	46.71	45.89	49.38
-44.00	46.36	43.78	42.62	46.11	7.00	49.10	46.63	45.88	49.37
-43.00	46.45	43.87	42.70	46.18	8.00	49.00	46.55	45.86	49.35
-42.00	46.55	43.97	42.77	46.26	9.00	48.90	46.46	45.84	49.33
-41.00	46.64	44.06	42.85	46.34	10.00	48.80	46.38	45.82	49.30
-40.00	46.74	44.15	42.93	46.41	11.00	48.69	46.29	45.78	49.27
-39.00	46.84	44.24	43.01	46.49	12.00	48.58	46.20	45.75	49.24
-38.00	46.94	44.34	43.08	46.57	13.00	48.47	46.10	45.71	49.19
-37.00	47.04	44.44	43.16	46.65	14.00	48.37	46.01	45.66	49.15
-36.00	47.14	44.53	43.24	46.73	15.00	48.26	45.91	45.61	49.10
-35.00	47.24	44.63	43.32	46.81	16.00	48.15	45.82	45.55	49.04
-34.00	47.34	44.73	43.40	46.89	17.00	48.04	45.72	45.50	48.99
-33.00	47.45	44.83	43.49	46.97	18.00	47.93	45.62	45.43	48.92
-32.00	47.55	44.93	43.57	47.05	19.00	47.83	45.53	45.37	48.86
-31.00	47.66	45.03	43.65	47.13	20.00	47.72	45.43	45.30	48.79
-30.00	47.77	45.13	43.73	47.22	21.00	47.61	45.33	45.23	48.72
-29.00	47.87	45.24	43.82	47.30	22.00	47.51	45.24	45.16	48.65
-28.00	47.98	45.34	43.90	47.38	23.00	47.40	45.14	45.09	48.57
-27.00	48.09	45.45	43.98	47.47	24.00	47.30	45.04	45.01	48.50
-26.00	48.20	45.55	44.07	47.55	25.00	47.20	44.95	44.93	48.42

Tablo Ek 2.2'nin devamı

-25.00	48.31	45.66	44.15	47.64	26.00	47.10	44.85	44.85	48.34
-24.00	48.42	45.76	44.24	47.72	27.00	47.00	44.76	44.77	48.26
-23.00	48.53	45.87	44.32	47.80	28.00	46.90	44.66	44.69	48.18
-22.00	48.64	45.97	44.40	47.89	29.00	46.80	44.57	44.61	48.10
-21.00	48.74	46.07	44.49	47.97	30.00	46.70	44.47	44.52	48.01
-20.00	48.85	46.18	44.57	48.06	31.00	46.61	44.38	44.44	47.93
-19.00	48.95	46.28	44.65	48.14	32.00	46.51	44.29	44.36	47.85
-18.00	49.06	46.37	44.74	48.22	33.00	46.42	44.20	44.27	47.76
-17.00	49.16	46.47	44.82	48.30	34.00	46.33	44.11	44.19	47.68
-16.00	49.25	46.56	44.90	48.38	35.00	46.24	44.02	44.10	47.59
-15.00	49.35	46.65	44.98	48.46	36.00	46.15	43.93	44.02	47.51
-14.00	49.43	46.74	45.05	48.54	37.00	46.06	43.84	43.94	47.43
-13.00	49.51	46.82	45.13	48.61	38.00	45.97	43.75	43.85	47.34
-12.00	49.59	46.90	45.20	48.69	39.00	45.88	43.67	43.77	47.26
-11.00	49.66	46.96	45.27	48.76	40.00	45.80	43.58	43.69	47.18
-10.00	49.72	47.02	45.34	48.83	41.00	45.71	43.50	43.60	47.09
-9.00	49.76	47.08	45.41	48.89	42.00	45.63	43.42	43.52	47.01
-8.00	49.80	47.12	45.47	48.95	43.00	45.55	43.33	43.44	46.93
-7.00	49.83	47.15	45.53	49.01	44.00	45.46	43.25	43.36	46.85
-6.00	49.84	47.17	45.59	49.07	45.00	45.38	43.17	43.28	46.77
-5.00	49.85	47.18	45.64	49.12	46.00	45.30	43.09	43.20	46.69
-4.00	49.84	47.18	45.69	49.17	47.00	45.23	43.01	43.12	46.61
-3.00	49.81	47.17	45.73	49.22	48.00	45.15	42.94	43.04	46.53
-2.00	49.78	47.15	45.77	49.25	49.00	45.07	42.86	42.96	46.45
-1.00	49.74	47.12	45.80	49.29	50.00	45.00	42.78	42.88	46.37
0.00	49.68	47.09	45.83	49.32					

Ek 3. AC-AC Yerleşimde Oluşacak Radyo Gürültüsü

Tablo Ek 3.1. Mevcut hatta AC hattın CIGRE ve BPA Standartlarına göre oluşan radyo gürültü seviyesinin mesafeye bağlı değişimi

AC-AC						
	AC: CIGRE			AC: BPA		
x [m]	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)
-50.00	33.85	25.85	8.85	34.82	26.82	9.82
-49.00	34.10	26.10	9.10	35.08	27.08	10.08
-48.00	34.36	26.36	9.36	35.34	27.34	10.34
-47.00	34.61	26.61	9.61	35.59	27.59	10.59
-46.00	34.86	26.86	9.86	35.83	27.83	10.83
-45.00	35.10	27.10	10.10	36.08	28.08	11.08
-44.00	35.34	27.34	10.34	36.32	28.32	11.32
-43.00	35.57	27.57	10.57	36.59	28.59	11.59
-42.00	35.79	27.79	10.79	36.92	28.92	11.92
-41.00	36.01	28.01	11.01	37.25	29.25	12.25
-40.00	36.21	28.21	11.21	37.58	29.58	12.58
-39.00	36.40	28.40	11.40	37.90	29.90	12.90
-38.00	36.63	28.63	11.63	38.21	30.21	13.21
-37.00	36.93	28.93	11.93	38.51	30.51	13.51
-36.00	37.22	29.22	12.22	38.80	30.80	13.80
-35.00	37.49	29.49	12.49	39.07	31.07	14.07
-34.00	37.78	29.78	12.78	39.36	31.36	14.36
-33.00	38.12	30.12	13.12	39.70	31.70	14.70
-32.00	38.44	30.44	13.44	40.02	32.02	15.02
-31.00	38.76	30.76	13.76	40.34	32.34	15.34
-30.00	39.07	31.07	14.07	40.65	32.65	15.65
-29.00	39.36	31.36	14.36	40.94	32.94	15.94
-28.00	39.64	31.64	14.64	41.22	33.22	16.22
-27.00	39.90	31.90	14.90	41.48	33.48	16.48
-26.00	40.14	32.14	15.14	41.72	33.72	16.72
-25.00	40.36	32.36	15.36	41.94	33.94	16.94
-24.00	40.55	32.55	15.55	42.14	34.14	17.14
-23.00	40.73	32.73	15.73	42.31	34.31	17.31
-22.00	40.89	32.89	15.89	42.47	34.47	17.47
-21.00	41.53	33.53	16.53	42.73	34.73	17.73
-20.00	42.23	34.23	17.23	43.29	35.29	18.29
-19.00	42.94	34.94	17.94	43.85	35.85	18.85
-18.00	43.63	35.63	18.63	44.41	36.41	19.41
-17.00	44.31	36.31	19.31	45.08	37.08	20.08
-16.00	44.98	36.98	19.98	45.75	37.75	20.75
-15.00	45.61	37.61	20.61	46.38	38.38	21.38
-14.00	46.22	38.22	21.22	46.99	38.99	21.99
-13.00	46.79	38.79	21.79	47.88	39.88	22.88
-12.00	47.31	39.31	22.31	48.76	40.76	23.76

Tablo Ek 3.1'in devamı

-11.00	47.99	39.99	22.99	49.57	41.57	24.57
-10.00	48.72	40.72	23.72	50.30	42.30	25.30
-9.00	49.36	41.36	24.36	50.94	42.94	25.94
-8.00	49.91	41.91	24.91	51.49	43.49	26.49
-7.00	50.38	42.38	25.38	51.96	43.96	26.96
-6.00	50.76	42.76	25.76	52.34	44.34	27.34
-5.00	51.06	43.06	26.06	52.64	44.64	27.64
-4.00	51.29	43.29	26.29	52.88	44.88	27.88
-3.00	51.46	43.46	26.46	53.05	45.05	28.05
-2.00	51.58	43.58	26.58	53.16	45.16	28.16
-1.00	51.64	43.64	26.64	53.23	45.23	28.23
0.00	51.66	43.66	26.66	53.25	45.25	28.25
1.00	51.64	43.64	26.64	53.23	45.23	28.23
2.00	51.58	43.58	26.58	53.16	45.16	28.16
3.00	51.46	43.46	26.46	53.05	45.05	28.05
4.00	51.29	43.29	26.29	52.88	44.88	27.88
5.00	51.06	43.06	26.06	52.64	44.64	27.64
6.00	50.76	42.76	25.76	52.34	44.34	27.34
7.00	50.38	42.38	25.38	51.96	43.96	26.96
8.00	49.91	41.91	24.91	51.49	43.49	26.49
9.00	49.36	41.36	24.36	50.94	42.94	25.94
10.00	48.72	40.72	23.72	50.30	42.30	25.30
11.00	47.99	39.99	22.99	49.57	41.57	24.57
12.00	47.31	39.31	22.31	48.76	40.76	23.76
13.00	46.79	38.79	21.79	47.88	39.88	22.88
14.00	46.22	38.22	21.22	46.99	38.99	21.99
15.00	45.61	37.61	20.61	46.38	38.38	21.38
16.00	44.98	36.98	19.98	45.75	37.75	20.75
17.00	44.31	36.31	19.31	45.08	37.08	20.08
18.00	43.63	35.63	18.63	44.41	36.41	19.41
19.00	42.94	34.94	17.94	43.85	35.85	18.85
20.00	42.23	34.23	17.23	43.29	35.29	18.29
21.00	41.53	33.53	16.53	42.73	34.73	17.73
22.00	40.89	32.89	15.89	42.47	34.47	17.47
23.00	40.73	32.73	15.73	42.31	34.31	17.31
24.00	40.55	32.55	15.55	42.14	34.14	17.14
25.00	40.36	32.36	15.36	41.94	33.94	16.94
26.00	40.14	32.14	15.14	41.72	33.72	16.72
27.00	39.90	31.90	14.90	41.48	33.48	16.48
28.00	39.64	31.64	14.64	41.22	33.22	16.22
29.00	39.36	31.36	14.36	40.94	32.94	15.94
30.00	39.07	31.07	14.07	40.65	32.65	15.65
31.00	38.76	30.76	13.76	40.34	32.34	15.34
32.00	38.44	30.44	13.44	40.02	32.02	15.02
33.00	38.12	30.12	13.12	39.70	31.70	14.70
34.00	37.78	29.78	12.78	39.36	31.36	14.36
35.00	37.49	29.49	12.49	39.07	31.07	14.07
36.00	37.22	29.22	12.22	38.80	30.80	13.80
37.00	36.93	28.93	11.93	38.51	30.51	13.51

Tablo Ek 3.1'in devamı

38.00	36.63	28.63	11.63	38.21	30.21	13.21
39.00	36.40	28.40	11.40	37.90	29.90	12.90
40.00	36.21	28.21	11.21	37.58	29.58	12.58
41.00	36.01	28.01	11.01	37.25	29.25	12.25
42.00	35.79	27.79	10.79	36.92	28.92	11.92
43.00	35.57	27.57	10.57	36.59	28.59	11.59
44.00	35.34	27.34	10.34	36.32	28.32	11.32
45.00	35.10	27.10	10.10	36.08	28.08	11.08
46.00	34.86	26.86	9.86	35.83	27.83	10.83
47.00	34.61	26.61	9.61	35.59	27.59	10.59
48.00	34.36	26.36	9.36	35.34	27.34	10.34
49.00	34.10	26.10	9.10	35.08	27.08	10.08
50.00	33.85	25.85	8.85	34.82	26.82	9.82

Tablo Ek 3.2. Mevcut hatta AC hattın IREQ ve EPRI Standartlarına göre oluşan radyo gürültü seviyesinin mesafeye bağlı değişimi

AC-AC						
	AC: IREQ			AC: EPRI		
x [m]	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)
-50.00	38.23	30.23	13.23	42.89	30.89	13.89
-49.00	38.48	30.48	13.48	43.15	31.24	14.24
-48.00	38.74	30.74	13.74	43.40	31.58	14.58
-47.00	38.99	30.99	13.99	43.65	31.92	14.92
-46.00	39.24	31.24	14.24	43.90	32.26	15.26
-45.00	39.48	31.48	14.48	44.14	32.61	15.61
-44.00	39.72	31.72	14.72	44.38	32.95	15.95
-43.00	39.95	31.95	14.95	44.61	33.29	16.29
-42.00	40.17	32.17	15.17	44.84	33.62	16.62
-41.00	40.39	32.39	15.39	45.05	33.95	16.95
-40.00	40.59	32.59	15.59	45.25	34.28	17.28
-39.00	40.78	32.78	15.78	45.57	34.60	17.60
-38.00	40.96	32.96	15.96	45.88	34.91	17.91
-37.00	41.12	33.12	16.12	46.18	35.21	18.21
-36.00	41.35	33.35	16.35	46.47	35.50	18.50
-35.00	41.62	33.62	16.62	46.75	35.77	18.77
-34.00	41.91	33.91	16.91	47.04	36.06	19.06
-33.00	42.24	34.24	17.24	47.37	36.40	19.40
-32.00	42.57	34.57	17.57	47.70	36.72	19.72
-31.00	42.89	34.89	17.89	48.01	37.04	20.04
-30.00	43.20	35.20	18.20	48.32	37.35	20.35
-29.00	43.49	35.49	18.49	48.62	37.64	20.64
-28.00	43.77	35.77	18.77	48.90	37.92	20.92
-27.00	44.03	36.03	19.03	49.16	38.18	21.18
-26.00	44.27	36.27	19.27	49.40	38.42	21.42
-25.00	44.49	36.49	19.49	49.61	38.64	21.64

Tablo Ek 3.2'nin devamı

-24.00	44.68	36.68	19.68	49.81	38.83	21.83
-23.00	44.86	36.86	19.86	49.98	39.01	22.01
-22.00	45.19	37.19	20.19	50.15	39.17	22.17
-21.00	45.90	37.90	20.90	50.41	39.43	22.43
-20.00	46.61	38.61	21.61	51.09	39.99	22.99
-19.00	47.31	39.31	22.31	51.79	40.55	23.55
-18.00	48.01	40.01	23.01	52.49	41.11	24.11
-17.00	48.69	40.69	23.69	53.17	41.67	24.67
-16.00	49.35	41.35	24.35	53.83	42.23	25.23
-15.00	49.99	41.99	24.99	54.47	42.78	25.78
-14.00	50.59	42.59	25.59	55.08	43.64	26.64
-13.00	51.16	43.16	26.16	55.64	44.58	27.58
-12.00	51.68	43.68	26.68	56.43	45.46	28.46
-11.00	52.15	44.15	27.15	57.24	46.27	29.27
-10.00	52.85	44.85	27.85	57.97	47.00	30.00
-9.00	53.49	45.49	28.49	58.61	47.64	30.64
-8.00	54.04	46.04	29.04	59.17	48.19	31.19
-7.00	54.51	46.51	29.51	59.63	48.66	31.66
-6.00	54.89	46.89	29.89	60.01	49.04	32.04
-5.00	55.19	47.19	30.19	60.32	49.34	32.34
-4.00	55.42	47.42	30.42	60.55	49.57	32.57
-3.00	55.59	47.59	30.59	60.72	49.74	32.74
-2.00	55.71	47.71	30.71	60.83	49.86	32.86
-1.00	55.77	47.77	30.77	60.90	49.92	32.92
0.00	55.79	47.79	30.79	60.92	49.94	32.94
1.00	55.77	47.77	30.77	60.90	49.92	32.92
2.00	55.71	47.71	30.71	60.83	49.86	32.86
3.00	55.59	47.59	30.59	60.72	49.74	32.74
4.00	55.42	47.42	30.42	60.55	49.57	32.57
5.00	55.19	47.19	30.19	60.32	49.34	32.34
6.00	54.89	46.89	29.89	60.01	49.04	32.04
7.00	54.51	46.51	29.51	59.63	48.66	31.66
8.00	54.04	46.04	29.04	59.17	48.19	31.19
9.00	53.49	45.49	28.49	58.61	47.64	30.64
10.00	52.85	44.85	27.85	57.97	47.00	30.00
11.00	52.15	44.15	27.15	57.24	46.27	29.27
12.00	51.68	43.68	26.68	56.43	45.46	28.46
13.00	51.16	43.16	26.16	55.64	44.58	27.58
14.00	50.59	42.59	25.59	55.08	43.64	26.64
15.00	49.99	41.99	24.99	54.47	42.78	25.78
16.00	49.35	41.35	24.35	53.83	42.23	25.23
17.00	48.69	40.69	23.69	53.17	41.67	24.67
18.00	48.01	40.01	23.01	52.49	41.11	24.11
19.00	47.31	39.31	22.31	51.79	40.55	23.55
20.00	46.61	38.61	21.61	51.09	39.99	22.99
21.00	45.90	37.90	20.90	50.41	39.43	22.43
22.00	45.19	37.19	20.19	50.15	39.17	22.17
23.00	44.86	36.86	19.86	49.98	39.01	22.01
24.00	44.68	36.68	19.68	49.81	38.83	21.83

Tablo Ek 3.2'nin devamı

25.00	44.49	36.49	19.49	49.61	38.64	21.64
26.00	44.27	36.27	19.27	49.40	38.42	21.42
27.00	44.03	36.03	19.03	49.16	38.18	21.18
28.00	43.77	35.77	18.77	48.90	37.92	20.92
29.00	43.49	35.49	18.49	48.62	37.64	20.64
30.00	43.20	35.20	18.20	48.32	37.35	20.35
31.00	42.89	34.89	17.89	48.01	37.04	20.04
32.00	42.57	34.57	17.57	47.70	36.72	19.72
33.00	42.24	34.24	17.24	47.37	36.40	19.40
34.00	41.91	33.91	16.91	47.04	36.06	19.06
35.00	41.62	33.62	16.62	46.75	35.77	18.77
36.00	41.35	33.35	16.35	46.47	35.50	18.50
37.00	41.12	33.12	16.12	46.18	35.21	18.21
38.00	40.96	32.96	15.96	45.88	34.91	17.91
39.00	40.78	32.78	15.78	45.57	34.60	17.60
40.00	40.59	32.59	15.59	45.25	34.28	17.28
41.00	40.39	32.39	15.39	45.05	33.95	16.95
42.00	40.17	32.17	15.17	44.84	33.62	16.62
43.00	39.95	31.95	14.95	44.61	33.29	16.29
44.00	39.72	31.72	14.72	44.38	32.95	15.95
45.00	39.48	31.48	14.48	44.14	32.61	15.61
46.00	39.24	31.24	14.24	43.90	32.26	15.26
47.00	38.99	30.99	13.99	43.65	31.92	14.92
48.00	38.74	30.74	13.74	43.40	31.58	14.58
49.00	38.48	30.48	13.48	43.15	31.24	14.24
50.00	38.23	30.23	13.23	42.89	30.89	13.89

Ek 4. AC-DC Yerleşimde Oluşacak Radyo Gürültüsü

Tablo Ek 4.1. Hibrit hatta AC hattın CIGRE ve BPA Standartlarına, DC hattın EPRI Standardına göre oluşan işitilebilir gürültü seviyesinin mesafeye bağlı değişimi

AC-DC						
	AC: CIGRE- DC: EPRI			AC: BPA- DC: EPRI		
x [m]	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)
-50.00	41.18	36.04	38.90	43.01	36.96	38.90
-49.00	41.34	36.29	39.25	43.18	37.21	39.25
-48.00	41.50	36.59	39.59	43.33	37.46	39.59
-47.00	41.65	36.94	39.94	43.48	37.71	39.94
-46.00	41.79	37.30	40.30	43.62	37.96	40.30
-45.00	41.92	37.66	40.66	43.76	38.21	40.66
-44.00	42.05	38.03	41.03	43.88	38.45	41.03
-43.00	42.16	38.40	41.40	43.99	38.70	41.40
-42.00	42.25	38.78	41.78	44.09	38.93	41.78
-41.00	42.33	39.17	42.17	44.17	39.17	42.17
-40.00	42.40	39.56	42.56	44.23	39.56	42.56
-39.00	42.44	39.96	42.96	44.27	39.96	42.96
-38.00	42.46	40.43	43.43	44.30	40.43	43.43
-37.00	42.46	41.05	44.05	44.29	41.05	44.05
-36.00	42.42	41.67	44.67	44.25	41.67	44.67
-35.00	42.35	42.30	45.30	44.18	42.30	45.30
-34.00	42.24	42.93	45.93	44.07	42.93	45.93
-33.00	42.29	43.56	46.56	43.92	43.56	46.56
-32.00	42.40	44.19	47.19	43.70	44.19	47.19
-31.00	42.49	44.83	47.83	43.61	44.83	47.83
-30.00	42.67	45.46	48.46	43.58	45.46	48.46
-29.00	43.09	46.09	49.09	43.77	46.09	49.09
-28.00	43.72	46.72	49.72	43.90	46.72	49.72
-27.00	44.35	47.35	50.35	44.35	47.35	50.35
-26.00	44.98	47.98	50.98	44.98	47.98	50.98
-25.00	45.60	48.60	51.60	45.60	48.60	51.60
-24.00	46.22	49.22	52.22	46.22	49.22	52.22
-23.00	46.83	49.83	52.83	46.83	49.83	52.83
-22.00	47.44	50.44	53.44	47.44	50.44	53.44
-21.00	48.03	51.03	54.03	48.03	51.03	54.03
-20.00	48.69	51.69	54.69	48.82	51.69	54.69
-19.00	49.38	52.38	55.38	49.62	52.38	55.38
-18.00	50.05	53.05	56.05	50.40	53.05	56.05
-17.00	50.69	53.69	56.69	51.15	53.69	56.69
-16.00	51.31	54.31	57.31	51.88	54.31	57.31
-15.00	51.89	54.89	57.89	52.56	54.89	57.89
-14.00	52.54	55.44	58.44	53.21	55.44	58.44
-13.00	53.13	55.94	58.94	53.80	55.94	58.94
-12.00	53.67	56.40	59.40	54.45	56.40	59.40

Tablo Ek 4.1'in devamı

-11.00	54.19	56.80	59.80	55.11	56.80	59.80
-10.00	54.76	57.14	60.14	55.68	57.14	60.14
-9.00	55.23	57.41	60.41	56.15	57.41	60.41
-8.00	55.61	57.61	60.61	56.53	57.61	60.61
-7.00	55.90	57.74	60.74	56.81	57.74	60.74
-6.00	56.08	57.78	60.78	57.00	57.78	60.78
-5.00	56.18	57.73	60.73	57.09	57.73	60.73
-4.00	56.18	57.61	60.61	57.10	57.61	60.61
-3.00	56.09	57.40	60.40	57.01	57.40	60.40
-2.00	55.92	57.11	60.11	56.89	57.11	60.11
-1.00	55.68	56.74	59.74	56.71	56.74	59.74
0.00	55.36	56.31	59.31	56.45	56.31	59.31
1.00	54.99	55.81	58.81	56.12	55.81	58.81
2.00	54.55	55.26	58.26	55.74	55.26	58.26
3.00	54.08	54.66	57.66	55.33	54.66	57.66
4.00	53.56	54.01	57.01	54.94	54.01	57.01
5.00	53.00	53.32	56.32	54.52	53.32	56.32
6.00	52.42	52.92	55.92	54.08	52.92	55.92
7.00	51.81	52.93	55.93	53.61	52.93	55.93
8.00	51.45	52.85	55.85	53.12	52.85	55.85
9.00	51.43	52.69	55.69	52.62	52.69	55.69
10.00	51.34	52.48	55.48	52.26	52.48	55.48
11.00	51.20	52.65	55.65	52.11	52.65	55.65
12.00	50.99	52.79	55.79	51.91	52.79	55.79
13.00	50.74	52.84	55.84	51.66	52.84	55.84
14.00	50.44	52.82	55.82	51.36	52.82	55.82
15.00	50.11	52.73	55.73	51.02	52.73	55.73
16.00	49.74	52.58	55.58	50.65	52.58	55.58
17.00	49.39	52.39	55.39	50.25	52.39	55.39
18.00	49.14	52.14	55.14	49.82	52.14	55.14
19.00	48.86	51.86	54.86	49.36	51.86	54.86
20.00	48.55	51.55	54.55	48.88	51.55	54.55
21.00	48.20	51.20	54.20	48.38	51.20	54.20
22.00	47.83	50.83	53.83	47.86	50.83	53.83
23.00	47.76	50.76	53.76	47.76	50.76	53.76
24.00	47.66	50.66	53.66	47.66	50.66	53.66
25.00	47.54	50.54	53.54	47.54	50.54	53.54
26.00	47.39	50.39	53.39	47.39	50.39	53.39
27.00	47.23	50.23	53.23	47.23	50.23	53.23
28.00	47.04	50.04	53.04	47.04	50.04	53.04
29.00	46.84	49.84	52.84	46.84	49.84	52.84
30.00	46.62	49.62	52.62	46.62	49.62	52.62
31.00	46.39	49.39	52.39	46.39	49.39	52.39
32.00	46.14	49.14	52.14	46.14	49.14	52.14
33.00	45.91	48.91	51.91	45.91	48.91	51.91
34.00	45.86	48.86	51.86	45.86	48.86	51.86
35.00	45.79	48.79	51.79	45.79	48.79	51.79
36.00	45.70	48.70	51.70	45.70	48.70	51.70
37.00	45.60	48.60	51.60	45.60	48.60	51.60

Tablo Ek 4.1'in devamı

38.00	45.48	48.48	51.48	45.48	48.48	51.48
39.00	45.35	48.35	51.35	45.35	48.35	51.35
40.00	45.22	48.22	51.22	45.22	48.22	51.22
41.00	45.07	48.07	51.07	45.07	48.07	51.07
42.00	44.92	47.92	50.92	44.92	47.92	50.92
43.00	44.75	47.75	50.75	44.75	47.75	50.75
44.00	44.58	47.58	50.58	44.58	47.58	50.58
45.00	44.41	47.41	50.41	44.41	47.41	50.41
46.00	44.23	47.23	50.23	44.23	47.23	50.23
47.00	44.05	47.05	50.05	44.05	47.05	50.05
48.00	43.86	46.86	49.86	43.86	46.86	49.86
49.00	43.66	46.66	49.66	43.66	46.66	49.66
50.00	43.47	46.47	49.47	43.47	46.47	49.47

Tablo Ek 4.2. Hibrit hatta AC hattın EPRI ve IREQ Standartlarına, DC hattın EPRI Standardına göre oluşan işitilebilir gürültü seviyesinin mesafeye bağlı değişimi

AC-DC						
	AC: EPRI- DC: EPRI			AC: IREQ- DC: EPRI		
x [m]	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)	Şiddetli Yağmur (L1)	Yağmur (L50)	Güzel Hava (L50)
-50.00	49.99	40.28	38.90	44.74	37.82	38.90
-49.00	50.15	40.44	39.25	44.91	38.08	39.25
-48.00	50.31	40.60	39.59	45.06	38.33	39.59
-47.00	50.46	40.75	39.94	45.21	38.58	39.94
-46.00	50.60	40.89	40.30	45.35	38.83	40.30
-45.00	50.73	41.02	40.66	45.49	39.07	40.66
-44.00	50.85	41.14	41.03	45.61	39.32	41.03
-43.00	50.97	41.33	41.40	45.72	39.56	41.40
-42.00	51.06	41.57	41.78	45.82	39.80	41.78
-41.00	51.14	41.80	42.17	45.90	40.03	42.17
-40.00	51.21	42.03	42.56	45.96	40.26	42.56
-39.00	51.25	42.25	42.96	46.00	40.48	42.96
-38.00	51.27	42.46	43.43	46.03	40.70	43.43
-37.00	51.27	42.67	44.05	46.02	41.05	44.05
-36.00	51.23	42.86	44.67	45.98	41.67	44.67
-35.00	51.16	43.03	45.30	45.91	42.30	45.30
-34.00	51.05	43.19	45.93	45.80	42.93	45.93
-33.00	50.89	43.56	46.56	45.65	43.56	46.56
-32.00	50.82	44.19	47.19	45.59	44.19	47.19
-31.00	50.76	44.83	47.83	45.53	44.83	47.83
-30.00	50.65	45.46	48.46	45.42	45.46	48.46
-29.00	50.48	46.09	49.09	45.25	46.09	49.09
-28.00	50.23	46.72	49.72	45.00	46.72	49.72
-27.00	49.90	47.35	50.35	44.83	47.35	50.35

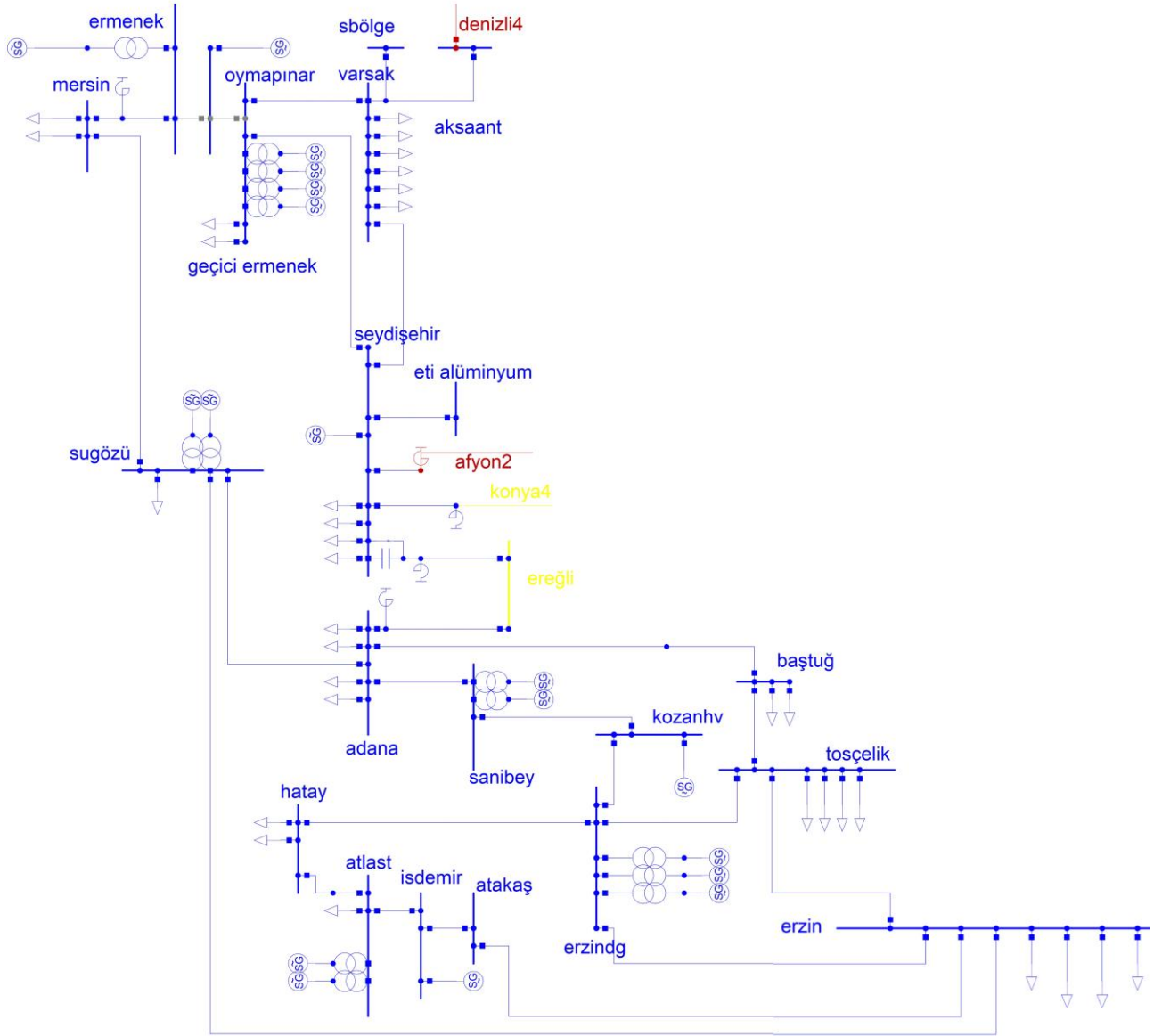
Tablo Ek 4.2'nin devamı

-26.00	49.78	47.98	50.98	45.29	47.98	50.98
-25.00	50.18	48.60	51.60	46.14	48.60	51.60
-24.00	50.56	49.22	52.22	46.99	49.22	52.22
-23.00	51.12	49.83	52.83	47.84	49.83	52.83
-22.00	52.06	50.44	53.44	48.68	50.44	53.44
-21.00	53.00	51.03	54.03	49.51	51.03	54.03
-20.00	53.93	51.69	54.69	50.33	51.69	54.69
-19.00	54.84	52.38	55.38	51.13	52.38	55.38
-18.00	55.73	53.05	56.05	51.91	53.05	56.05
-17.00	56.59	53.69	56.69	52.66	53.69	56.69
-16.00	57.50	54.31	57.31	53.38	54.31	57.31
-15.00	58.61	54.89	57.89	54.07	54.89	57.89
-14.00	59.63	55.44	58.44	54.71	55.44	58.44
-13.00	60.55	55.94	58.94	55.44	55.94	58.94
-12.00	61.38	56.40	59.40	56.27	56.40	59.40
-11.00	62.11	56.80	59.80	57.00	56.80	59.80
-10.00	62.74	57.14	60.14	57.63	57.14	60.14
-9.00	63.27	57.41	60.41	58.16	57.41	60.41
-8.00	63.69	57.61	60.61	58.58	57.61	60.61
-7.00	64.00	57.74	60.74	58.89	57.74	60.74
-6.00	64.21	57.78	60.78	59.10	57.78	60.78
-5.00	64.30	57.73	60.73	59.20	57.73	60.73
-4.00	64.29	57.61	60.61	59.18	57.61	60.61
-3.00	64.18	57.40	60.40	59.07	57.40	60.40
-2.00	64.04	57.11	60.11	58.86	57.11	60.11
-1.00	63.86	56.74	59.74	58.63	56.74	59.74
0.00	63.60	56.41	59.31	58.37	56.31	59.31
1.00	63.27	56.03	58.81	58.04	55.81	58.81
2.00	62.89	55.60	58.26	57.65	55.26	58.26
3.00	62.46	55.13	57.66	57.23	54.66	57.66
4.00	62.00	54.61	57.01	56.77	54.01	57.01
5.00	61.52	54.05	56.32	56.29	53.32	56.32
6.00	61.05	53.47	55.92	55.81	52.92	55.92
7.00	60.59	52.93	55.93	55.34	52.93	55.93
8.00	60.10	52.85	55.85	54.85	52.85	55.85
9.00	59.60	52.69	55.69	54.35	52.69	55.69
10.00	59.08	52.48	55.48	53.83	52.48	55.48
11.00	58.55	52.65	55.65	53.30	52.65	55.65
12.00	58.01	52.79	55.79	52.77	52.79	55.79
13.00	57.50	52.84	55.84	52.52	52.84	55.84
14.00	57.01	52.82	55.82	52.22	52.82	55.82
15.00	56.51	52.73	55.73	51.89	52.73	55.73
16.00	56.01	52.58	55.58	51.52	52.58	55.58
17.00	55.51	52.39	55.39	51.12	52.39	55.39
18.00	55.00	52.14	55.14	50.69	52.14	55.14
19.00	54.49	51.86	54.86	50.23	51.86	54.86
20.00	53.98	51.55	54.55	49.75	51.55	54.55
21.00	53.46	51.20	54.20	49.25	51.20	54.20
22.00	52.94	50.83	53.83	48.73	50.83	53.83

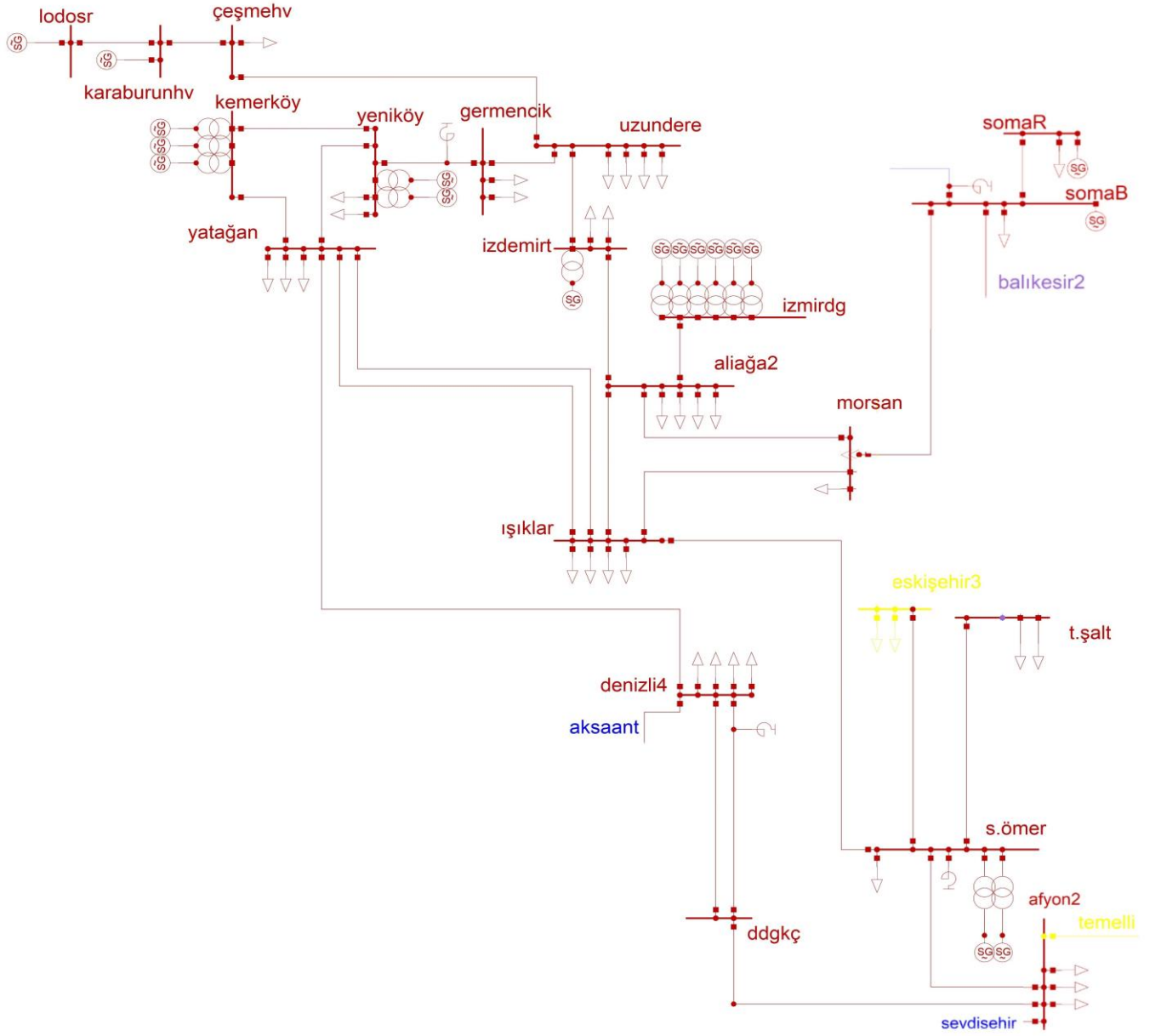
Tablo Ek 4.2'nin devamı

23.00	52.41	50.76	53.76	48.19	50.76	53.76
24.00	51.87	50.66	53.66	47.66	50.66	53.66
25.00	51.33	50.54	53.54	47.54	50.54	53.54
26.00	50.79	50.39	53.39	47.39	50.39	53.39
27.00	50.24	50.23	53.23	47.23	50.23	53.23
28.00	49.69	50.04	53.04	47.04	50.04	53.04
29.00	49.14	49.84	52.84	46.84	49.84	52.84
30.00	48.58	49.62	52.62	46.62	49.62	52.62
31.00	48.30	49.39	52.39	46.39	49.39	52.39
32.00	48.11	49.14	52.14	46.14	49.14	52.14
33.00	47.91	48.91	51.91	45.91	48.91	51.91
34.00	47.70	48.86	51.86	45.86	48.86	51.86
35.00	47.48	48.79	51.79	45.79	48.79	51.79
36.00	47.26	48.70	51.70	45.70	48.70	51.70
37.00	47.03	48.60	51.60	45.60	48.60	51.60
38.00	46.79	48.48	51.48	45.48	48.48	51.48
39.00	46.55	48.35	51.35	45.35	48.35	51.35
40.00	46.30	48.22	51.22	45.22	48.22	51.22
41.00	46.05	48.07	51.07	45.07	48.07	51.07
42.00	45.80	47.92	50.92	44.92	47.92	50.92
43.00	45.55	47.75	50.75	44.75	47.75	50.75
44.00	45.29	47.58	50.58	44.58	47.58	50.58
45.00	45.03	47.41	50.41	44.41	47.41	50.41
46.00	44.77	47.23	50.23	44.23	47.23	50.23
47.00	44.51	47.05	50.05	44.05	47.05	50.05
48.00	44.25	46.86	49.86	43.86	46.86	49.86
49.00	43.99	46.66	49.66	43.66	46.66	49.66
50.00	43.73	46.47	49.47	43.47	46.47	49.47

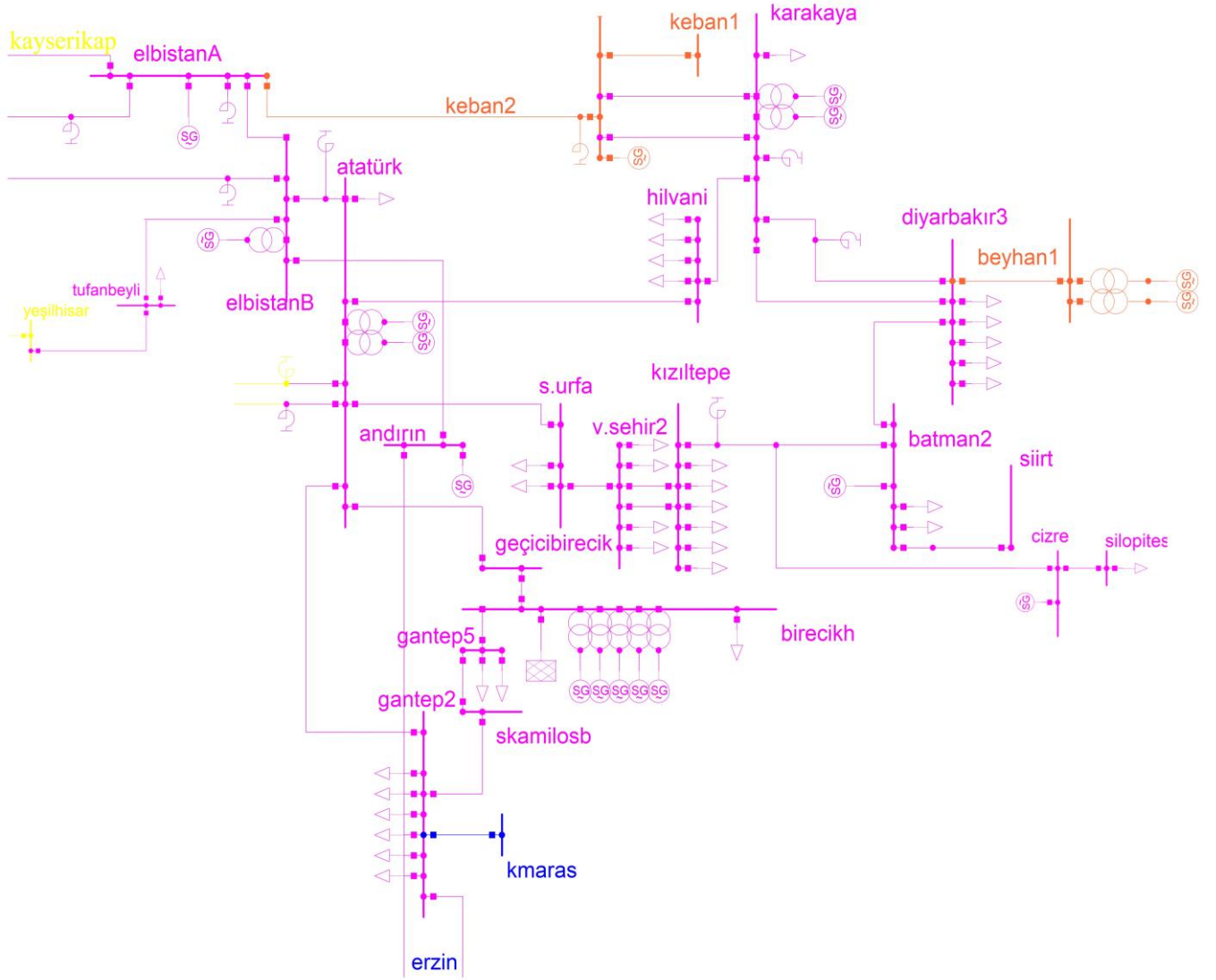
Ek 5. Türkiye Elektrik İletim Sisteminin Digsilent Power Factory’de Modellenmesi



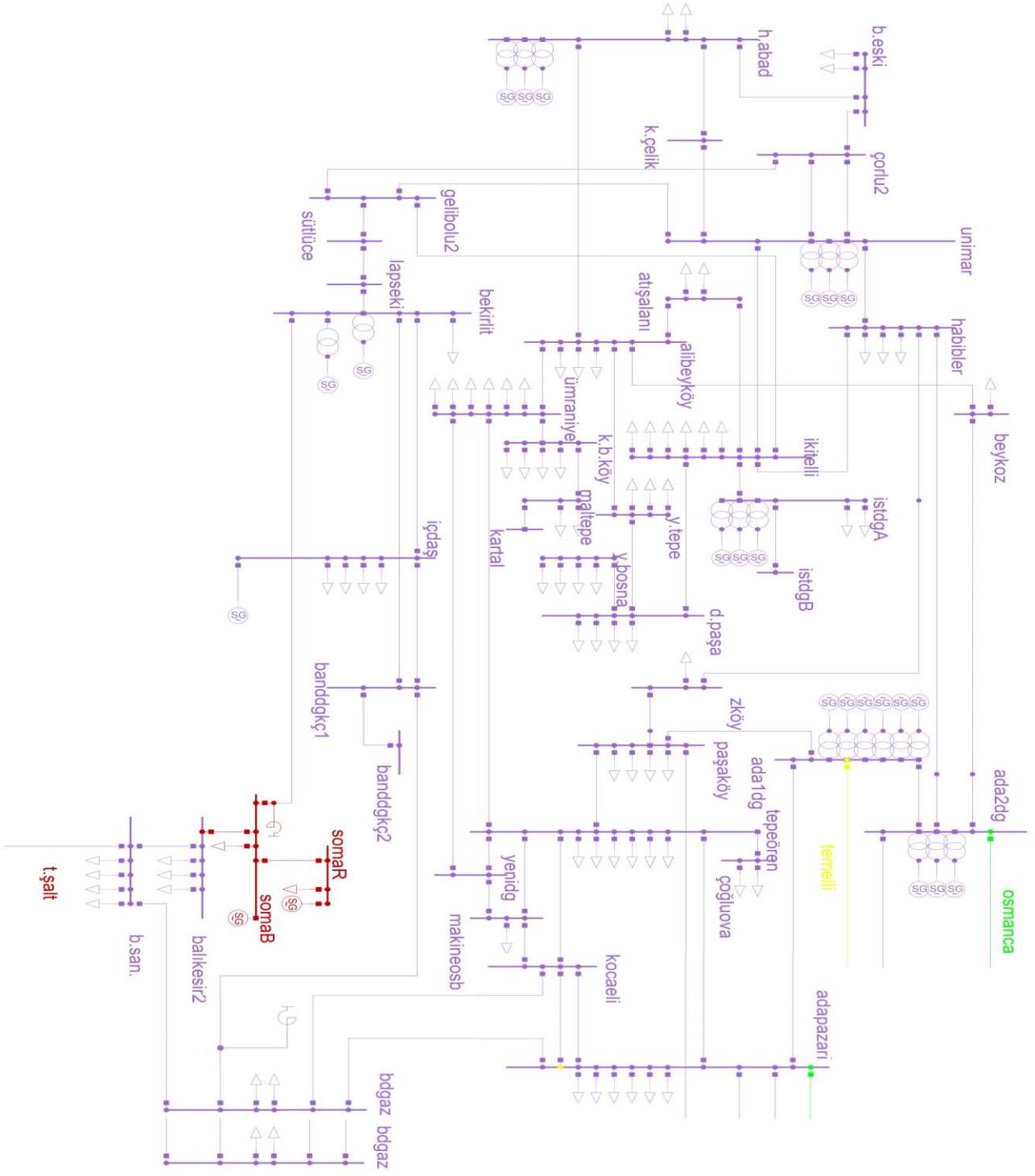
Şekil Ek 5.1. Akdeniz Bölgesi elektrik iletim sistemi



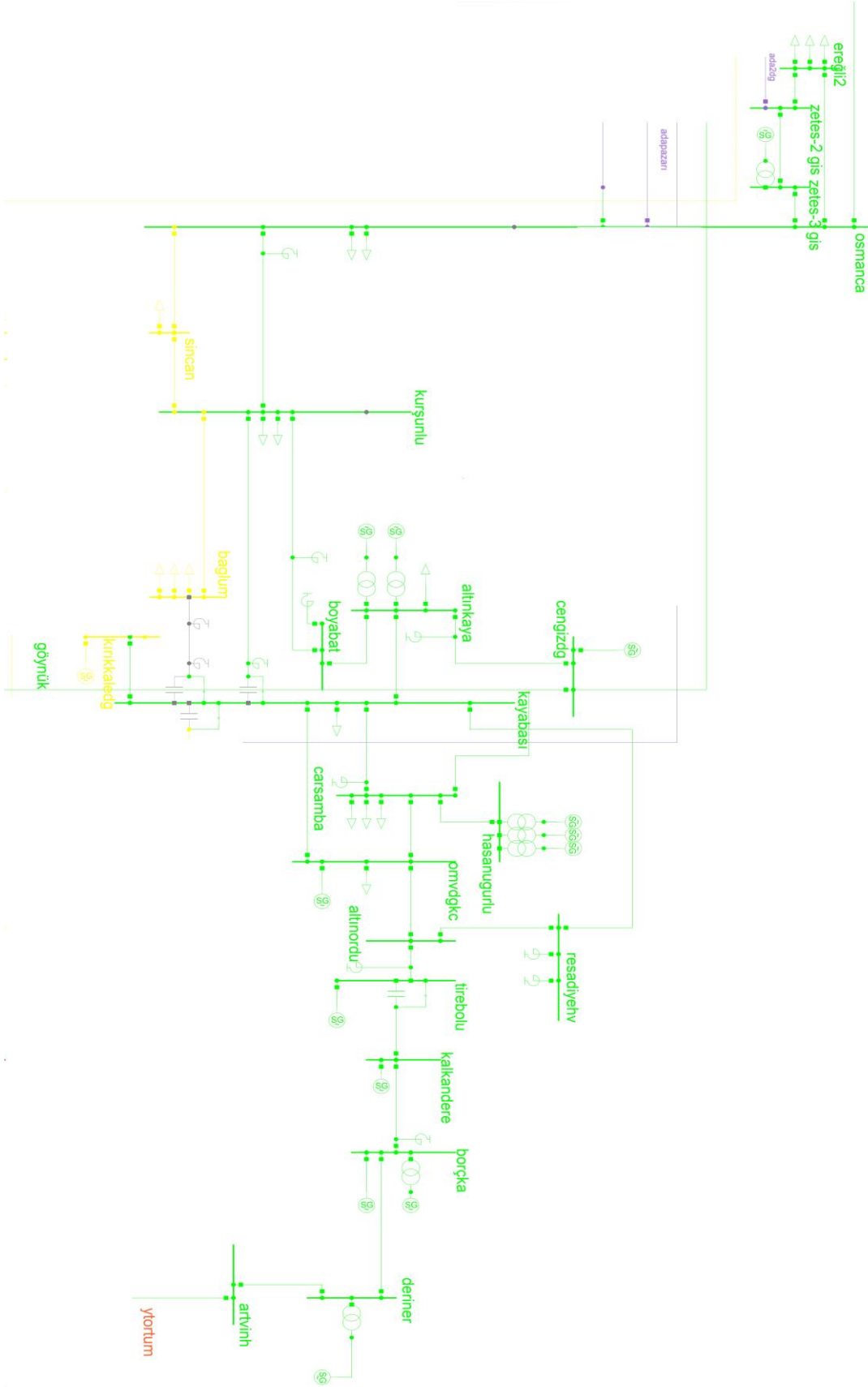
Şekil Ek 5.2. Ege Bölgesi elektrik iletim sistemi



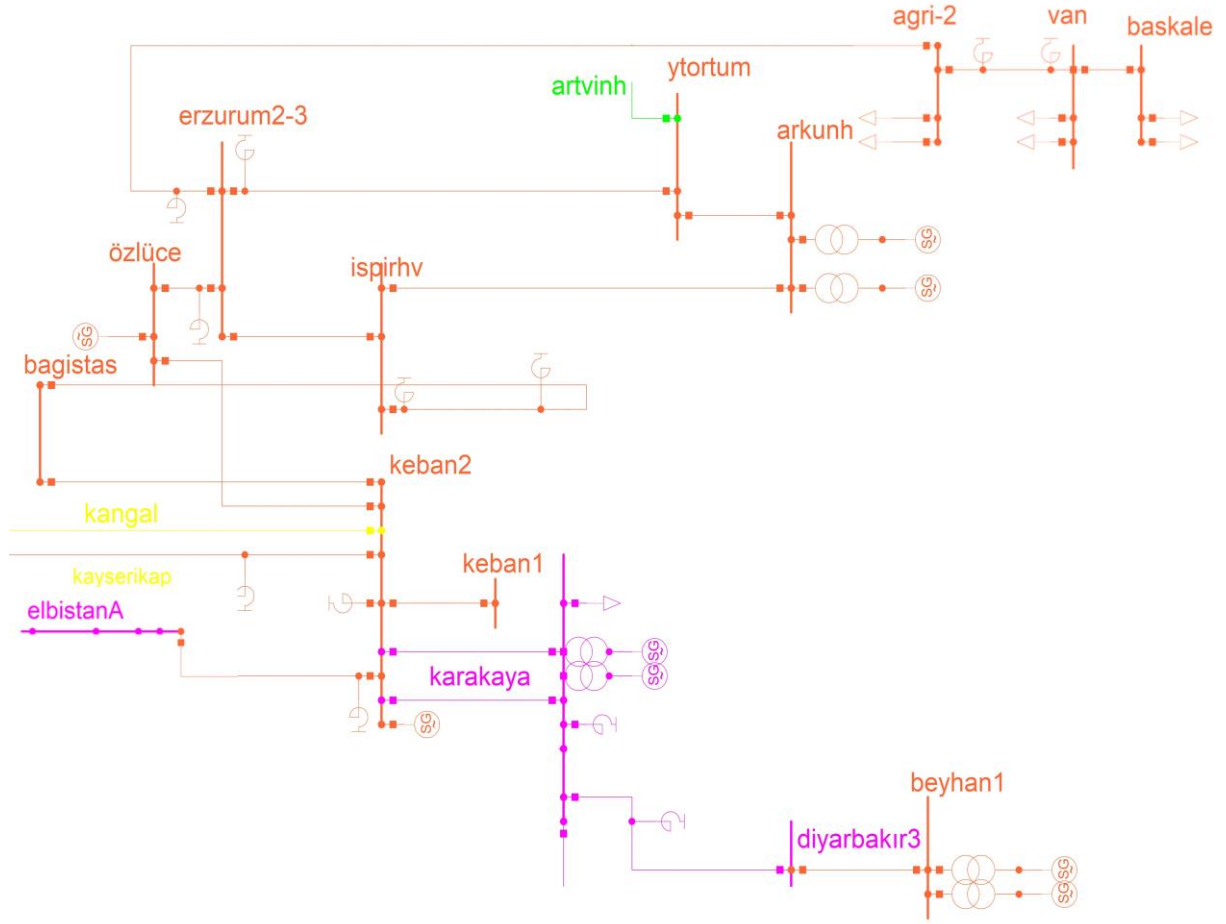
Şekil Ek 5.3. Güneydoğu Anadolu Bölgesi elektrik iletim sistemi



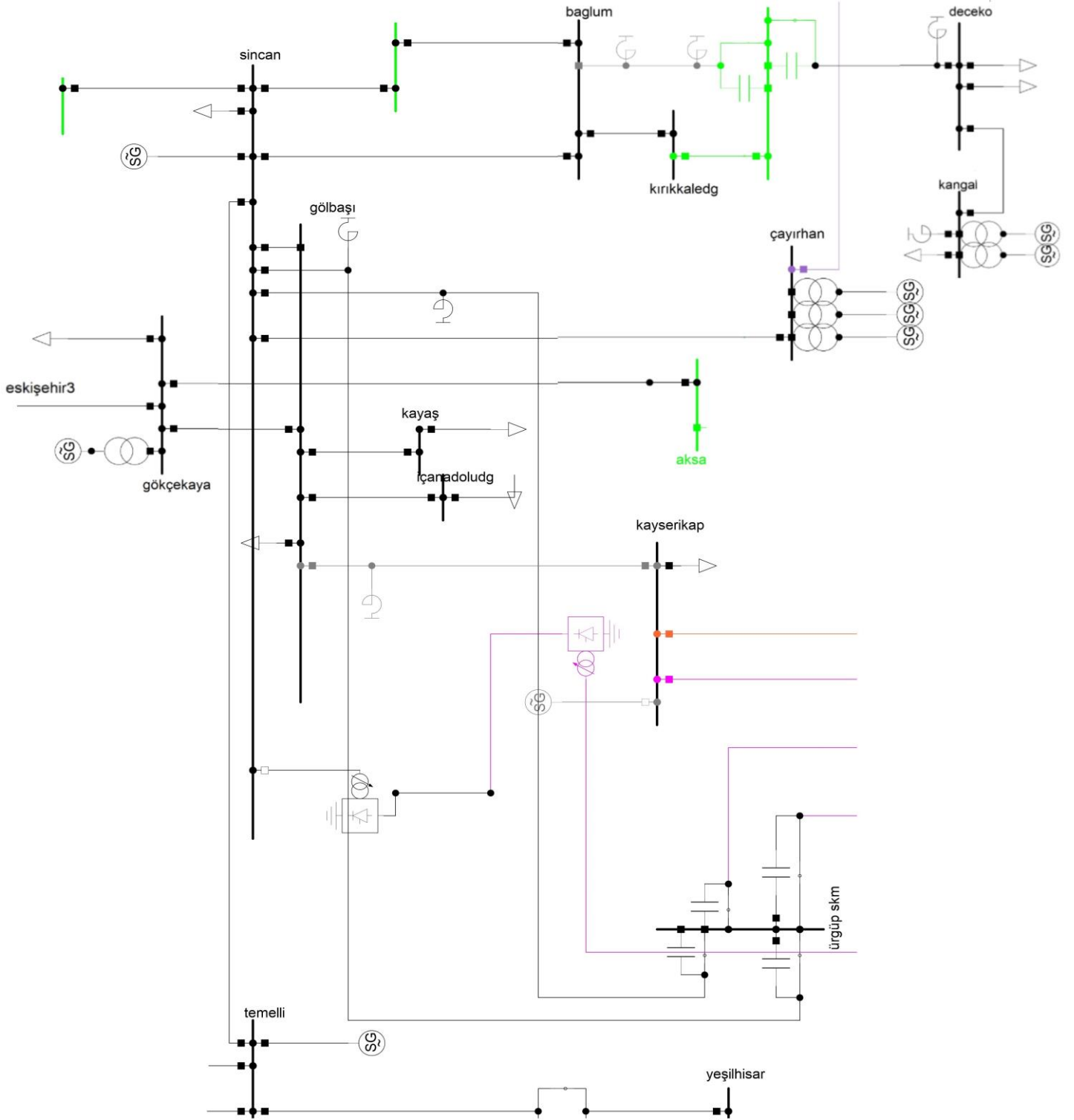
Şekil Ek 5.4. Marmara Bölgesi elektrik iletim sistemi



Şekil Ek 5.5. Karadeniz Bölgesi elektrik iletim sistemi



Şekil Ek 5.6. Doğu Anadolu Bölgesi elektrik iletim sistemi



Şekil Ek 5.7. İç Anadolu Bölgesi elektrik iletim sistemi

Ek 6. Şekil 57'deki Haritada Gösterilen Bara Bilgileri

Tablo Ek 6. Şekil 57'deki bara bilgileri

Bara No	Bara Adı	Bara Gerilimi (kV)
1	Borçka	400
2	Kalkandere	400
3	Tirebolu	400
4	Samsun	400
5	Çarşamba	400
6	Cengiz	400
7	Altinkaya	400
8	Boyabat	400
9	Kurşunlu	400
10	Osmanca	400
11	Erzurum	400
12	Varsak	400
13	Oymapınar	400
14	Ermenek	400
15	Mersin	400
16	Sugözü	400
17	Erzin	400
18	Gantep2	400
19	Atatürk	400
20	Seydişehir	400
21	Adana	400
22	Ereğli	400
23	Sincan	400
24	Elbistan A	400
25	Elbistan B	400
26	Keban	400
27	Gölbaşı	400
28	Temelli	400
29	Yeşilhisar	400
30	Bağlum	400
31	Kayseri	400
32	Kangal	400
33	Deçeko	400
34	Özlüce	400
35	Deriner	400
36	Konya	400
37	Karakaya	400
38	Arkun	400
39	Ağrı	400

Tablo Ek 6'nın devamı

40	Van	400
41	Başkale	400
42	Karakaya	400
43	Hilvani	400
44	Diyarbakır	400
45	Beyhan	400
46	Batman	400
47	Viranşehir	400
48	Şanlıurfa	400
49	Birecik	400
50	Hasanuşurlu	400
51	Kızıltepe	400
52	Aksa	400
53	Denizli	400
54	Afyon	400
55	Seyitömer	400
56	Eskişehir	400
57	Yatağan	400
58	Yeniköy	400
59	Kemerköy	400
60	Işıklar	400
61	Morsan	400
62	Soma	400
63	Bekirli	400
64	İçdaş	400
65	Bursasanayi	400
66	Ereğli	400
67	Zetes	400
68	Ada2dg	400
69	Hatay	400
70	Yunusemre	400
71	Babaeski	400
72	Habat	400
73	Unimar	400
74	İkitelli	400
75	Ümraniye	400
76	Tepeören	400
77	Maltepe	400
78	Yenibosna	400
79	Habibler	400
80	Beykoz	400
81	Adapazarı	400
82	Gökçekaya	400

ÖZGEÇMİŞ

Eda KARACA, 2007’de Nevzat Karabağ Anadolu Öğretmen Lisesi’nden, 2012’de de Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2016’da Karadeniz Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği’nde yüksek lisans eğitimini tamamladı. Yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.

SCI/SCI-e indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. Karaca, E. & Nuroğlu, F. M., (2024). Analysis ff Hybrid AC/DC Transmission System: A Turkey Case Study. IET Generation, Transmission & Distrubution, 18 (18), 3017-3028.

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

1. Karaca, E. & Nuroğlu, F. M., (2024). Conversion of Single Circuit AC Transmission Lines to Bipolar DC . *6th IEEE Global Power, Energy and Communication Conference, GPECOM 2024*, 322-327, Budapest, Hungary.
2. Er, Y., & Karaca, E. (2021). Farklı Yöntemlerle Karadeniz Bölgesi’nin Aylık Elektrik Tüketim Tahmini. *Sürdürülebilirlik İçin Akademik Araştırmalar*, 137-147.
3. Karaca, E. & Nuroğlu, F. M., (2016). HVDC Modelling of Electricity Transmission System and Analysis of Load Flow in DigSilent PowerFactory . *International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, 594-596, Afyon, Turkey.