İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK DOĞRU GERİLİM (HVDC) İLETİM HATLARININ KORONA KARAKTERİSTİKLERİ VE ELEKTROMANYETİK ETKİLERİ

DOKTORA TEZİ

Aytuğ FONT

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

EYLÜL 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK DOĞRU GERİLİM (HVDC) İLETİM HATLARININ KORONA KARAKTERİSTİKLERİ VE ELEKTROMANYETİK ETKİLERİ

DOKTORA TEZİ

Aytuğ FONT
(504122001)

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR

EYLÜL 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504122001 numaralı Doktora Öğrencisi Aytuğ FONT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "YÜKSEK DOĞRU GERİLİM (HVDC) İLETİM HATLARININ KORONA KARAKTERİSTİKLERİ VE ELEKTROMANYETİK ETKİLERİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Şükran Emel ÖNAL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Mukden UĞUR Türk Alman Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Hasbi İSMAİLOĞLU Kocaeli Üniversitesi	.....
	Dr. Öğr. Üyesi Suat İLHAN İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 21.07.2020
Savunma Tarihi : 29.09.2020

Aileme ve Arkadaşlarıma,

ÖNSÖZ

Doktora tezim boyunca beni bilgisi, vizyonu ve değerli fikirleri ile yönlendiren, takıldığım yerlerde yardımlarını benden esirgemeyen, yaptırdığı projelere beni de dahil edip tezime maddi destek sağlayan, birlikte çalışmaktan her zaman keyif aldığım danışman hocam Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR'e çok teşekkür ederim. Ayrıca tez izleme jürimde olup, yaptıkları değerli katkılar nedeniyle Prof. Dr. Şükran Emel ÖNAL ve Prof. Dr. Mukden UĞUR'a çok teşekkür ederim.

Laboratuvarda özellikle deneysel çalışmalarımda takıldığım yerlerde verdiği fikirlerle ilerlememi sağlayan Dr. Öğ. Üy. Suat İLHAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, "Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TUBITAK" tarafından "Türkiye-Meksika İkili Araştırma ve Teknoloji İşbirliği" çerçevesinde "215E262 proje numaralı Yüksek Doğru Gerilim (HVDC) İletim Hatlarının Korona Karakteristikleri ve Elektromanyetik Etkileri" projesi kapsamında finanse edilmiştir. Bunun için başta TÜBİTAK olmak üzere bütün proje ekibine (Dr. Öğr. Üyesi Hasbi İSMAİLOĞLU ve Prof. Dr. Fermin PASCUAL ESPİNO CORTES) katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Test düzeneğimin devreye alınmasında büyük emeği olan Y.Müh. İsa İLİSU hocama çok teşekkür ederim.

İTÜ'deki araştırma görevliliğim ile tanıştığım ve çok kısa sürede hayatımın çok önemli parçaları olan, sadece doktora sırasında değil her zaman beni destekleyen ve yalnız bırakmayan mesai arkadaşlığından öte sevgili dostlarım Abdullah POLAT'a, Furkan BAŞKURT'a, Alparslan ZEHİR'e, Emrah SALMAN'a ve her fırsatta yardıma koşmaya çekinmeyen sevgili hocam Ahmet Kubilay ATALAY'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmalarım sırasında verdiği destek ile motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan sevgili dostum Ahmet Emin TIĞLI'ya çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım süresince bana, doktoramı tamamlamak için olanak ve zaman sağladığı için Oluş SÖNMEZ başta olmak üzere SÖNMEZ TRAFO firmasına destekleri için teşekkür ederim.

Ağustos 2020 Aytuğ FONT

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Korona Boşalmaları 2
1.1.1 Negatif DC Korona Gelişimi 3
1.1.1.1 Trichel kanal boşalması 4
1.1.1.2 Negatif darbesiz parıltı boşalması 4
1.1.1.3 Negatif kanal boşalması 4
1.1.2 Pozitif DC Korona Gelişimi 4
1.1.2.1 Yaylım korona boşalması 5
1.1.2.2 Başlangıç kanal boşalması 6
1.1.2.3 Pozitif parıltı boşalması 6
1.1.2.4 Delinme kanal boşalması 6
1.1.3 AC koronanın gelişimi 7
1.2 Literatür Taraması 7
1.3 Tezin Amacı 11
1.4 Tezin İçeriği 13
2. TÜRKİYE İÇİN BİR HVDC İLETİM SİSTEMİ TASARIMI VE TEKNİK ANALİZİ **15**
2.1 Türkiye İletim Sistemine Genel Bakış 15
2.2 Türkiye İçin Bir HVDC İletim Sistemi Fonksiyon Tasarımı 16
2.3 Tasarlanan Sistem İçin Hat Kayıplarının Hesaplanması 18
2.4 Tasarlanan Sistem İçin Gerilim Düşümü Hesaplanması 23
2.5 Tasarlanan Sistem İçin Korona Kaybı Hesaplanması 26
2.6 Hat Parametrelerinin Hesabına Sıcaklık Etkisinin Eklenmesi 27
3. KORONA KAFESİ TASARIMI VE MODEL İLETKENLERİN BELİRLENMESİ **41**
3.1 Korona Kafesi 41
3.2 Korona Kafesi Tasarım Kriterleri 43
3.3 Korona Kafesi Tasarımı 44
3.4 Koruma Elektrodu Boyutlarının Belirlenmesi 51
3.5 Model İletkenlerin Belirlenmesi 54
3.6 Elektrik Alan Analizleri 57

4. DENEYSEL ÇALIŞMA 59
4.1 Deneysel Çalışmaların Özeti 59
4.2 2.7 m, 60 cm Çaplı Korona Kafesi İle Yapılan Deneyler 66
4.2.1 Korona başlangıç gerilimlerinin belirlenmesi 66
4.2.2 Korona akımlarının ölçülmesi 69
4.2.3 Korona kayıpları 72
4.2.4 Radyo girişim gerilimi (RIV) 74
4.2.5 Duyulabilir gürültü (AN) 75
4.3 6 m, 2x2 m Kesitli Korona Kafesi İle Yapılan Deneyler 77
4.3.1 Korona başlangıç gerilimlerinin belirlenmesi 78
4.3.2 Korona akımlarının ölçülmesi 80
4.3.3 Korona kayıpları 84
4.3.4 Radyo girişimi (RIV) 86
4.3.5 Duyulabilir gürültü (AN) 88
5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ÇALIŞMALARI 91
5.1 2.7 m, 60 cm Çaplı Korona Kafesi Analizleri 91
5.2 6 m, 2x2 m Kesitli Korona Kafesi Analizleri 93
6. SONUÇLAR 99
KAYNAKLAR 105
EKLER 115
ÖZGEÇMİŞ 135

KISALTMALAR

AAAC : All Aluminium Alloy Conductor
AAC : All Aluminium Conductor
AC : Alternative Current
ACSR : Aluminium Conductor Steel-Reinforced
ACSR/TW : Aluminum Conductors Steel Reinforced-Trapezoidal
AN : Audible Noise
CIGRE : Conseil International des Grands Réseaux Électriques
CL : Corona Loss
DC : Direct Current
GMR : Geometrical Mean Radius
HVDC : High Voltage Direct Current
MCM : One Thousand Circular Mils
PD : Partial Discharge
RI : Radio Interference
SEY : Sonlu Elemanlar Yöntemi
YBY : Yük Benzetim Yöntemi

SEMBOLLER

S_0 : Sınır yüzeyi
S_{max} : Maksimum görünür güç
I : Hat akımı
I_1 : Demetteki iletkenden geçen akım
P : Kayıp güç
P_{toplam} : Toplam kayıp güç
L : İletim hattı uzunluğu
ΔU : Gerilim düşümü
δU : % gerilim düşümü
n : Demetteki iletken sayısı
k_c : İletken yüzey pürüzüne göre belirlenmiş katsayı
r : Demetteki iletkenlerin yarıçapı
g : İletkendeki maksümün elektrik alanı
g_0 : Referans elektrik alanını
H : İletkenin yerden yüksekliği
S : Kutuplar arası uzaklık
P_j : Joule kayıpları
P_s : Güneşden kaynaklanan ısınma (solar heating)
P_M : Manyetik ısınma (magnetic heating)
P_i : Korona nedeniyle oluşan ısınma (corona heating)
P_c : Konvektif soğuma (convective cooling)
$P_{çıkış}$: Cihazın şebeke bağlantı noktasında ölçülen aktif güç değeri
P_r : Radyasyona bağlı soğuma (radiative cooling)
P_W : Buharlaşmaya dayalı soğuma (evaporative cooling)
R_{DC} : İletkenin doğru akım direnci
ρ : İletkenlik
ρ_{20} : 20 ºC'deki iletkenlik
α_{20} : Birinci dereceden sıcaklık katsayısı
ζ_{20} : İkinci dereceden sıcaklık katsayısı
k_{sk} : Deri etkisi katsayısı
P_{core} : Çekirdekte oluşan ısınma
P_{redis} : Akım yoğunluklarının alüminyum iletken tabakalara tekrar dağılması sonucu oluşan kayıp
α_s : Yüzey soğurganlığı
I_T : Global ışıma yoğunluğu
I_B : Yüzeyle olan direkt güneş ışıması
I_d : Havadan yayılan radyasyon
F : Topraktan yansıyan radyasyon
D : İletken çapı
H_s : Solar yükseklik
N_s : Aydınlık faktörü

$\boldsymbol{\varphi}$: Enlem
$\boldsymbol{\delta_s}$: Ekvator ile dünyanın merkezinden güneşin merkezine çizilen doğru arasındaki açı
$\boldsymbol{N^*}$: Gün
$\boldsymbol{Z}$: Güneşin saatlik açısı
$\boldsymbol{\eta}$: Güneş ışını ile iletken ekseni arasındaki açıdır
$\boldsymbol{\gamma_s}$: İletkenin azimutu
$\boldsymbol{\gamma_c}$: Güneşin azimutu
$\boldsymbol{\lambda_f}$: Havanın termal iletkenliği
$\boldsymbol{T_f}$: İletken yüzeyine temas eden sıcaklıktaki termal iletkenliği
$\boldsymbol{T_s}$: İletken yüzey sıcaklığı
$\boldsymbol{T_a}$: Havanın sıcaklığı
$\boldsymbol{Nu}$: Nusselt katsayısı
$\boldsymbol{G_r}$: Grashof sayısını
$\boldsymbol{P_r}$: Prandtl sayısı
$\boldsymbol{\beta}$: İletkenin yatay düzlemden eğimi
$\boldsymbol{Nu_0}$: Nusselt katsayısının iletkenin yatay pozisyonu için değeri
$\boldsymbol{Nu_\beta}$: Nusselt katsayısının iletkenin eğimli durum için değeri
$\boldsymbol{R_e}$: Reynolds katsayısı
$\boldsymbol{v}$: Rüzgar hızı
$\boldsymbol{v_f}$: Havanın kinetik viskozitenin
$\boldsymbol{\gamma}$: Havanın yoğunluğu
$\boldsymbol{\mu_f}$: Havanın dinamik viskizitesidir
$\boldsymbol{Nu_\delta}$: Nusselt kaysayısı (rüzgarın iletkene açı yaparak estiği durum için)
$\boldsymbol{Nu_{90}}$: Nusselt kaysayısı (rüzgarın iletkene dik estiği durum için)
$\boldsymbol{\sigma_B}$: Stefan-Boltzmann katsayısı
$\mathfrak{F}_{c-g}$: Radyasyon enerjisinin toprağa yayılan parçası
$\mathfrak{F}_{c-sky}$: Radyasyon enerjisinin havaya yayılan parçasıdır.
$\boldsymbol{\varepsilon_s}$: İletken yüzeyinin ışıma katsayısı
$\boldsymbol{D_s}$: Çok telli iletkenin geometrik yarıçapıdır
$\boldsymbol{\Gamma}$: dB cinsinden radyo girişimi
$\boldsymbol{\Gamma_0}$: referans radyo girişimi
$\boldsymbol{n_0}$: referans demet iletken sayısı
$\boldsymbol{d_0}$: Referans iletken yarıçapı
$\boldsymbol{AN_0}$: Referans gürültü değeri
$\boldsymbol{R}$: Radyal uzaklık

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: HVDC İletiminde kullanılacak iletkenlerin DC dirençleri, [Ω/km]..... 19
Çizelge 2.2: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış ortalama hat kayıpları 20
Çizelge 2.3: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (500 kV için)..... 21
Çizelge 2.4: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (600 kV için)..... 22
Çizelge 2.5: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış ortalama gerilim düşümleri..... 23
Çizelge 2.6: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümü (500 kV için). 24
Çizelge 2.7: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümü (600 kV için). 25
Çizelge 2.8: Farklı konfigürasyonlarda DC korona kaybı hesabı..... 26
Çizelge 2.9: Doğal konveksiyon katsayıları 31
Çizelge 2.10: Hesaplanmış aylara göre güneş ışıması değerleri..... 34
Çizelge 2.11: Hat ısınmasına göre kayıp ve gerilim düşümü değişimleri [%] 35
Çizelge 2.12: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (500 kV için).... 36
Çizelge 2.13: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (600 kV için).... 37
Çizelge 2.14: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümleri (500 kV) .. 38
Çizelge 2.15: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümleri (600 kV) .. 39
Çizelge 3.1: İki kutuplu sistemde iletken çevresinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetleri..... 47
Çizelge 3.2: Korona kafesi kullanılarak elde edilen maksimum elektrik alan şiddetleri..... 49
Çizelge 3.3: Farklı boyutlarda korona kafeslerinde elde edilmiş elektrik alan şiddetleri..... 50
Çizelge 3.4: Korona kafesi içerisindeki iletkende oluşan makzimum ve minimum elektrik alan şiddetlerinin, koruma elektrotu uzunluğuna göre değşimleri..... 53
Çizelge 3.5: İletkenlerin hesaplanmış geometrik ortalama yarıçapları (GMR)..... 55
Çizelge 3.6: Ölçeklenmiş GMR değerleri üzerinden hesaplanmış demet açıklıkları 56
Çizelge 3.7: Korona kafesinde farklı iletken durumları için oluşan elektrik alan şiddetleri..... 58
Çizelge 4.1: 7 mm tekil çubuk iletken için korona akımı ölçüm sonuçları 70
Çizelge 4.2: 2x4 mm (2'li demet iletken) için korona akımları (Demet açıklığı = 2 cm) 71
Çizelge 4.3: 2x4 mm (2'li demet iletken) için korona akımları (Demet açıklığı = 4 cm) 71
Çizelge 4.4: 2x4 mm (2'li demet iletken) için korona akımları (Demet açıklığı = 6 cm) 71
Çizelge 4.5: Tekil iletkenlerde hesaplanmış korona kayıplarının gerilimle değişimi 73
Çizelge 4.6: RI katsayılarının mevsimsel değişimleri 74
Çizelge 4.7: Tekil iletkenlerde hesaplanmış RIV değerleri..... 75
Çizelge 4.8: Duyulabilir gürültü için belirlenmiş sabit değerler 76
Çizelge 4.9: Tekil iletkenlerde hesaplanmış AN değerleri..... 76
Çizelge 4.10: İletken konfigürasyonlarından elde edilmiş korona başlangıç gerilimleri..... 79

Çizelge 4.11: İletken konfigürasyonlarında elde edilmiş korona sönme gerilimleri . 80
Çizelge 4.12: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için korona akımı sonuçları 82
Çizelge 4.13: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için hesaplanmış korona kaybı değerleri 84
Çizelge 4.14: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için RIV sonuçları 86
Çizelge 4.15: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için AN sonuçları 88
Çizelge 5.1: Tekil iletken benzetimlerinde elde edilen maksimum elektrik alan şiddetleri 92
Çizelge 5.2: Tüm iletken yapıları için korona başlangıç alan şiddetleri 93
Çizelge 5.3: Ölçeklenmiş iletkenlerde oluşan elektrik alan şiddetleri 97
Çizelge 5.4: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için max. elektrik alan hesabı 97

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Silindir - düzlem elektrot sisteminde iyonlaşmanın oluşumu (negatif DC) 3
Şekil 1.2: Silindir - düzlem elektrot sisteminde iyonlaşmanın oluşumu (pozitif DC). 5
Şekil 2.1: Türkiye'nin 400 kV'luk AC iletim hattı şebekesi 15
Şekil 2.2: Türkiye'deki sırt sırta HVDC bağlantısı 16
Şekil 2.3: Keban –Adapazarı arası HVDC iletim sistemi 17
Şekil 2.4: İki kutuplu HVDC iletim sistemi 17
Şekil 2.5: 3000 MW maksimum iletilen güce göre düzenlenmiş günlük yük eğrisi. 19
Şekil 2.6: Aylara göre güneş ışıması 33
Şekil 2.7: Aylara göre güneşlenme değerleri 34
Şekil 2.8: Türkiye için 2016 yılı rüzgar haritası 35
Şekil 3.1: Küçük boyutlu korona kafesi örneği 42
Şekil 3.2: Büyük boyutlu korona kafesi örnekleri 42
Şekil 3.3: 500-600 kV HVDC iletim hattı direği 45
Şekil 3.4: Gerçek sistem iletkenleri a) 954 MCM, b) 1272 MCM 45
Şekil 3.5: İki kutuplu HVDC sistemin sonlu elemanlar model geometrisi 46
Şekil 3.6: İki kutuplu HVDC sistemin elektrik alan dağılımı a) genel dağılım, b) iletken çevresi boyunca dağılım 47
Şekil 3.7: Korona kafesi ve iletkenlerin sonlu elemanlar model geometrisi 48
Şekil 3.8: Korona kafesi ve iletkenlerin sonlu elemanlar analizi a) Potansiyel dağılımı b) Elektrik alan dağılımı 48
Şekil 3.9: Korona kafesinde elde edilen elektrik alan şiddetleri (4x1272 MCM) 49
Şekil 3.10: Korona kafesinde bulunan iletken yüzeyindeki elektrik alan şiddetleri (korona halkasının olmadığı durum) 51
Şekil 3.11: Korona kafesinde bulunan iletken üzerindeki elektrik alan dağılımı (korona halkasının olduğu durum) 52
Şekil 3.12: Korona kafesi içerisindeki iletkende oluşan elektrik alan şiddetlerinin koruma elektrotu uzunluğuna göre değişimi 53
Şekil 3.13: Tasarlanmış olan korona kafesi 54
Şekil 3.14: Demet iletken modelleri için hazırlanmış spacer (3x954 MCM iletken için) 56
Şekil 3.15: Korona kafesinde 4x1272 MCM sonlu elemanlar iletken geometrisi 57
Şekil 3.16: Korona kafesinde 4x1272 MCM iletkenlerin elektrik alan analizi 57
Şekil 3.17: 4x1272 MCM iletkenlerin yüzeyindeki elektrik alan dağılımı 58
Şekil 4.1: Daire kesitli (küçük) korona kafesi 59
Şekil 4.2: Model iletkenler için hazırlanmış farklı iletken ayırıcı yapıları 60
Şekil 4.3: 4'lü demet model iletken montajı ayrıntısı (kafes dışı) 60
Şekil 4.4: Korona kafesi ile yapılan HVDC deney şeması 61
Şekil 4.5: Korona kafesi ile yapılan HVDC deney montajı 62
Şekil 4.6: Büyük korona kafesinin laboratuvardaki yerleşimi 63
Şekil 4.7: Büyük korona kafesine iletkenin gerilmesi ve sonlandırmalar 63
Şekil 4.8: Hassas akım ölçü trafosu 64

Şekil 4.9: Yüksek doğru gerilim üreteci 64
Şekil 4.10: Korona akımı ölçüm düzeneği 65
Şekil 4.11: Büyük korona kafesi deney düzeneği 65
Şekil 4.12: Korona kafesine yerleştirilmiş iletken modeli 66
Şekil 4.13: Korona kamerası ile iletken yüzeyindeki koronanın oluşumu (a –DC, b +DC) 67
Şekil 4.14: Tekil iletkenlerde korona başlangıç geriliminin değişimi 67
Şekil 4.15: Demet iletken yapısında korona boşalması a) tekil iletken (-), b) 2'li demet (-), c) 3'lü demet (-), d) 4'lü demet (-), e) tekil iletken (+), f) 2'li demet (+), g) 3'lü demet (+), h)4'lü demet (+) 68
Şekil 4.16: Farklı demet yapıları ve açıklıkları için korona başlangıç gerilimleri a- negatif DC, b- pozitif DC 69
Şekil 4.17: Korona akımının osiloskop görüntüsü (negatif DC) 69
Şekil 4.18: 7 mm tekil iletkende korona akımının gerilimle değişimi 70
Şekil 4.19: 4 mm'lik iletkende farklı demet açıklıkları için korona akımının gerilimle değişimi (a- negatif DC, b- pozitif DC) 72
Şekil 4.20: Demet iletkenler için 100 kV doğru gerilimde oluşan korona kaybı a- negatif DC, b- pozitif DC 74
Şekil 4.21: Demet iletken yapısında 100 kV doğru gerilimde hesaplanmış RIV değerleri 75
Şekil 4.22: Tekil iletkenlerde duyulabilir gürültünün radyal uzaklık ile değişimi (gerilim: 100 kV) 77
Şekil 4.23: Demet iletken yapısında duyulabilir gürültünün radyal uzaklık ile değişimi (gerilim: 100 kV) 77
Şekil 4.24: 4'lü demet iletken yapısının kafes içerisine gerilmiş hali 78
Şekil 4.25: Korona başlangıç geriliminin iletken konfigürasyonuna göre değişimi .. 79
Şekil 4.26: Ölçme düzeneğinde korona akımının gözlemlenmesi 80
Şekil 4.27: 200 kV deney geriliminde korona akımının dalga şekli (4x1272 MCM) 81
Şekil 4.28: Korona akımı dalga şeklinin gerilimle değişimi (4x1272 MCM, 1/5 GMR ölçeği) 82
Şekil 4.29: Farklı konfigürasyonlar için korona akımının gerilimle değişimi (negatif DC, 1/10 GMR) 83
Şekil 4.30: 4x1272 MCM iletkenin korona akımlarının iletken ölçeklemesine göre değişimi (pozitif DC) 84
Şekil 4.31: Korona kayıplarının demet iletken yapısında değişimi a) pozitif DC b) negatif DC 85
Şekil 4.32: Radyo girişiminin iletken konfigürasyonu ile değişimi (pozitif DC) 86
Şekil 4.33: Radyo girişiminin demet iletken yapısında değişimi a) pozitif DC b) negatif DC 87
Şekil 4.34: Duyulabilir gürültünün uzaklık ile değişimi a) pozitif DC gerilimler, b) negatif DC gerilimler 89
Şekil 4.35: Radyo girişiminin demet iletken yapısında değişimi a) pozitif DC b) negatif DC 90
Şekil 5.1: Küçük boyutlu korona kafesinin sonlu elemanlar modeli 91
Şekil 5.2: 4x1272 MCM iletken için iletken çevresindeki elektrik alan dağılımı 92
Şekil 5.3: Büyük boyutlu korona kefesinin 3D FEM modeli 94
Şekil 5.4: Büyük boyutlu korona kefesinin sonlu ağ modeli 95
Şekil 5.5: Kafes yapısında iletkenlerdeki elektrik alan dağılımı 95
Şekil 5.6: Bir iletken yüzeyi boyunca elektrik alan dağılımı 96
Şekil 5.7: İletken yüzeyindeki elektrik alan şiddeti değişimi 96

YÜKSEK DOĞRU GERİLİM (HVDC) İLETİM HATLARININ KORONA KARAKTERİSTİKLERİ VE ELEKTROMANYETİK ETKİLERİ

ÖZET

Dünya çapında artan elektrik enerjisi ihtiyacı, sadece üretimin artmasına değil, enerjinin daha verimli kullanılmasına ve bu konuda çalışmaların yapılmasına yol açmaktadır. Kayıplarının daha az, hat kapasitesinin daha fazla olması ve özellikle uzun mesafelerde daha ekonomik olması nedeniyle yüksek doğru gerilim iletim sistemleri gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Geleneksel AC iletim sistemlerinin önemli sorunlarından biri olan korona, DC sistemlerde de oluşmaktadır. Karakteri AC'den farklı olan doğru akım korona olayı için, alternatif gerilimde olduğu gibi deneysel olarak incelemelerin yapılması ve karakteristiklerinin ortaya konması, özellikle HVDC hat tasarımlarında önemlidir. HVDC sistemlerde tasarım kriteri olarak koronayı hesaba katmak için, korona başlangıç gerilimi, korona kaybı, radyo girişimi ve duyulabilir gürültü gibi karakteristiklerinin tam olarak ortaya konması gerekmektedir.

Literatürde HVDC sistemlerinde meydana gelen korona olayı ile ilgili çeşitli yayınlar mevcuttur. Fakat yüksek gerilim ile çalışmanın en büyük zorluğu olan laboratuvar olanakları nedeniyle, çok yüksek gerilimlerde ve sistem gerilimlerinde yapılan çalışma sayısı sınırlıdır. Bunun yerine, çok ince iletkenler kullanılarak, düşük gerilimlerde korona olayı incelenmektedir. Bu çalışmalarda da, genellikle tekil iletken modelleri kullanılmakta ve karakteristikleri ayrı ayrı ele almaktadırlar. Bu tez çalışmasında gerçeğe daha yakın sonuçlar edebilmek için, büyük boyutlu bir kafes ile demet iletken yapısında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca incelenen iletken sayısı, yapısı ve konfigürasyonunun fazla olması, bunun yanında incelenen her iletken için bütün korona karakteristiklerinin ayrıntılı bir şekilde verilmesi nedeniyle, bu tez çalışması, DC korona açısından kapsamlı bir inceleme ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmayı bir temele oturtabilmek için ilk olarak Türkiye için bir HVDC iletim sistemi tasarımı yapılmış ve teknik ayrıntıları verilmiştir. Türkiye 400 kV AC iletim şebekesindeki hatlar incelenmiş ve Keban-Adapazarı arasında iletim sağlayacak ve 3000 MW güç taşıyacak hat güzergâhı, AC şebeke de göz önüne alınarak belirlenmiştir. Gerilim düzeyi olarak dünyadaki benzer sistemlerde kullanılan 500 kV ve 600 kV değerleri öngörülmüş ve hesaplamalar bu iki gerilim düzeyi için ayrı ayrı yapılmıştır. HVDC yapısı, aktarılacak güç göz önüne alındığında, iki kutuplu (bipolar) olacak şekilde belirlenmiş ve bu durum için üç farklı iletken konfigürasyonu (4x1272 MCM, 3x1272 MCM, 3x954 MCM) ele alınmıştır. İletken tipi olarak geleneksel ACSR ve ACSR/TW'nin yanında yeni nesil iletkenler olan AAC ve AAAC de yapılan çalışmaya eklenmiştir. İletken tercihinden sonra, hat kayıpları, gerilim düşümü, korona kayıpları ve elektrik alan şiddetleri tüm konfigürasyonlar için, önceden belirlenmiş bir günlük yük eğrisi baz alınarak hesaplanmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Yapılan hesaplamalarda iletken direncinin sıcaklıkla değişimi de göz önüne alınmıştır.

Deneysel çalışmalarda iki farklı kafes kullanılmıştır. İnce ve tekli iletkenler için 60 cm çaplı ve 270 cm uzunluklu küçük boyutlu kafes kullanılmıştır. Daha kalın ve demet iletken yapısındaki konfigürasyonlar için, büyük boyutlu bir korona kafesi tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Kafes boyutları belirlenirken, kullanılacak olan iletken boyutları ve bu iletkenlerde korona oluşturabilecek gerilim düzeyleri dikkate alınmış ve buna göre kare kesitli, bir kenarı 2 m olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Ölçme kısmı, iletken yüzeyindeki elektrik alan dağılımının yeterince düzgün olmasını sağlayacak şekilde, 4 m olarak belirlenmiştir. Koruma elektrotları boyutlandırılırken sonlu elemanlar analizinden yararlanılmış ve kenar etkilerini en aza indirecek şekilde, 1'er m olarak tasarıma eklenmiştir. Kafesin uzunluğu toplamda 6 m olup, kafes yapısındaki gözlerin boyutları ise, kafes boyutuna bağlı olarak 2.5 cm x 2.5 cm olacak şekilde tasarlanmıştır.

Küçük boyutlu korona kafesi kullanılarak seçilmiş olan ince iletkenlerde (4 mm, 7 mm ve 7.14 mm) DC korona deneyleri yapılmıştır. İnce olan iletkenlerde öncelikle tekli yapıda deneyler gerçekleştirilmiş; daha sonra 2'li, 3'lü ve 4'lü demet iletken yapılarında, demet açıklıkları sırasıyla 2 cm, 4 cm ve 6 cm olduğu durumlar incelenmiştir. Yapılan deneylerde korona karakteristikleri olan korona başlangıç gerilimi, korona akımı, korona kaybı, radyo girişim gerilimi ve duyulabilir gürültü düzeyi hem pozitif hem de negatif doğru gerilimde çıkartılmıştır. Artan gerilim düzeylerinde de deneyler tekrarlanmıştır.

Büyük korona kafesi deneylerinde, gerçek iletim sisteminde kullanılacağı öngörülen iletkenlerin ölçeklenmiş modelleri kullanılmıştır. Bu modeller elde edilirken iletken yapısının ortalama geometrik yarıçapı (GMR) üzerinden 1/10 ve 1/5 oranlarında ölçeklemeler yapılarak model iletkenler oluşturulmuştur. Yapılan ölçekleme ve kullanılan iletken çapına göre demette kullanılan iletkenler arasındaki uzaklıklar (demet açıklıkları) belirlenmiştir. Bu mesafeleri kafes içerisinde de tutturabilmek için, iletken ayırıcı (spacer) tasarlanmıştır. Deneysel çalışmada ise, küçük kafeste olduğu gibi, korona karakteristikleri her iki polarite için deneysel ve hesaplama yöntemleri ile elde edilmiştir. Burada gerilim düzeyi çok daha yüksek olduğu için, gerilim kademeleri korona başlangıç geriliminin belirli yüzdeleri olacak şekilde alınmıştır.

Son olarak, her iki kafes deneylerinde de ihtiyaç duyulan, iletken yüzeylerindeki elektrik alan şiddetlerini hesaplamak için, sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kafes ve iletken yapısı 3D ve gerçek boyutlu olarak modellenmiştir. Deneylerde uygulanan gerilimler kullanılarak, her bir deney gerilimine karşılık gelen maksimum yüzeysel elektrik alan şiddetleri hesaplanmıştır. Yapılan bütün deney ve hesaplamalar karşılaştırmalı olarak verilmiş ve korona karakteristiklerinin değişimleri farklı gerilim, iletken yapısı ve konfigürasyonları için ortaya konmuştur.

Yapılan çalışmalara bakıldığında farklı iletken konfigürasyonları için hat parametreleri farklı olduğu için tasarım yaparken özellikle korona açısından da değerlendirmeler yapılmalıdır. Deneysel çalışmalara bakıldığında kafes yapısı içindeki iletkenler eşeksenli silindirsel elektrot sisteminden farklı bir karakter göstermektedir. Bununla birlikte elektrik alan şiddeti korona karakteristikleri üzerinde çok önemli rol oynamaktadır. Bu karakteristikler polarite, iletken kesiti ve iletken konfigürasyonu ile belirgin şekilde değişmektedir. Korona akımı ve korona kayıplarında negatif polaritede değerler büyük olurken, RIV ve duyulabilir gürültüde pozitif daha baskındır.

Gerilim artışı ile birlikte artma eğilimi gösteren korona akımında, korona başlangıç gerilimi negatif doğru gerilimde pozitiften daha küçük olduğu için aynı gerilimde elde

edilen korona akım değerleri negatif gerilimlerde daha yüksek olmaktadır. Demet yapısının korona akımına etkisine bakıldığında ise büyük açıklıklarda korona akımı daha yüksek, küçük açıklıklarda ise korona akımının değeri daha düşüktür. Korona kayıpları, korona akımları ile doğru orantılı şekilde değiştiğinden karakteristikte negatif doğru gerilimdeki korona kayıpları pozitiftekilerden daha yüksektir. Bunun yanında korona kayıpları iletken kalınlaştıkça azalmakta, demetteki iletken sayısı azaldıkça da artmaktadır. Demet açıklığı arttıkça ise, kayıplar artış göstermektedir.

Radyo girişim gerilimi hesapları, doğrudan elektrik alan şiddeti ile bağlantılı olduklarından, yapılan hesaplamalara bakıldığında iletken çapı arttıkça RIV değerleri azalmaktadır. Benzer şekilde demet iletken yapısında iletken sayısı arttıkça da radyo girişimi azalmaktadır. Duyulabilir gürültü açısından bakıldığında, RIV ile benzer özellik gösterdiği gözlenmiştir. Duyulabilir gürültü gerilim arttıkça artmakta, kaynaktan radyal olarak uzaklaştıkça ise azalmaktadır.

Büyük boyutlu korona kafesinde yapılan çalışmalar da küçük boyutlu kafeste yapılan çalışmaları destekler niteliktedir. Korona başlangıç gerilimi karşılaştırmalarına bakıldığında, dörtlü demet iletkenlerde koronanın daha geç başladığı görülmektedir. Ayrıca, aynı konfigürasyonda daha ince iletken kullanıldığında, sonlu kafes yapısında alan şiddetleri düştüğü için korona başlangıç gerilimi yüksek olmaktadır.

DC CORONA CHARACTERISTICS AND ELECTROMAGNETIC EFFECTS OF HVDC TRANSMISSION LINES

SUMMARY

The increasing demand for electrical energy worldwide leads not only to increase production capacities, but also to use energy more efficiently and to work on this issue. DC transmission systems are becoming more and more popular day by day because of their low losses, high transmission capacities and especially economise over long distances. Corona, which is one of the electrical phenomena occurring in conventional AC transmission systems, also occurs in DC systems. For DC corona, whose character is different from AC, similar experimental studies like AC and investigating the characteristics are important for HVDC line designs. To take into account corona as a design criteria for HVDC systems, its characteristics such as corona inception voltage, corona losses, radio interference and audible noise must be fully studied.

In the literature, there are several publications related to the corona discharge occurring in HVDC systems. Due to the voltage level, which is the biggest challenge of working with high voltage, the majority of the work cannot be performed at very high voltages and real system voltages. Instead, the corona phenomenon is investigated under relatively low voltages using very thin conductors. In these studies, single conductor models are generally used and they investigate the characteristics separately. In this thesis, experimental studies have been carried out in bundle conductor structures using a large corona cage in order to obtain more realistic results. In addition, this thesis presents a comprehensive investigation in terms of DC corona, due to variety of number of conductors, conductor structures and configurations, as well as all corona characteristics are given in detail for each conductor configuration.

Before the experimental work carried out under this thesis, a HVDC transmission system was designed for Turkey and technical details were given. Following a detailed analysis of national 400 kV AC power transmission network, an HVDC line route to transfer 3000 kV between Keban and Adapazarı was determined. Transmission voltage level of 500 kV and 600 kV are selected as being appropriate values when the transfer power rating of similar applications is taken into account. All the calculations were made separately for those two prospective voltage levels. Considering the power to be transferred HVDC structure, bipolar configuration was selected and three prospective conductor configurations (4x1272 MCM, 3x1272 MCM, 3x954 MCM) were examined. In addition to traditional ACSR and ACSR / TW conductors, new generation conductors like AAC and AAAC were also included in the study. After all these conductor selections, line losses, voltage drops, corona losses and electric field strengths were calculated and compared based on a predetermined daily load curve for all conductor configurations. The change of the conductor temperature so does the conductor resistance due to the load current were also taken into consideration in the calculations.

Two different corona cages were used in experimental studies. Small size cylindrical cage with a diameter of 60 cm and a length of 270 cm is used for the thin and the single conductors. A larger-sized corona cage was designed for configurations with thicker and bundle conductors. When determining the cage dimensions, the conductor dimensions and the voltage levels that can form the corona in these conductors were taken into consideration and accordingly, it was designed with a square cross-section and 2 m of an edge. The length of the measuring segment was determined as 4 m to ensure that the electric field on the conductor surface was sufficiently uniform. Finite element analysis was used for dimensioning the protection electrodes and they were added to the design as 1 m to minimize the edge effects. The length of the cage was finally set to 6 m in total. The dimensions of the eyes in the cage structure were determined as 2.5 cm x 2.5 cm depending on the cage size.

DC corona tests were performed for the thin conductors (4 mm, 7 mm and 7.14 mm) using a small size corona cage. At first, experiments were performed for single configuration. Then the tests were carried out for the bundle configurations (double, triple and quadrupole bundles) with sub conductor spacings of 2 cm, 4 cm and 6 cm. In the experiments, corona characteristics such as corona inception voltage, corona current, corona losses, radio interference voltage and audible noise were obtained for both the positive and the negative DC voltage. Experiments were repeated for different voltage levels above the corona inception voltage.

For big corona cage experiments, scaled model conductors simulation the prospective bundle configurations were used. Model conductors were created by making scaling in the ratio of 1/10 and 1/5 over the geometric mean radius (GMR) of the real conductor configuration. Sub conductor spacings for the bundles were determined according to the scaling ratios and the diameter of the conductors. In order to keep these sub conductor distances in the cage, special separators were designed. Corona characteristics were obtained by experimental and computational methods for both polarities as in the small cage in the experimental study. Since the voltage level was much higher for big corona cage test, the voltage levels were chosen as certain percentages of the corona inception voltage.

Finally, Finite element method was used to calculate the electric field strength distribution on the conductor surfaces for both corona cage experiments. The cage and the conductor configurations were modelled in 3D and real size. Maximum electric field strengths corresponding to each test voltage were calculated by using the experimental data. All experiments and calculations were given comparatively and trends of corona characteristics were presented for different voltage levels, conductor types and configurations.

According to studies, since line parameters are different form each other for different conductor configurations, corona evaluations should also be made during design process of transmission lines. Considering the experimental studies, the conductors in the cage structure behave a different characterictic than the coaxial cylindrical electrode system. Besides, electric field strength acts important role on corona properties. These characteristics clearly vary with polarity, conductor size and conductor configuration. While negative polarity values are large for corona current and corona losses, positive is more dominant in terms of RIV and audible noise.

Corona inception voltage level of a conductor and a bundle configuration is highly depended on the surface electric field strength. CIV increases with increasing conductor diameter. Number of strands in a sub-conductor also affects the CIV values.

CIV of the stranded conductor is higher than of the single core one due to its surface roughness. Note that the surface roughness increases with the number of strands. Both corona cage experiments and simulations show that increasing sub conductor spacing increases the voltage gradient on the surface of the conductor because of proximity effect between cage and conductors. Corona losses are related with the measured corona currents. Losses for negative DC voltages are higher than of the corresponding positive ones due to their lower CIV levels. Furthermore, corona losses decrease for thick conductors as well as for increased number of sub-conductors in the bundle configuration.

Similar affects can be observed for decreased sub conductor spacing. RIV levels and AN levels show similar characteristics for the tested conductor configurations. Increase in diameter of the conductor cause decrease in RIV and AN levels. High values of RIV and AN are observed when voltage gradient of the conductor surface becomes high. For this reason, both characteristics are high for conductors having a greater number of sub conductor and less sub conductor distance.

When looking at corona inception voltage comparisons, it is seen that corona starts later in quadrupole conductor configuration. In addition, when using a thinner conductor in the same configuration, the corona initial voltage becomes high as the field strengths in the finite cage structure decrease. Because of the same situation, the corona inception voltage is larger on a smaller scale (1/10 GMR). In addition, when looking at the polarity, it is seen that corona starts earlier at negative voltage.

The amplitudes of corona currents increase with increasing voltage in large cage experiments. According to the results obtained from the model configurations, the current valuesobtained in quadruple strand conductors are higher than those obtained with triple strand conductors. For all configurations, corona currents at negative voltage are higher than at positive ones. When looking at the effect of scaling on corona current, the corona currents are larger at smaller scaling (1/10 GMR).

When the corona losses for each configuration are compared, it is seen that the losses in negative voltage are higher due to the higher corona current values. Corona losses are greater than others in the 4-bundle conductor structure. In addition, the loss values in the 954 MCM model at the same scaling are higher than the 1272 MCM model. The losses calculated on the smaller scale for the same conductor configuration are larger than the larger scale.

All those corona characteristics should be taken into account while designing a prospective HVDC transmission application in Turkey. The sum of the corona losses and copper losses computed in accordance with the load curve can be used as one of the design criterion. Final decision regarding the voltage level, conductor type/diameter and bundle configuration can be made with respect to these criterion and additional ones, such as voltage drops, incremental transmission costs etc. Finally, RI levels and AN levels should be taken into account while specifying the critical distance along the right of way of the HVDC lines.

1. GİRİŞ

Güç transformatörlerinin kullanılmaya başlaması ile birlikte, uzak mesafelere elektrik enerjisinin taşınmasında, üç fazlı alternatif gerilim (AC) baskın bir şekilde kullanılmaya başlamıştır. İletilen güçlerdeki ve iletim uzaklıklarındaki artışa bağlı olarak, iletim gerilimi düzeyi sürekli bir artış göstermiştir. Diğer yandan, yalıtım problemleri, güvenilirlik ve sistem kararlılığı, iletim gerilimi düzeyini, dolayısı ile iletilen gücü ve iletim uzaklığını sınırlayan faktörler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, yüksek doğru gerilim (HVDC) ile enerji iletimi alternatif bir enerji iletimi olarak 1920'li yıllarda ortaya çıkmış ve ilk ticari HVDC enerji iletimi 1954 yılında, cıvalı ark anahtarları ile sağlanmıştır. Bu ilk öncü uygulama sonrasında, HVDC enerji iletimi konusunda çeşitli başarılı projeler geliştirilmiştir. Silikon yarı-iletken tristör teknolojisinin gelişmesi ile, HVDC enerji iletimi konusunda önemli gelişmeler sağlanmıştır. HVDC enerji iletiminde tristörlerin kullanımına 1970'li yıllarda başlanmıştır. Sonrasında ise HVDC ile uzun mesafelere elektrik enerjisi taşınması, elektriksel, ekonomik ve çevresel avantajlar ortaya çıkartmıştır. Diğer taraftan, Avrupa'da, HVDC enerji iletimi, önemli ölçüde elektrik enerjisinin yenilebilir DC kaynaklarla sağlanacağı akıllı elektrik şebekelerini şekillendirmesi beklenmektedir.

HVDC enerji iletimi, bazı uygulamalarda, AC enerji iletimine göre üstünlüklere sahiptir. Bununla birlikte, HVDC iletim hatlarının çevresel etkileri ile ilgili konular üzerinde hala daha çalışmalar sürdürülmektedir. HVDC iletim hatlarının korona karakteristikleri, AC iletim hatlarından farklılık göstermektedir. Bu durum, önemli ölçüde, iletkenler ve iletkenler ile toprak arasındaki iyonizasyon olayı sonucu oluşan çevresel uzay yüklerinden kaynaklanmaktadır. HVDC iletim hatlarındaki korona etkisi, sadece korona kayıplarına (corona losses, CL) neden olmayıp, aynı zamanda elektrik alan etkileri, radyo girişimi (radio interference, RI) ve duyulabilir ses (audible noise, AN) gibi çevresel etkilere de neden olmaktadır.

1.1 Korona Boşalmaları

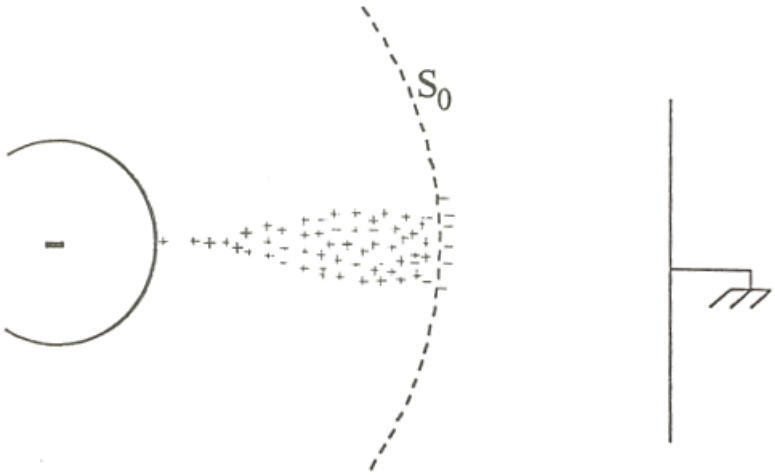
Korona, enerjili çıplak iletken çevresinde oluşan ve kendini besleyen bir boşalma türüdür. İletim hatlarında, özellikle kötü hava koşullarında (yağmur, kar sis gibi) ve yüzeysel pürüzlülüğün arttığı ve eğrilik çapının azaldığı yerlerde, elektrik alan şiddetinin artması ile iletken çevresindeki hava iyonize olur ve boşalmanın başladığı bir katman oluşur. Korona boşlamasının oluşmasını ve karakterini etkileyen en önemli etken; iletken yüzeyinde oluşan elektrik alan şiddeti ve bunun yalıtkan yüzeyi boyunca dağılımıdır. Korona analizi için, iletkenin hemen etrafındaki elektrik alan bilgisine ihtiyaç vardır.

Korona kaybı, radyo girişimi ve duyulabilir gürültü olarak tanımlanan korona performansı, iletim hattının tasarımı ve dış ortam (hava) koşullarına bağlıdır. Hat tasarımı; iletken çaplarını ve tiplerini, AC hatlar için fazlar arası uzaklığı, DC hatlar için ise kutuplar arası (gidiş geliş) uzaklığı ve iletkenlerin toprağa olan uzaklığını kapsar. Hava koşulları ise sıcaklık, basınç, nem gibi iletken yüzeyindeki iyonizasyona sürekli etkiyen özellikler ile yağmur, sis, kar gibi havanın kötü olduğu durumlarda oluşan ve iletken yüzeyinde istenmeyen geçici pürüzler oluşturan durumlardır.

İletim hatlarındaki korona olayı, iletken ve yeryüzünü temsil etmek üzere oluşturulan, havada duran silindir-düzlem elektrot sistemindeki iyonizasyon olayları ile açıklanabilir. Uygulanan gerilimin tipine, genliğine, polaritesine göre farklı korona gelişimleri oluşmaktadır.

Düzgün olmayan elektrik alan dağılımı elde etmek için Şekil 1'de verilen, silindir düzlem elektrot sistemi kullanılır. Burada silindir iletken negatif doğru gerilim ile beslenirken, düzlem iletken topraklıdır. Hava aralığı, S_0 sınırı ile iki bölgeye ayrılmıştır. Elektrik alan şiddetinin yüksek olduğu silindir elektrot-S_0 arası bölgede güçlü bir iyonizasyon varken, S_0 ile düzlem elektrot arasındaki bölgede, iyonizasyonu sağlayacak kadar yüksek elektrik alan oluşmamaktadır. Hava, elektronegatif bir gaz olduğundan negatif iyonlar; serbest elektronlara göre daha durağandırlar. Bu farklı yapıların farklı devingenliklerinden dolayı, hava aralığında bu iyonlar birbirlerini izleyen elektron çığları oluşturma eğilimindedirler. Hava aralığında bu nedenle yarı-durağan (quasi-stationary) iyon bulutları oluşur. Oluşan bu pozitif veya negatif iyon bulutlarına iyon uzay yükü denir. Havadaki korona boşalmasını yorumlayabilmek için bu uzay yüklerini mutlaka hesaba katmak gerekir. Elektrotlar arasında oluşan elektrik

alanı ile bu uzay yükleri sürekli olarak oluşup dağılsalar da, yerel elektrik alan üzerinde etkili oldukları için korona boşalmasını etkilerler.



Şekil 1. 1: Silindir - düzlem elektrot sisteminde iyonlaşmanın oluşumu (negatif DC).

1.1.1 Negatif DC Korona Gelişimi

Negatif potansiyele sahip iletkende, yüksek elektrik alan şiddeti etkisi ile katot bölgesinde elektron çığı oluşur ve düşük alan şiddeti yönü olan anoda doğru sürekli olarak gelişir. Elektron çığı S_0 sınırına kadar gelişir. Elektrik alanı etkisinde, iyonlardan daha hızlı hareket eden elektronlar, çığın uç kısmında yoğunlaşırlar. Buna karşılık pozitif iyonlar S_0 sınırı ile katot arasındaki bölgede kümelenirler. S_0 yüzeyinin anot tarafındaki serbest elektronlar, kendilerini oksijen moleküllerine bağlayarak, sürüklenme hızları düşük negatif iyonlar oluştururlar. Sonuçta ilk elektron çığı tamamlanmak üzereyken, hava aralığında, katot tarafında pozitif, anot tarafında negatif olmak üzere iki uzay yükü oluşur. Bu oluşan uzay yükleri, yüksek gerilimli elektrot nedeniyle oluşan elektrik alanı üzerinde etkilidirler. Bu etki, katot çevresinde elektrik alanını güçlendiren, anot tarafında ise azaltan yönde olur. Dolayısıyla bir sonraki çığ, daha yüksek alan yoğunluğunda gelişir ve oluşum uzaklığı daha kısadır. İyon uzay yükleri nedeniyle korona boşalmasının gelişimi üç safhada oluşur:

- Trichel kanal boşalması (Trichel streamer discharge)
- Negatif darbesiz parıltı boşalması (Negative pulseless glow discharge)
- Negatif kanal boşalması (Negative streamer discharge)

1.1.1.1 Trichel kanal boşalması

Bu boşalma türü; başlayan, gelişen ve sönen darbeli (titreşimli) bir düzene sahiptir. Darbeler arası kısa ölü zamanlar vardır. Tekil boşalma darbesinin süresi birkaç 100 ns mertebesindedir. Ölü zaman ise birkaç μs ile ms arasında değişebilir. Boşalma küçük genlikli ve sürekli akım darbeleri şeklinde gözlemlenir.

Trichel, boşalmanın darbeli doğasını açıklar. Kısa süreler içerisinde iyonizasyonu bastıracak uzay yükü oluşumunu temel alır. Kanal boşalmasının (streamer) tekrar etme sıklığı uygulanan gerilimin bir fonksiyonudur ve gerilim ile lineer olarak artar. Yüksek elektrik alanda kısa süreli boşalma rejiminin oluşmasıyla bu oran azalır.

1.1.1.2 Negatif darbesiz parıltı boşalması

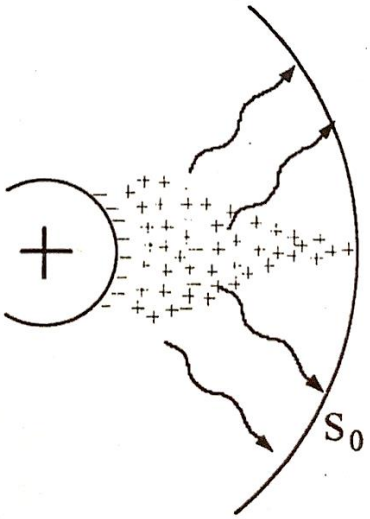
Gerilimin artmasıyla, trichel darbelerinin frekansı bir kritik değere ulaştığında, korona boşalması yeni bir safhaya geçer. Bu geçiş boşalmanın fiziksel görünümünün değişmesiyle kendini belli eder. Katottaki düzensiz ve yeri belli olmayan küçük boşalmalar sona erer, bir noktada yoğunlaşmaya başlar ve oluşan parlak alan daralmaya başlar. Yoğunlaşan noktada parlak, küresel bir parıltı oluşur ve bunu takiben koni biçimindeki bu ışıltı dışa doğru genişlemeye başlar. Gerilim artışı ile birlikte boşalma nedeniyle oluşan korona akımı da artar. Gerilim, delinmeye yakın bir değere ulaştığında ise bir diğer boşalma safhası olan negatif kanal boşalması oluşumu başlar.

1.1.1.3 Negatif kanal boşalması

Gerilim arttırılmaya devam ederse, bu kez negatif kanallar oluşmaya başlar. Bu safha tam delinmeye yakındır. Boşalma sütunu daralır ve kanal sütununu oluşturur. Katotta gözlenen ışıltılı boşalma; bu korona gelişiminin, aynı zamanda katottaki iyon bombardımanıyla meydana gelen elektron emisyonuna hayli bağlı olduğu anlamına gelir. Oysaki yoğun iyonizasyon ile karakterize edilen boşalma kanalı oluşması, elektrik alan etkisiyle daha efektif uzay yükü uzaklaştırmasının olduğunu gösterir.

1.1.2 Pozitif DC Korona Gelişimi

Pozitif polariteli gerilim ile uyarılmış elektrot için, elektron çığı Şekil 1.2'de gösterildiği gibi S_0 yüzeyine yakın yerlerde başlar ve anoda doğru alanın yükselmesi ile düzenli bir şekilde gelişir. Bu nedenle anoda yakın bölgede en yoğun iyonizasyon aktivitesi görülür.



Şekil 1.2: Silindir - düzlem elektrot sisteminde iyonlaşmanın oluşumu (pozitif DC).

İyonların düşük hareket yetenekleri (devingenlikleri) yüzünden, pozitif iyon uzay yükü, gelişen çığın yolu boyunca geride kalır. Anot etrafındaki yüksek alan yoğunluğundan dolayı elektron ilgisi negatif koronaya göre daha az etkilidir. Bu durum üretilen serbest elektronların çoğunun anot tarafından emilmesine neden olur. Negatif iyonlar ise çoğunlukla anottan uzaktaki düşük alan yoğunluklu yerlerde oluşurlar. Anot yakınında pozitif iyon uzay yüklerinin bulunması, alan değerinde artışa neden olur. Primer (ilk) çığdaki uyarılmış moleküllerden kurtulan fotonlar ikincil elektronlara iyonizasyon için kaynak sağlar. Bunlar da yüksek elektrik alanda hareketlenerek ikinci çığı oluştururlar. Böylece katotta olduğu gibi, anot çevresindeki uzay yükleri de yerel elektrik alanını ve dolayısıyla korona boşalmasını etkiler. Pozitif doğru gerilimde dört çeşit korona oluşumu; farklı fiziksel, elektriksel ve görsel özellikleri ile oluşur. Bunlar:

- Yaylım korona boşalması (Burst corona)
- Başlangıç kanal boşalması (Onset streamer discharge)
- Pozitif ışıltılı boşalma (Positive glow discharge)
- Delinme kanal boşalması (Breakdown streamer discharge)

1.1.2.1 Yaylım korona boşalması

Bu boşalma, anot çevresindeki iyonizasyon olayları sonucu gerçekleşir. Anot yüzeyi, yüksek enerjili elektronların anot tarafından emilmeden önce enerjilerini kaybetmesine izin verir. Bu süreç süresince, pozitif uzay yükü oluşturup boşalmayı durdurarak pozitif iyon üretilir. Serbest elektron yığını daha sonra anodun başka bir

bölümüne hareket eder. Boşalma akımı küçük pozitif darbeler şeklindedir. Her darbe anottaki bir alandaki iyonizasyon yığınını ve onun pozitif uzay yükleri ile sonlandırılmasını temsil eder.

1.1.2.2 Başlangıç kanal boşalması

Bu boşalma, boşalmanın radyal gelişiminin sonucudur. Anot yüzeyine yakın pozitif uzay yükleri anot etrafında alanın yükselmesine neden olur ve bir sonraki elektron çığının başlamasına sebebiyet verir. Bu nedenle kanal boşalması radyal olarak gelişir ve başlangıç kanal boşalması ile sonuçlanır. Kanalların oluşumu sırasında kayda değer miktarda pozitif iyon uzay yükü olacak alan bölgesinde oluşur. Peşi sıra oluşan bu elektron çığları ve anot tarafından emilen serbest elektronların toplam etkisi, anot tarafında muhtemel artık uzay yüklerinin oluşması ile sonuçlanır. Anottaki elektrik alan şiddeti iyonizasyon için kritik olan değerin altına düşer ve bu düşüş ile kanal boşalması sonlanır. Pozitif iyon uzay yüklerinin ortadan kaldırılıp yeni bir kanalın gelişmesi için gerekli koşulların yeniden oluşması için bir zamana ihtiyaç vardır. Bu nedenle boşalma titreşimli (darbeli) bir şekilde, yüksek genlikli ve düşük sıklığa sahip pozitif akım darbeleri şeklinde gelişir.

1.1.2.3 Pozitif parıltı boşalması

Bu boşalma gelişiminde anot yüzeyinin her yerindeki iyonizasyon aktivitesinin gelişimi anodun çevresinde ince bir katman halinde parıltıya neden olur. Bunun bir diğer nedeni şiddetli iyonizasyon aktivitesidir. Yüzeyde oluşan boşalma doğru akım üzerine binmiş 100 kHz mertebesinde küçük genlikli ve yüksek tekrarlanma sıklığına sahip olan darbeler şeklindedir. Pozitif parıltı boşalması, hava aralığındaki pozitif iyonların bir araya gelmesi ve dağılmalarının bir kombinasyonu olarak yorumlanabilir. Elektrik alanı, yüzeysel iyonizasyon aktivitelerini destekleyen pozitif iyonların anoda sürekli yönlenmesine olanak sağlar. Aynı zamanda alan yoğunluğu boşalmanın radyal olarak gelişmesine ve kanal oluşmasına yeterli değildir. Negatif iyonların katkısı ise, genel olarak anottaki iyonizasyon aktivitesini sürdürecek şekilde elektronları uyarmaktır.

1.1.2.4 Delinme kanal boşalması

Gerilim daha da yükseltilirse, kanallar tekrardan oluşur ve hava aralığında bir boşalmaya sebebiyet verebilirler. Boşalma başlangıç kanal boşalmasına çok

benzemekle birlikte hava aralığında daha içerilere kadar genişler. Kanal akımı daha yoğundur ve tekrarlanma sıklığı yüksektir. Delinme kanalının gelişimi yüksek alan yoğunluğu ile pozitif uzay yüklerinin ortamdan uzaklaşmasına doğrudan bağlıdır.

1.1.3 AC koronanın gelişimi

Alternatif gerilimde, elektrik alan şiddeti ve polaritesi zamana göre değişir. Uygulanan gerilim ile birlikte, bir periyotta farklı korona gelişimleri bir arada görülür. Bu korona gelişimleri, korona akımının dalga şekillerindeki farklılıklar ile birbirinden ayrılırlar. Küçük açıklıklarda bir yarı periyotta uzay yükleri hem oluşur hem de ortadan kalkar. Bir periyotta aynı korona gelişimleri gözlemlenir: trichel kanal boşalması, pozitif başlangıç kanal boşalması ve yaylım korona boşalmasıdır. Büyük açıklıklarda ise yarı periyotta oluşan uzay yükleri aynı yarı periyotta ortadan kalkamaz ve bir sonraki yarı periyotta yüksek alan yoğunluklu bölgeye çekilirler. Bu boşalmanın gelişimini etkiler.

1.2 Literatür Taraması

Yüksek doğru gerilimde korona olayı ile ilgili literatür taraması yapıldığında, benzetim çalışmalarıyla, sayısal çözümlemelerle ve deneysel çalışmalarla karşılaşılmaktadır. Yapılan güncel çalışmalar incelendiğinde ise DC korona konusunda son yıllarda nelerin yapıldığı ve hangi kısımların eksik kaldığı görülebilmektedir.

Literatürde, HVDC iletim hatları konusunda yapılmış çeşitli benzetim çalışmaları bulunmaktadır [1-11]. Bu çalışmalarda farklı sayısal çözümlemeler kullanılmıştır [1-16]. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve Yük Benzetim Yöntemi (YBY) en yaygın olarak kullanılan iki yöntemdir. Çalışmalarda, HVDC iletim hatları için elektrik alan dağılımı, potansiyel dağılımı, korona akımı, iyon akım yoğunluğu ve korona kayıpları gibi büyüklükler incelenmiştir. Çalışmaların bir kısmında [1, 5, 6, 10] tek kutuplu DC iletim hatları dikkate alınırken, bazı çalışmalarda [2, 9] iki kutuplu hatlar dikkate alınmıştır. Benzetim çalışmalarına ek olarak, HVDC iletim hatlarının korona performanslarının belirlenmesi amacı, tek kutuplu ve iki kutuplu HVDC hat konfigürasyonlarının dikkate alındığı, çeşitli deneysel (ampirik) eşitlikler de önerilmiştir [12, 13]. Yapılan bu incelemelerin çoğunda, çubuk-düzlem veya sivri uç düzlem gibi, koronanın daha düşük gerilimlerde elde edilebildiği elektrot sistemleri kullanılmıştır [14, 15]. Bunların dışında, iletim hatlarına yakın sonuçlar elde edebilmek için, çok telli iletkenlerle de analizler yapılmaktadır [16]. Sayısal analizler,

eğer istenirse, laboratuvardaki üreteçlerin ve kullanılan elektrotların gerçek boyutlarını içeren modeller [17] ile de yapılabilmektedir.

AC iletim hatları ile DC iletim hatları, farklı radyo girişim ve duyulabilir gürültü düzeylerine sahiptirler. Bu yüzden AC sistem incelemeleri için kullanılan hesaplar DC için çoğunlukla geçerli olmamaktadır [18, 19]. HVDC iletim hatlarında, çift kutuplu bir yapı için, pozitif polariteli iletken baskın bir şekilde RI ve AN düzeylerini belirlemektedir. HVDC iletim hatlarının RI ve AN karakteristiklerinin elde edilmesi için çeşitli deneysel bağıntılar önerilmiştir [12, 20]. AC koronadan farklı olan bu bağıntıların geliştirilmesi için yapılan deneysel çalışmalar çeşitlilik göstermektedir. Duyulabilir gürültü, pozitif ve negatif korona için farklı frekans spektrumlarına sahip olduğu için [21] farklı farklı incelenmesi gerekir. Ortaya çıkan ses, kaynaktan radyal şekilde yayıldığı için, incelemelerde, elektrot sistemleri yerine gerçek boyutlu [22] veya model iletkenlerden oluşturulmuş test iletkenleri [23] kullanılmıştır. Gerçek boyutlu iletkenler dış ortamda kurulmuş olan test hatları ile atmosferik koşullar altında test edilmiştir [24]. Laboratuvarda ise küçük boyutlu korona kafesi kullanarak bu deneyleri daha küçük iletkenlerle yapmak mümkündür. Ayrıca bu ortamlarda, yankısız oda kullanılarak, korona kaynaklı akustik güç yoğunluğu ve ses şiddeti, çeşitli durumlar için ölçülmüştür [25]. Bunların yanında laboratuvar ortamında atmosferik olaylar simule edilerek (yağmur, buz gibi) dış ortamda gerçekleştiği gibi hatlarda yağmur ve buzlanma olduğunda korona kaynaklı gürültünün nasıl değiştiğini inceleme olanağı sağlanmıştır [26, 27].

HVDC iletim hatlarının elektriksel performanslarını belirlemek için, korona kafesleri ve bu kafeslerde oluşturulan hat modelleri kullanılmaktadır. Literatürde, laboratuvar içerisinde veya laboratuvar dışında oluşturulmuş, korona kafesleri ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [28-33]. Kafes deneyleri koronanın AC'den farklı olarak incelenmesine ve elde edilen deneysel veriler ile hesap yapmak için kullanılacak formülasyonların elde edilmesine olanak sağlar. Kullanılacak olan kafesin boyutunu, deneyin özelliği belirler. Kullanılacak olan iletken (çubuk iletken, çok telli iletken, demet iletken yapısı gibi), laboratuvarın izin verdiği gerilim düzeyi ve ölçme sistemine uygun olarak farklı boyutlarda kafesler kullanılmıştır [34-37]. Bu çalışmalarda, HVDC iletim hatlarının korona akımı, korona kaybı, duyulabilir gürültü düzeyi, radyo girişim gerilimi ve elektrik alan şiddeti dağılımı gibi parametreleri incelenmiştir. Ayrıca, sınırlı sayıda çalışmada, HVDC iletim hatlarının yükselti farkından dolayı korona

karakteristiklerindeki değişimler de incelenmiştir [38]. Bunun nedeni, yükselti farkı nedeniyle AC sistemlerde kullanılan düzeltmelerin DC sistemler için geçerli olmamasıdır. Korona kafeslerine ek olarak, HVDC iletim hatlarının performanslarını belirlemek amacı ile oluşturulmuş HVDC deney hatlarının kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır [20, 39-43]. Bu hatlarda HVDC sisteminde kullanılacak olan iletken ve konfigürasyonlar gerçek direk yapısında incelenmiştir [44]. Deney hatlarının varlığından dolayı, işletmede kullanılan (pratik koşullar altındaki) HVDC hatları ile benzer modeller oluşturulmuş ve bu koşullarda hatların korona ve diğer karakteristikleri (AN, RI) deneysel olarak incelenmiştir.

DC korona konusunda yapılan deneysel çalışmaların ayrıntılarına girildiğinde, belirli kısımlarda yoğunlaşmalar olduğu görülmektedir. Bu yoğunlaşmalar; ölçülen büyüklükler, kullanılan iletken özellikleri ve gerilim düzeyleri olarak kategorize edilebilir.

Çalışmaların genelinde, karşılaştırma parametresi olarak ölçülebilir korona büyüklükleri kullanılmıştır. Pozitif ve negatif doğru gerilimde korona başlangıç ve sönme gerilimleri deneysel olarak bulunup verilmiştir [45-47]. Bunlar genellikle korona kameraları ile belirlenmektedir [48]. Bu kameralar sahip oldukları özel filtreleme sistemleri sayesinde, koronanın oluşturduğu akım darbelerini görsel olarak gözlemlemeye olanak sağlarlar. Bu şekilde ister iletim hatlarında isterse deney elektrotlarında oluşan koronanın başlama ve sönme durumları incelenebilmektedir. [49-51]. Bir diğer önemli parametre korona akımıdır. Boşalmaların oluşturduğu yükler sebebiyle ortaya çıkan bu akımlar, farklı korona oluşumları için farklı özellikler (genlik, tekrarlanma süresi, cephe eğimi gibi) gösterirler [52-54]. Korona kafesinin topraklanmamış ölçüm kısmı bir ampermetre üzerinden topraklanarak, yüksek gerilim altında korona akımları ölçülmüştür [55-58]. Ayrıca sinyal işleme teknikleri kullanılarak da bu akımların hem ölçümleri hem de analizleri yapılmıştır [59]. Ölçülen bu değerler yardımı ile de korona kayıpları hesaplanır. Uzay yükleri özellikle yüksek doğru gerilimde boşalma karakterini etkileyen önemli bir özelliktir. Bu yüzden laboratuvar ortamında yapılan deneylerde boşalmayı daha iyi anlayabilmek için iyon yükleri ve yük yoğunlukları da ölçülmüştür [60-62].

DC gerilimler için PD ve RIV ölçümleri de literatürde yer almaktadır. Doğru gerilimde ölçüm yapabilen kısmi boşalma detektörleri yardımıyla korona yükü, uzay yükleri ve radyo girişim gerilimleri ölçülmüştür [63-65]. Özellikle katı yalıtkanlarda, DC

gerilimde yüzeysel koronanın oluşturduğu deformasyon, malzemenin yaşlanmasına yol açar. DC iletim sistemlerinde kullanılacak olan yalıtkanların (silikon kauçuk gibi) ve izolasyon malzemelerinin (kapton gibi) alternatif gerilimden farklı olarak doğru gerilim davranışlarının da incelenmesi önemlidir [66-69]. Bu incelemeler sadece katı yalıtkanlarda değil sıvı ve gaz yalıtkanlar için de yapılmıştır [70, 71].

Duyulabilir gürültü ölçümleri DC korona deneylerinde de ölçülmektedir. Ses ölçer cihazlar yardımıyla çeşitli iletkenlerde ve farklı gerilimlerde bu gürültü düzeyleri ölçülmüştür [72-74].

DC korona deneylerinde çeşitli iletken tipleri kullanılmaktadır. Bunlar genel olarak, gerçek iletkenler veya daha küçük ölçekli model iletkenler şeklinde iki gruba ayrılmıştır [75-78]. Çalışmalarda çoğunlukla daha küçük kesitli model iletkenlerin kullanıldığı ve deney sonuçlarının büyük ölçekli gerçek düzenlere uyarlandığı göze çarpmaktadır. En çok kullanılan iletken yarıçapları ise 0.4, 0.6, 0.8, 1, 1.5, 2, 3.8, 4 ve 6.8 mm'dir. Enerji iletim hatlarında kullanılan gerçek iletkenler üzerinde yapılmış çalışma sayısı bir hayli azdır ve bu konuda eksiklik bulunmaktadır. Diğer yandan, artan enerji talebi nedeniyle, bugün artık enerji iletim sistemlerinde tekli iletken yerine demet iletkenler kullanılmaktadır. Korona kafesi deneylerinde demet iletken modeli pek kullanılmamış; daha çok tekli iletken deney sonuçları demet iletken durumuna uyarlanmıştır. Bu çalışmada doğrudan demet iletkenler kullanılacağı için, sonuçlar daha gerçekçi olacaktır.

Deneylerde kullanılan gerilim düzeylerine bakıldığında ise; kullanılan korona kafeslerinin küçük ve deney iletkenlerinin ince kesitli olmaları nedeniyle, iletim hatlarındaki gerilimlerin bir hayli altında oldukları görülmektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle 0-60 kV gerilim düzeylerinde deneyler gerçekleştirilmiş, çok azında ise gerilim düzeyi 100 kV'lar mertebesine erişmiştir. Bu nedenle gerçek işletme gerilimlerinde yapılan çalışmaların azlığı göze çarpmaktadır.

Bunlar dışında yapılan deneysel çalışmaların çoğu, laboratuvarda ideale yakın koşullarda gerçekleştirilmekte olup (sabit sıcaklık, basınç ve nem durumlarında), bazı çalışmalarda yağmur, sis, ortam koşulu değişimi, yükseklik, rüzgâr ve iletken yüzeyinde biriken tozlanma gibi koronayı etkileyen dış koşulların değişimi incelenmiştir [79-85]. Deneysel verinin çeşitliliği ve fazlalığı nedeniyle istatistiksel hesap yöntemleri sıklıkla kullanılmıştır [86].

Literatür taramasına bakıldığında HVDC iletim sistemlerinde oluşan korona ile ilgili çeşitli çalışmalar olduğu görülmektedir. Fakat ayrıntılı bir gruplandırma ve inceleme yapıldığında, çalışmaların büyük bölümünün çok ince iletkenlerle (1mm çaplı veya daha küçük), küçük boyutlu kafeslerde ve görece düşük gerilimlerde gerçekleştirildiği görülmektedir. Ayrıca, gerçek sistemde kullanılan iletkenlerin ölçekli modellerinin kullanılmadığı görülmektedir.

Deneysel boyutta çalışmalar incelendiğinde ise yapılan deneylerin çeşitliliği her bir iletken için sınırlı olduğu için, bir iletken tipi veya konfigürasyonu için bütün DC korona karakteristiklerinin karşılaştırılması ile ilgili bilgilere kolaylıkla ulaşılamamaktadır. Bu tez çalışması bu noktada deneysel çalışmalara daha geniş kapsamlı bakarak hem iletken çeşitliliği ile hem de deney çeşitliliği ile literatürdeki boşluğu kapatacak katkılar içermektedir.

1.3 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, HVDC iletim hatlarının korona karakteristikleri ve elektromanyetik etkilerinin belirlenmesine odaklanılmıştır. Korona boşalmalarının varlığı, HVDC iletim hatları için, en önemli teknik problemlerden birisidir ve bu durumun farklı çevresel koşullar altında incelenmesi ve anlaşılması gerekmektedir. HVDC iletim hatlarının korona karakteristikleri, korona akımlarının analizi, korona gerilimlerinin ve korona kayıplarının belirlenmesini içermektedir. Diğer taraftan, HVDC iletim hatlarının elektromanyetik etkileri ise AN ve RI düzeylerinin incelenmesini kapsamaktadır. Bu tez çalışması ile HVDC sistemlerde oluşan koronanın karakteristiği ve elektromanyetik etkileri belirlenecektir. Bu çalışmanın, Türkiye'de ileride kurulması muhtemel HVDC iletim sistemi için bir ön çalışma niteliğinde olması beklenmekte ve tasarım kısmı için sağlıklı veriler elde etmek amaçlanmaktadır.

Amacımız, Türkiye'nin gelecekteki HVDC uygulamalarına yönelik temel bilgilerin sağlanması ve HVDC iletim hatları ile ilgili korona karakteristikleri ve elektromanyetik etkilerinin belirlenmesidir. Böylece, Türkiye'deki HVDC iletim sistemlerinin gelecek uygulamasına yönelik, HVDC iletim hatları için kaçınılmaz olan korona problemleri ve elektromanyetik etkileri konusunda faydalı bilgilerin elde edilmesine yönelik katkı sağlamaktır. Bu nedenle, tezin ilk aşamasında, HVDC uygulamalarının teknik analizi yapılacaktır. Gerilim/güç oranları, iletim hattı yapıları,

iletken yapıları, yalıtım yöntemleri teknik açıdan incelenecektir. Daha sonra deneysel çalışma kısmına geçilecektir. Model iletkenler ve gerçek iletkenler üzerinde korona kafesi kullanarak gerçekleştirilecek deneylerde DC koronanın karakteristik büyüklükleri pozitif ve negatif polaritelerde farklı durumlar için belirlenip ortaya konulacaktır.

Bu tez çalışmasının bir diğer amacı, kapsamı içinde olduğu uluslararası proje için deneysel veri sağlamaktır. Yapılan proje yüksek doğru gerilim iletim sistemlerinde oluşan korona olayını karakteristikleri ile incelemek ve irtifa etkisini de içeren bir model ortaya koymaktır. Bu kapsamda Türkiye'de ve Meksika'da benzer deneysel çalışmalar yapılarak irtifa etkisinin DC korona üzerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma projenin Türkiye ayağı için karşılaştırma verileri sağlaması açısından önemlidir.

DC korona ile ilgili çalışmaların genelinde, küçük ölçekli modeller kullanılarak, işletme (çalışma) gerilimine göre göre küçük gerilimlerde deneyler yapılmaktadır. Bunun nedeni, deneylerde kullanılan gerilim üreteç kapasitelerinin sınırlı olmalarıdır. Bu çalışmalarla elde edilen sonuç ve bulguların gerçek sistem ölçeğine adaptasyonunda önemli hatalar oluşmakta ve işletmede karşılaşılan bazı olayların açıklanması mümkün olamamaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılması planlanan İTÜ Fuat Külünk Yüksek gerilim Laboratuvarındaki 1 MV'luk yüksek doğru gerilim üreteci ile gerçek iletim sistemlerinde kullanılan gerilimlere çıkmak mümkün olmakta ve literatürdeki küçük gerilimler yerine, anma geriliminde deneyler yapılabilmektedir. Bunun yanında gerilim düzeyinin yüksek olması, deneylerde gerçek boyutlu iletkenlerin kullanılmasına olanak sağlayacaktır. Literatürde sıkça kullanılan tekli iletken modelleri yerine demet iletken modelleri ve gerçek iletkenler kullanılacak olması ile deneylerde gerçek sistem olabildiğince iyi yansıtılabilecektir. Koronanın dinamik davranış sergilemesi, iletkenlere ve dış ortam koşullarına bağlı olması nedeniyle numerik benzetim yöntemleri ile korona analizi yapmak oldukça güçtür ve literatürde çok ayrıntılı modeller bulunmamaktadır. Deneysel çalışmada elde edilecek veriler ışığında var olan modellerin geliştirilmesi veya yeni, gerçek sisteme yakın sonuçlar verebilen bir modelin kurulması hedeflenmektedir.

Türkiye'de enerji iletimi alternatif gerilim ile yapılmaktadır. Gelişen malzeme ve yarı iletken teknolojileri ile uzak mesafelere enerji iletimi için doğru akım sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizde DC ile iletim olmamakla birlikte bu yönde bazı çalışmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışması ile hat tasarımında göz ardı edilemeyecek

bir durum olan korona ile ilgili deneysel çalışma ile birlikte önemli ölçüde bilgi edinilecektir. Türkiye iletim sisteminin DC çalışmalarına katkıda bulunacak bu tezden elde edilen bilgiler ve veriler sayesinde, kayıpları daha az HVDC iletim sistemi tasarımı yapılıp hayata geçirilebilecektir.

1.4 Tezin İçeriği

Bu tez çalışmasının içeriğini; giriş, Türkiye için bir HVDC iletim sistemi tasarımı ve teknik analizi, korona kafesi tasarımı ve model iletkenlerin belirlenmesi, deneysel çalışma, sonlu elemanlar analizi çalışmaları ve sonuçlar ve öneriler kısımları ile birlikte altı bölüm oluşturmaktadır.

Birinci bölümde korona boşalmaları ile ilgili genel bilgiler verilmiş, pozitif ve negatif korona oluşum süreçleri kısaca anlatılmıştır. Ayrıca literatürde DC korona ile ilgili çalışmalar incelenmiş ve bu bölümde yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak gruplandırılmıştır. Tezin amacı ve tezin içeriği ile ilgili bilgilere de bu bölümde yer verilmiştir.

İkinci bölümde Türkiye iletim sisteminin bir özeti verilmiş ve HVDC'nin Türkiye'deki durumu özetlenmiştir. Daha sonra Türkiye için bir HVDC iletim sistemi tasarımı ayrıntıları ile verilmiştir. Gerilim düşümü ve hat kayıpları hesapları sıcaklığa bağımlı olarak hesaplanmış, önerilen sistemlere ilişkin elektrik alan analizleri ile de çalışma detaylandırılmıştır.

Korona kafesi tasarımı ve deneylerde kullanılacak olan model iletken konfigürasyonları üçüncü bölümde anlatılmıştır. Büyük boyutlu bir korona kafesinin konsept tasarımı verilmiştir. Daha sonra sonlu elemanlar analizi ile çalışmalarda kullanılabilecek kafesin boyutları belirlenmiştir. Kafes içerisinde kullanılmaya uygun model iletkenlerin konfigürasyonlarının oluşturulması bu bölümün kapsamındadır.

Dördüncü bölümü deneysel çalışma kısmı oluşturmaktadır. Burada iki ayrı korona kafesinde (büyük ve küçük boyutlu) farklı iletken türleri ve konfigürasyonları için deneyler yapılmış ve korona başlangıç gerilimleri, korona akımları ölçülerek korona kayıpları, radyo girişimi (RIV) duyulabilir gürültü (AN) hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde deneysel yöntemlerle elde edilen sonuçlar (gerilim değerleri) kullanılarak kafes ve iletken yapılarında sonlu elemanlar yöntemi ile korona durumundaki elektrik alan değerleri elde edilmiştir.

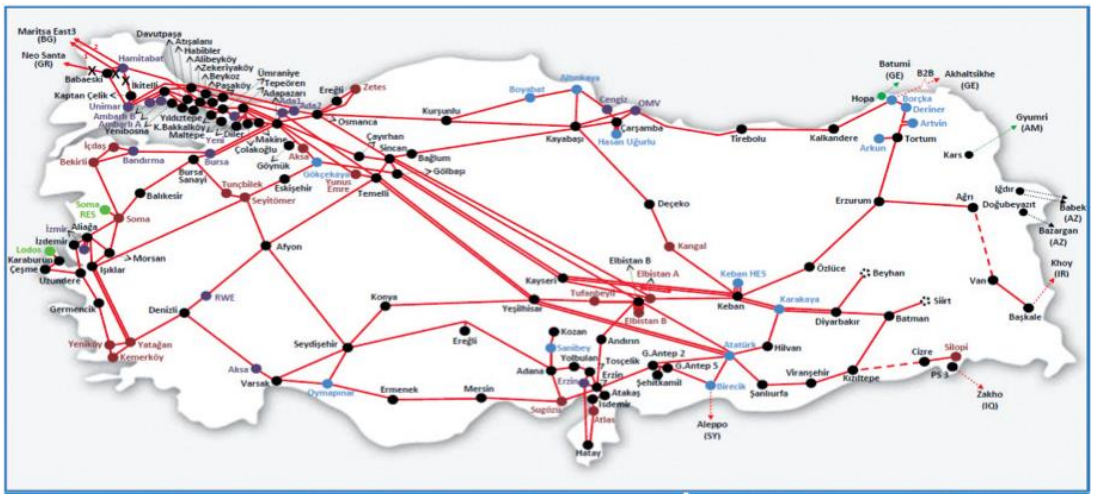
Son bölümde ise yapılan çalışma özetlenmiş ve elde edilen sonuçlar sıralanmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında yapılmamış ama ilerletilebilecek gelecek çalışmalarla ilgili öneriler verilmiştir.

2. TÜRKİYE İÇİN BİR HVDC İLETİM SİSTEMİ TASARIMI VE TEKNİK ANALİZİ

Bu bölümde Türkiye için bir HVDC iletim hattı tasarımı teknik boyutları ile incelenmiş ve bir tasarım yapılmıştır. Buradaki amaç, deneysel çalışmanın oturabileceği sağlam bir temel oluşturmaktır. İlk kısımda Türkiye'nin HVDC'deki durumu ve mevcut iletim sistemi çok kısa özetlenmiştir. Daha sonra konsept tasarım ortaya atılmış ve farklı iletken konfigürasyon seçenekleri için uygunlukları, çeşitli hesaplamalarla (kayıp, gerilim düşümü, elektrik alan gibi) irdelenmiştir.

2.1 Türkiye İletim Sistemine Genel Bakış

Ülkemizde elektrik enerjisi 154 kV ve 400 kV'luk yüksek AC iletim sistemi ile taşınmaktadır. Şekil 2.1'de, 400 kV'luk elektrik iletim sistemine ilişkin hatlar ve transformatör merkezleri görülmektedir. Bu iletim sistemi ile yoğun hidrolik potansiyelin olduğu güneydoğu bölgesi ve termik potansiyelin olduğu batı bölgesinden, nüfusun ve endüstrinin daha fazla olduğu kuzey-batı bölgelerine bir enerji transferi sağlanmaktadır.

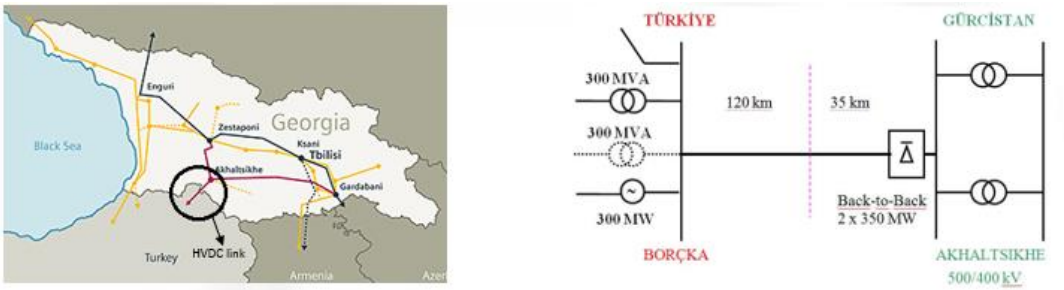


Şekil 2.1: Türkiye'nin 400 kV'luk AC iletim hattı şebekesi.

TEİAŞ 2018 verilerine göre, 400 kV'luk AC iletim sistemi 324 iletim hattından oluşmaktadır. Bu hatlar 353 transformatör merkezi ile birbirine bağlanmıştır. Transformatörlerin toplam gücü 70652 MVA'dır. 56919 hava hattı direği bulunan

hatların toplam uzunlukları 23159 km'dir. Bu sistemdeki iletim hattı kayıpları ise yılda 5077.2 GWh'dir. Bu kayıp taşınan gücün %1.93'üne denk düşmektedir.

Henüz daha Türkiye'de HVDC ile enerji iletimi yapılmamaktadır. Fakat Gürcistan ile aramızda olan sırt sırta (back-to back) HVDC bağlantısı bulunmaktadır (Şekil 2.2). 2000 MVA gücündeki bu sistem Borçka-Türkiye ile Akhaltsikhe-Gürcistan arasında 150 km'lik bir sistemdir. Güç 400 kV'luk hatlar ile taşınmaktadır.

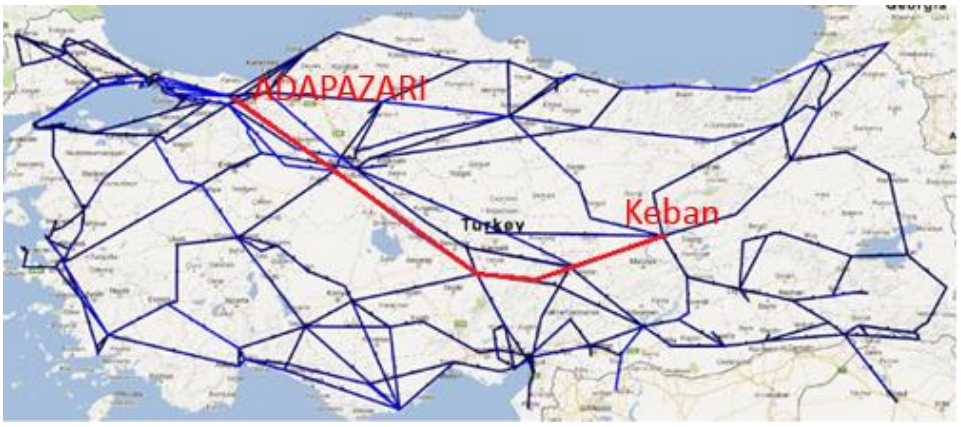


Şekil 2.2: Türkiye'deki sırt sırta HVDC bağlantısı.

Bunun dışında TEİAŞ 2018 faaliyet raporuna göre Türkiye ile İran arasında bir sırt sırta HVDC iletim sistemi kurulması ile ilgili bir proje bulunmaktadır. Kurulacak olan Akkuyu nükleer santrali toplamda 4800 MW kurulu güce sahip olacaktır. Yeri göz önüne alındığında sanayi yoğun bölgelere bağlantı yapmak için HVDC sistemi çok uygun görülmektedir. Bu proje ile ilgili çalışmaların yapılması olasıdır. Son olarak gündemde olan bir başka proje de kuzey Kıbrıs'ın enerji ihtiyacını çözmek için planlanan DC iletimdir.

2.2 Türkiye İçin Bir HVDC İletim Sistemi Fonksiyon Tasarımı

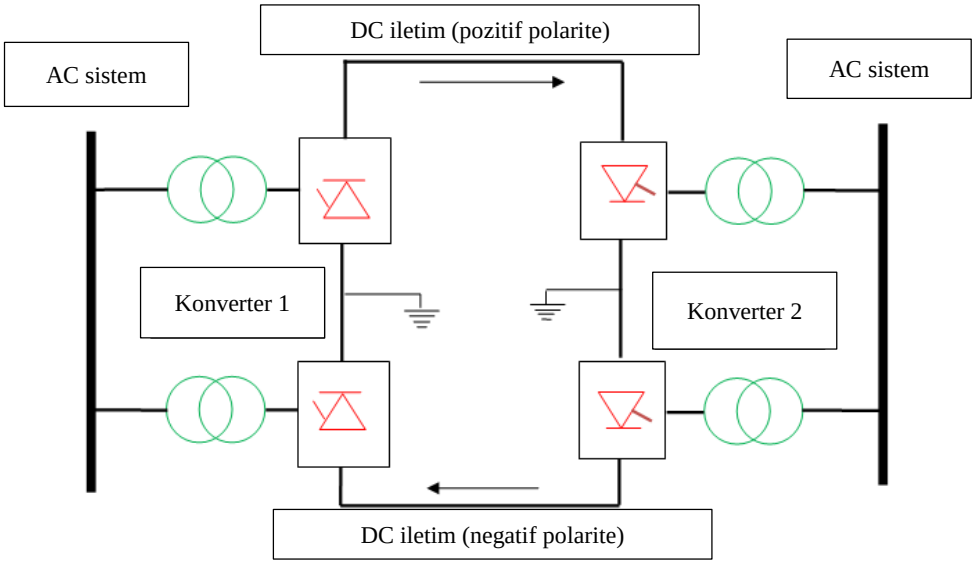
Türkiye gibi, enerjinin yoğun olarak üretildiği ve yoğun olarak tüketildiği yerler arasında uzun mesafeler olan ülkelerde, enerji iletimini DC ile yapmak, AC iletimden daha ekonomik olabilmektedir. DC ile iletimde kullanılan iletkenler daha incedir. Ayrıca, aynı miktar enerji, doğru gerilim sistemleri ile daha az iletken kullanılarak taşınabildiği için, toplam maliyet ve kayıplar daha düşük olmaktadır. Tüm bu bilgiler ışığında Türkiye'de gelecekte HVDC iletim sistemlerinin kullanılması kaçınılmazdır. Bu nedenle bu tez kapsamında Türkiye için bir HVDC iletim sistemi tasarımı ve teknik analizi verilmiştir.



Şekil 2.3: Keban –Adapazarı arası HVDC iletim sistemi.

Şekil 2.3'te verilmiş olan AC iletim şebekesi üzerindeki kırmızı hatlar, tez çalışmasında öngörülen DC iletim sistemine aittir. DC ile iletim uzun mesafelerde daha ekonomik olduğu için sistem yaklaşık 1000 km olacak şekilde tasarlanmıştır. Başlangıç noktası, en büyük hidroelektrik santrallerinden biri olan Keban'dır. Enerjinin Keban'dan Adapazarı'na kadar taşınması planlanmaktadır. Adapazarı hem sanayi yoğunluğunun fazla olması hem de İstanbul'a yakın olması nedeniyle seçilmiştir.

HVDC sistem için 3000 MW güç kapasitesi öngörülmüştür. Bu gücün iki kutuplu doğru gerilim sistemi ile taşınmasının uygun olduğuna karar verilmiştir (Şekil 2.4). Dünyadaki benzer uygulamalar ve coğrafi büyüklüğümüz göz önüne alındığında, bu güçteki bir sistem için gerilim seviyesi ±500 kV ve ±600 kV seçilmiştir. İletim hattı uzunluğu 1000 km olduğu için, toplamda 2500 direk kullanılarak iletim sağlanması planlanmıştır.



Şekil 2.4: İki kutuplu HVDC iletim sistemi.

Çift kutuplu doğru gerilim sistemi, güç düzeyi tek kutuplu sistemin taşıyacağından daha büyük olduğu durumlarda tercih edilir. Bu sistemde iletim iki koldan yapılır ve dönüş iletkeni genellikle toprak olarak kullanılır. Maksimum 3000 MW'lık toplam gücün dengeli (her iki kolda 1500 MW) olarak iletileceği varsayılmıştır. Sistemin çektiği akım ise, öngörülen gerilim düzeyine göre değişiklik göstermektedir. ± 500 kV'luk sistemin çekeceği maksimum akım 3000 A ve ± 600 kV'luk sistemin çekeceği akım ise 2500 A'dir.

HVDC iletiminde kullanılacak olan iletenler ve iletken konfigürasyonları, sistemin çektiği akıma ve dolayısıyla gücüne bağlı olarak belirlenir. Bu sistemlerin çektikleri maksimum akımlar göz önünde bulundurulduğunda, 1272 MCM ve 954 MCM iletkenlerin kullanılabileceği öngörülmüştür. AC sistemlerde kullanılan alışılagelmiş, daire kesitli ACSR iletkenlerin yanında ikizkenar yamuk kesitli ACSR/TW iletkenler, yeni nesil AAC ve AAAC iletkenler de tasarım seçenekleri olarak dikkate alınmış ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Taşınacak güç ve mevcut uygulamalar dikkate alınarak, 4x1272 MCM, 3x1272 MCM ve 3x954 MCM demet iletken seçenekleri düşünülmüştür. Koruma iletkeni olarak 9.5 mm'lik 7 telli iletken seçilmiştir. Bu sistem için dönüş iletkeni toprak olduğu için nötr iletkenine gerek yoktur.

Bu özelliklere sahip sistemde, her iletken türü ve konfigürasyonu için, hat kayıpları, gerilim düşümü ve korona kaybı hesapları yapılmıştır. Ayrıntılar aşağıda verilmiştir.

2.3 Tasarlanan Sistem İçin Hat Kayıplarının Hesaplanması

Hattaki joule kayıpları iletim sistemi tasarımında önemli bir yer tutar. Bu yüzden 3000 MW maksimum güç ve 600 kV anma gerilim değeri için hat kayıpları hesabı aşağıda verilmiştir:

S_{max}=3000 MW ve U= 600 kV için hattan akan akımı (tek iletken için)

$$I = \frac{S_{max}/2}{U} = 2500\ A \tag{2.1}$$

4'lü demet iletken kullanılması durumunda, demetteki her bir iletkenden geçen akım;

$$I_1 = \frac{I}{4} = 625\ A \tag{2.2}$$

1272 MCM ACSR iletken için DC direnç değeri 0.044 Ω/km (20 ºC) alınırsa, 4'lü demet iletkende, anma gücünde ve 20 ºC sıcaklıkta, km başına joule kaybı

$$P = I_1^2 x 0.044 x 4 \tag{2.3}$$

Gidiş dönüş hattı için km başına kayıp 137.5 kW/km olarak bulunur. L=1000 km uzunluğundaki bir HVDC hat için toplam kayıp ise;

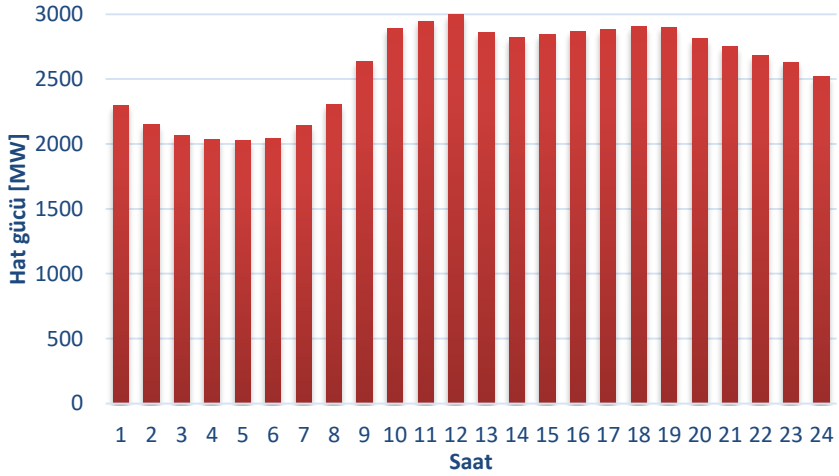
$$P_{toplam} = Px1000 = 137.5\ MW \tag{2.4}$$

olarak bulunur. ±500 kV ve ±600 kV için, 4x1272 MCM, 3x1272 MCM ve 3x954 MCM için ve ACSR, ACSR/TW, AAC, AAAC iletkenler için hat kayıpları ayrı ayrı hesaplanmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan iletkenlerin doğru akım dirençleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: HVDC İletiminde kullanılacak iletkenlerin DC dirençleri, [Ω/km].

	1272 MCM				**954 MCM**			
	AAC	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
[Ω/km]	0,051	0,044	0,044	0,050	0,060	0,059	0,059	0,066

Hattın enerji kayıpları hesaplanırken, Türkiye için günlük yük eğrisi ve 3000 MW maksimum güç değeri referans alınarak, Şekil 2.5'teki gibi bir eğri yeniden oluşturulmuş ve bu eğri kullanılarak saatlik olarak hatta oluşan kayıplar hesaplanmıştır. 500 kV ve 600 kV gerilim seviyeleri için hesaplanan bu kayıp değerlerinin ortalamaları alınarak günlük ortalama kayıplar hesaplanmıştır (Çizelge 2.2). Hesaplanan kayıpların saatlik değerleri Çizelge 2.3 ve 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.5: 3000 MW maksimum iletilen güce göre düzenlenmiş günlük yük eğrisi.

Çizelge 2.2: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış ortalama hat kayıpları.

	Joule kaybı [MW]	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
500 kV	4x1272 MCM	173,17	149,40	149,40	169,77
	3x1272MCM	230,89	199,20	199,20	226,36
	3x954 MCM	271,64	267,11	267,11	298,80
600 kV	4x1272 MCM	120,25	103,75	103,75	117,89
	3x1272MCM	160,34	138,33	138,33	157,19
	3x954 MCM	188,63	185,49	185,49	207,50

Çizelge 2.3: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (500 kV için).

	Joule Kaybı [MW]											
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
saat	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC
1	134,1	115,7	115,7	131,5	178,8	154,2	154,2	175,3	210,3	206,8	206,8	231,4
2	117,9	101,8	101,8	115,6	157,3	135,7	135,7	154,2	185,0	181,9	181,9	203,5
3	109,0	94,0	94,0	106,9	145,3	125,4	125,4	142,5	171,0	168,1	168,1	188,1
4	105,2	90,8	90,8	103,1	140,3	121,0	121,0	137,5	165,0	162,3	162,3	181,5
5	104,6	90,2	90,2	102,5	139,4	120,3	120,3	136,7	164,1	161,3	161,3	180,5
6	106,6	92,0	92,0	104,5	142,2	122,7	122,7	139,4	167,3	164,5	164,5	184,0
7	117,0	100,9	100,9	114,7	156,0	134,6	134,6	152,9	183,5	180,4	180,4	201,8
8	135,0	116,5	116,5	132,3	180,0	155,3	155,3	176,4	211,7	208,2	208,2	232,9
9	177,8	153,4	153,4	174,3	237,0	204,5	204,5	232,4	278,8	274,2	274,2	306,7
10	212,9	183,7	183,7	208,7	283,8	244,9	244,9	278,3	333,9	328,4	328,4	367,3
11	221,7	191,3	191,3	217,4	295,7	255,1	255,1	289,9	347,8	342,0	342,0	382,6
12	229,5	198,0	198,0	225,0	306,0	264,0	264,0	300,0	360,0	354,0	354,0	396,0
13	207,9	179,4	179,4	203,8	277,2	239,1	239,1	271,8	326,1	320,7	320,7	358,7
14	203,1	175,2	175,2	199,1	270,7	233,6	233,6	265,4	318,5	313,2	313,2	350,4
15	206,4	178,0	178,0	202,3	275,1	237,4	237,4	269,8	323,7	318,3	318,3	356,1
16	209,3	180,6	180,6	205,2	279,1	240,8	240,8	273,6	328,3	322,9	322,9	361,2
17	211,6	182,5	182,5	207,4	282,1	243,4	243,4	276,6	331,9	326,4	326,4	365,1
18	215,3	185,8	185,8	211,1	287,1	247,7	247,7	281,5	337,8	332,2	332,2	371,6
19	214,7	185,3	185,3	210,5	286,3	247,0	247,0	280,7	336,8	331,2	331,2	370,5
20	202,0	174,3	174,3	198,1	269,4	232,4	232,4	264,1	316,9	311,6	311,6	348,6
21	192,6	166,2	166,2	188,8	256,8	221,6	221,6	251,8	302,1	297,1	297,1	332,4
22	183,6	158,4	158,4	180,0	244,8	211,2	211,2	240,0	288,0	283,2	283,2	316,8
23	176,5	152,3	152,3	173,1	235,4	203,1	203,1	230,8	276,9	272,3	272,3	304,6
24	161,7	139,5	139,5	158,5	215,6	186,0	186,0	211,4	253,7	249,4	249,4	279,0

Çizelge 2.4: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (600 kV için).

	Joule Kaybı [MW]											
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
saat	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC
1	93,1	80,3	80,3	91,3	124,1	107,1	107,1	121,7	146,1	143,6	143,6	160,7
2	81,9	70,7	70,7	80,3	109,2	94,2	94,2	107,1	128,5	126,3	126,3	141,3
3	75,7	65,3	65,3	74,2	100,9	87,1	87,1	99,0	118,7	116,8	116,8	130,6
4	73,1	63,0	63,0	71,6	97,4	84,0	84,0	95,5	114,6	112,7	112,7	126,1
5	72,6	62,7	62,7	71,2	96,8	83,5	83,5	94,9	113,9	112,0	112,0	125,3
6	74,0	63,9	63,9	72,6	98,7	85,2	85,2	96,8	116,1	114,2	114,2	127,8
7	81,2	70,1	70,1	79,6	108,3	93,4	93,4	106,2	127,4	125,3	125,3	140,2
8	93,7	80,9	80,9	91,9	125,0	107,8	107,8	122,5	147,0	144,6	144,6	161,7
9	123,4	106,5	106,5	121,0	164,6	142,0	142,0	161,4	193,6	190,4	190,4	213,0
10	147,8	127,5	127,5	144,9	197,1	170,1	170,1	193,2	231,9	228,0	228,0	255,1
11	154,0	132,9	132,9	151,0	205,3	177,1	177,1	201,3	241,5	237,5	237,5	265,7
12	159,4	137,5	137,5	156,3	212,5	183,3	183,3	208,3	250,0	245,8	245,8	275,0
13	144,4	124,6	124,6	141,5	192,5	166,1	166,1	188,7	226,5	222,7	222,7	249,1
14	141,0	121,7	121,7	138,2	188,0	162,2	162,2	184,3	221,2	217,5	217,5	243,3
15	143,3	123,6	123,6	140,5	191,1	164,8	164,8	187,3	224,8	221,0	221,0	247,3
16	145,4	125,4	125,4	142,5	193,8	167,2	167,2	190,0	228,0	224,2	224,2	250,8
17	146,9	126,8	126,8	144,1	195,9	169,0	169,0	192,1	230,5	226,6	226,6	253,5
18	149,5	129,0	129,0	146,6	199,4	172,0	172,0	195,5	234,6	230,7	230,7	258,0
19	149,1	128,7	128,7	146,2	198,8	171,5	171,5	194,9	233,9	230,0	230,0	257,3
20	140,3	121,0	121,0	137,6	187,1	161,4	161,4	183,4	220,1	216,4	216,4	242,1
21	133,8	115,4	115,4	131,1	178,3	153,9	153,9	174,9	209,8	206,3	206,3	230,8
22	127,5	110,0	110,0	125,0	170,0	146,7	146,7	166,7	200,0	196,7	196,7	220,0
23	122,6	105,8	105,8	120,2	163,5	141,0	141,0	160,3	192,3	189,1	189,1	211,5
24	112,3	96,9	96,9	110,1	149,7	129,2	129,2	146,8	176,2	173,2	173,2	193,8

2.4 Tasarlanan Sistem İçin Gerilim Düşümü Hesaplanması

Tasarlanan iletim hattı sistemi için güç kaybından sonra gerilim düşümü hesabı da yapılmıştır. Yine benzer şekilde maksimum 3000 MW güç ve 600 kV anma gerilim için gerilim düşümü hesabı aşağıda verilmiştir:

L=1000 km olan 1272 MCM ACSR 4'lü demet iletkenin toplam direnci;

$$R = \frac{0.044x1000}{4} \tag{2.5}$$

Bu dirence sahip olan hattan 2500 amper akım akması durumunda hat sonunda oluşacak gerilim düşümü;

$$\Delta U = IxR \tag{2.6}$$

Bu gerilim düşümünün 600 kV'luk sistemdeki % olarak değeri ise

$$\delta U = \frac{\Delta Ux100}{U} \tag{2.7}$$

Yapılan bu hesap 500 ve 600 kV gerilimler, bütün iletken türleri ve iletken konfigürasyonları için tekrarlanmıştır. Ayrıca günlük yük eğrisine göre yapılan hesaplamalar sonucunda ortalama gerilim düşümü değerleri elde edilmiştir. Çizelge 2.5'te bu ortalama gerilim düşümü değerleri görülmektedir. Hesaplanan bütün değerler ise Çizelge 2.6 ve 2.7'de görülmektedir.

Çizelge 2.5: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış ortalama gerilim düşümleri.

	% Gerilim düşümü	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
500 kV	4x1272 MCM	6,59	5,68	5,68	6,46
	3x1272MCM	8,78	7,58	7,58	8,61
	3x954 MCM	10,33	10,16	10,16	11,37
600 kV	4x1272 MCM	4,58	3,95	3,95	4,49
	3x1272MCM	6,10	5,26	5,26	5,98
	3x954 MCM	7,18	7,06	7,06	7,89

Çizelge 2.6: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümü (500 kV için).

	% Gerilim Düşümü											
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
Saat	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
1	5,8	5,0	5,0	5,7	7,8	6,7	6,7	7,6	9,2	9,0	9,0	10,1
2	5,5	4,7	4,7	5,4	7,3	6,3	6,3	7,2	8,6	8,5	8,5	9,5
3	5,3	4,5	4,5	5,2	7,0	6,1	6,1	6,9	8,3	8,1	8,1	9,1
4	5,2	4,5	4,5	5,1	6,9	6,0	6,0	6,8	8,1	8,0	8,0	8,9
5	5,2	4,5	4,5	5,1	6,9	5,9	5,9	6,8	8,1	8,0	8,0	8,9
6	5,2	4,5	4,5	5,1	7,0	6,0	6,0	6,8	8,2	8,0	8,0	9,0
7	5,5	4,7	4,7	5,4	7,3	6,3	6,3	7,1	8,6	8,4	8,4	9,4
8	5,9	5,1	5,1	5,8	7,8	6,7	6,7	7,7	9,2	9,0	9,0	10,1
9	6,7	5,8	5,8	6,6	9,0	7,7	7,7	8,8	10,6	10,4	10,4	11,6
10	7,4	6,4	6,4	7,2	9,8	8,5	8,5	9,6	11,6	11,4	11,4	12,7
11	7,5	6,5	6,5	7,4	10,0	8,6	8,6	9,8	11,8	11,6	11,6	13,0
12	7,7	6,6	6,6	7,5	10,2	8,8	8,8	10,0	12,0	11,8	11,8	13,2
13	7,3	6,3	6,3	7,1	9,7	8,4	8,4	9,5	11,4	11,2	11,2	12,6
14	7,2	6,2	6,2	7,1	9,6	8,3	8,3	9,4	11,3	11,1	11,1	12,4
15	7,3	6,3	6,3	7,1	9,7	8,3	8,3	9,5	11,4	11,2	11,2	12,5
16	7,3	6,3	6,3	7,2	9,7	8,4	8,4	9,5	11,5	11,3	11,3	12,6
17	7,3	6,3	6,3	7,2	9,8	8,4	8,4	9,6	11,5	11,3	11,3	12,7
18	7,4	6,4	6,4	7,3	9,9	8,5	8,5	9,7	11,6	11,4	11,4	12,8
19	7,4	6,4	6,4	7,3	9,9	8,5	8,5	9,7	11,6	11,4	11,4	12,8
20	7,2	6,2	6,2	7,0	9,6	8,3	8,3	9,4	11,3	11,1	11,1	12,4
21	7,0	6,0	6,0	6,9	9,3	8,1	8,1	9,2	11,0	10,8	10,8	12,1
22	6,8	5,9	5,9	6,7	9,1	7,9	7,9	8,9	10,7	10,6	10,6	11,8
23	6,7	5,8	5,8	6,6	8,9	7,7	7,7	8,8	10,5	10,3	10,3	11,6
24	6,4	5,5	5,5	6,3	8,6	7,4	7,4	8,4	10,1	9,9	9,9	11,1

Çizelge 2.7: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümü (600 kV için).

	% Gerilim Düşümü											
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
Saat	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
1	4,1	3,5	3,5	4,0	5,4	4,7	4,7	5,3	6,4	6,3	6,3	7,0
2	3,8	3,3	3,3	3,7	5,1	4,4	4,4	5,0	6,0	5,9	5,9	6,6
3	3,7	3,2	3,2	3,6	4,9	4,2	4,2	4,8	5,7	5,6	5,6	6,3
4	3,6	3,1	3,1	3,5	4,8	4,1	4,1	4,7	5,6	5,5	5,5	6,2
5	3,6	3,1	3,1	3,5	4,8	4,1	4,1	4,7	5,6	5,5	5,5	6,2
6	3,6	3,1	3,1	3,6	4,8	4,2	4,2	4,7	5,7	5,6	5,6	6,2
7	3,8	3,3	3,3	3,7	5,1	4,4	4,4	5,0	5,9	5,9	5,9	6,5
8	4,1	3,5	3,5	4,0	5,4	4,7	4,7	5,3	6,4	6,3	6,3	7,0
9	4,7	4,0	4,0	4,6	6,2	5,4	5,4	6,1	7,3	7,2	7,2	8,1
10	5,1	4,4	4,4	5,0	6,8	5,9	5,9	6,7	8,0	7,9	7,9	8,8
11	5,2	4,5	4,5	5,1	7,0	6,0	6,0	6,8	8,2	8,1	8,1	9,0
12	5,3	4,6	4,6	5,2	7,1	6,1	6,1	6,9	8,3	8,2	8,2	9,2
13	5,1	4,4	4,4	5,0	6,7	5,8	5,8	6,6	7,9	7,8	7,8	8,7
14	5,0	4,3	4,3	4,9	6,7	5,7	5,7	6,5	7,8	7,7	7,7	8,6
15	5,0	4,3	4,3	4,9	6,7	5,8	5,8	6,6	7,9	7,8	7,8	8,7
16	5,1	4,4	4,4	5,0	6,8	5,8	5,8	6,6	8,0	7,8	7,8	8,8
17	5,1	4,4	4,4	5,0	6,8	5,9	5,9	6,7	8,0	7,9	7,9	8,8
18	5,1	4,4	4,4	5,0	6,9	5,9	5,9	6,7	8,1	7,9	7,9	8,9
19	5,1	4,4	4,4	5,0	6,9	5,9	5,9	6,7	8,1	7,9	7,9	8,9
20	5,0	4,3	4,3	4,9	6,6	5,7	5,7	6,5	7,8	7,7	7,7	8,6
21	4,9	4,2	4,2	4,8	6,5	5,6	5,6	6,4	7,6	7,5	7,5	8,4
22	4,8	4,1	4,1	4,7	6,3	5,5	5,5	6,2	7,5	7,3	7,3	8,2
23	4,7	4,0	4,0	4,6	6,2	5,4	5,4	6,1	7,3	7,2	7,2	8,0
24	4,5	3,8	3,8	4,4	5,9	5,1	5,1	5,8	7,0	6,9	6,9	7,7

2.5 Tasarlanan Sistem İçin Korona Kaybı Hesaplanması

Demet iletken yapısındaki iletim hatlarında meydana gelen korona kayıplarını hesaplamak için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Ampirik ifadelerden oluşan bu formüller DC sistemin yapısına göre değişmektedir.

Knutsen ve Iliceto'ya göre tek kutuplu sistemler için korona kayıpları şu şekilde hesaplanır:

$$P = U.k_c.n.r.2^{0,25(g-g_0)}.10^{-3} \quad (2.8)$$

Burada U hat gerilimini, n demetteki iletken sayısını, r demetteki iletkenlerin yarıçapını, g ve g_0 iletkendeki en yüksek elektrik alan şiddetini ve referans elektrik alan şiddetini ifade eder. Referans değer bağıl hava yoğunluğuna göre değişmektedir (g_0=22.δ kV/cm). k_c iletken yüzey pürüzüne göre belirlenmiş bir katsayıdır. Pürüzsüz ve temiz iletken yüzeylerinde bu değer 0.15 iken, yaşlanmış, kirli ve pürüzlü yüzeyli iletkenlerde 0.35'dir.

İki kutuplu DC sistemlerde ise, korona kayıpları, iletkenin yerden yüksekliğine ve kutuplar arası uzaklığa bağlıdır. Bipolar sistemdeki korona kayıpları (2.8) formülünden türetilerek şu şekilde yazılabilir:

$$P = 2U.\left(1+\frac{2}{\pi}tan^{-1}\frac{2H}{S}\right).k_c.n.r.2^{0,25(g-g_0)}.10^{-3} \quad (2.9)$$

Bir üstteki formülden farklı olarak H iletkenin yerden yüksekliği ve S'de kutuplar arası uzaklıktır. Ortam koşullarının normal koşullar (T=20 ºC and P=760 mmHg) olarak alındığı durumda, yerden 27 m yüksekliğinde ve kutuplar arası uzaklığı 16 m olan 1000 km'lik bir iki kutuplu HVDC iletim sistemi için hesaplanmış korona kayıpları Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8: Farklı konfigürasyonlarda DC korona kaybı hesabı.

Gerilim	**Korona Kaybı [MW]**		
	4x1272 MCM	**3x1272 MCM**	**3x954 MCM**
500 kV DC	2,409	1,807	1,528
600 kV DC	2,891	2,168	1,834

2.6 Hat Parametrelerinin Hesabına Sıcaklık Etkisinin Eklenmesi

İletim hatları ile ilgili dirence bağlı hesap yaparken (gerilim düşümü ve kayıp gibi), iletkenden o an geçen akıma ve o akım nedeniyle ısınıp değeri değişen direnci dikkate almak gerekir. CIGRE 601 WG B2.43, (Guide For Thermal Rating Calculations Of Overhead Lines) iletim hatlarının ortam koşulları (rüzgâr hızı, güneş radyasyonu… vb.) ve akım ile direncinin nasıl değiştiğini ve nasıl hesaplanacağını vermektedir.

Bir iletkenin ısıl kararlılığı; iletkenden geçen akıma, ortam sıcaklığına, ortamın hava koşullarına (rüzgâr hızı ve yönü, güneş radyasyonu gibi) bağlıdır. Bütün bu koşullar sabit kaldığında iletkenin eriştiği sıcaklık, iletkenin kararlı durumdaki sıcaklığıdır ve kararlı durumda denklem 2.10'u sağlar.

$$ısı\ kazanımı = ısı\ kaybı$$
$$P_j + P_s + P_M + P_i = P_c + P_r + P_W \tag{2.10}$$

Burada P_j joule kayıplarının oluşturduğu ısınmayı (joule heating), P_s güneşten kaynaklanan ısınmayı (solar heating), P_M manyetik ısınmayı (magnetic heating), P_i korona nedeniyle oluşan ısınmayı (corona heating) gösterir. Isı kayıpları (soğuma) ise; P_c konvektif soğuma (convective cooling), P_r radyasyona bağlı soğuma (radiative cooling) ve P_W buharlaşmaya dayalı soğuma (evaporative cooling) bileşenlerinden oluşur.

Denklem 2.11'deki ısıl eşitlikte koronanın oluşturduğu ısınma; her durumda gerçekleşmeyeceği ve diğer ısı kaynaklarının yanında çok küçük kaldığı için ihmal edilebilir. Hesaplamaların çoğunda manyetik kaynaklı ısınmalar hat kayıplarının içerisine dahil edilir. Ayrıca buharlaşma temelli ısı kaybı hatların sadece yağmurdan sonraki durumunu etkilediği için ihmal edilebilir [87]. Bu kabuller altında bir iletim hattı için ısıl eşitlik şu hali alır:

$$P_j + P_s = P_c + P_r \tag{2.11}$$

P_j joule kayıplarının oluşturduğu ısınma

İletkende oluşan joule kayıpları DC direnç için şu şekilde hesaplanır:

$$P_j = I^2.R_{DC} \tag{2.12}$$

Buradaki R_{DC}, sıcaklığa bağlı doğru akım direncidir. Özgül direnci ρ [Ω.m] olan bir iletkenin, herhangi bir T sıcaklığındaki iletkenliği,

$$\rho = \rho_{20}.[1 + \alpha_{20}.(T - 20) + \zeta_{20}.(T - 20)^2] \quad (2.13)$$

ile hesaplanır. Burada ρ_{20} iletkenin 20 ^oC'deki özgül direnci, α_{20} ve ζ_{20} ise birinci ve ikinci dereceden sıcaklık katsayılarıdır. İkinci dereceden sıcaklık katsayısı sadece yüksek sıcaklıklarda (130 ^oC ve üstü) önem kazanır.

Alternatif akıma gelindiğinde ise joule kaybı hesaplanmış olan DC direnci üzerinde formül 2.14'teki gibi hesaplanır.

$$P_j = k_{sk}.I^2.R_{DC} \quad (2.14)$$

Burada k_{sk} deri etkisi katsayısıdır. Güç frekansındaki değeri 1.02'den küçük olmakla birlikte, kalın iletkenlerde (45 mm ve üzeri çaplarda) bu değer 1.08'e kadar çıkmaktadır [88]. Analitik olarak ise Bessel formülü ile hesaplanabilmektedir [89].

Manyetik Isınma

ACSR gibi çelik öz bulunduran iletken tabakalarında aksiyel manyetik akının çelik çekirdekte oluşturduğu ısınma P_{core} ve akım yoğunluklarının alüminyum iletken tabakalara tekrar dağılması sonucu oluşan kayba P_{redis} denirse, toplam manyetik kayıp

$$P_M = P_{core} + P_{redis} \quad (2.15)$$

İle hesaplanır [90].

P_s güneşten kaynaklanan ısınma

Birim uzunluktaki iletken için güneşten kaynaklanan ısınma iletkenin dış çapı D, yüzey soğurganlığı α_s ve global ışıma yoğunluğu I_T ile doğrudan ilişkilidir. W/m cinsinden güneşten kaynaklanan ısınma

$$P_s = \alpha_s.I_T.D \quad (2.16)$$

Formülü ile hesaplanır. İletkenin yüzey soğurganlığı, yüzeyi temiz iletkende 0.2 ile yüzeyi çok kirli durumda 0.9 arasında değişebilir. Global ışıma yoğunluğu I_T; yüzeyle olan direkt güneş ışıması I_B, yatay yüzeydeki havadan yayılan radyasyon I_d ve topraktan yansıyan radyasyonun F'in bir birleşimidir. İletkendeki solar güç (W/m) bu ifadeler eşliğinde birim uzunluk için formül 2.17 ile hesaplanır:

$$P_s = \alpha_s . D . \left[I_B . \left(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} . F . \sin(H_s) \right) + I_d . \left(1 + \frac{\pi}{2} . F \right) \right] \quad (2.17)$$

Burada D m cinsinden iletkenin çapını göstermektedir. I_B yüzey ışıma yoğunluğu (W/m^2) deniz düzeyi koşulunda aşağıdaki formül ile hesaplanır:

$$I_{B(0)} = N_s . \frac{1280 . \sin(H_s)}{\sin(H_s) + 0{,}314} \quad (2.18)$$

N_s: aydınlık faktörü (0,8-1,2 açık hava durumu; <0,5 bulutlu hava durumu)

Işıma yoğunluğu deniz düzeyinden yükseldikçe azalır. Yüksekliğe bağlı olarak hesaplanmak istediğinde ise

$$I_{B(y)} = I_{B(0)} . \left[1 + 1{,}4 . 10^{-4} . y . \left(\frac{1367}{I_{B(0)}} - 1 \right) \right] \quad (2.19)$$

Formülü kullanılır. Buradaki H_s solar yüksekliktir ve formül 2.20 ile hesaplanır.

$$H_s = \arcsin(\sin(\varphi) . \sin(\delta_s) + \cos(\varphi) . \cos(\delta_s) . \cos(Z)) \quad (2.20)$$

φ: $enlem$

δ_s: ekvator ile dünyanın merkesinden güneşin merkezine çizilen doğru arasındaki açıdır

$= 23{,}3 . sin \left[\frac{2 . \pi . (284 + N^*)}{365} \right]$

N^*: $gün$

Z: güneşin saatlik açısı $= 15 . (12 - \text{Time})$ (her saat bu açı 15 derece azalır)

Havadan yayılan radyasyon yoğunluğunun (W/m^2) doğrudan güneş ışıması ile korelasyonu vardır.

$$I_d = (430{,}5 - 0{,}3288 . I_B) . \sin(H_s) \quad (2.21)$$

η güneş ışını ile iletken ekseni arasındaki açıdır

$$\eta = \arccos[\cos(H_s) . \cos(\gamma_s - \gamma_c) .] \quad (2.22)$$

γ_s: $iletkenin\ azimutu$

γ_c: $güneşin\ azimutu = \arcsin \left[\frac{\cos(\delta_s) . \sin(Z)}{\cos(H_s)} \right]$

Topraktan yansıyan radyasyon F ortama göre değişir. Deniz yüzeyinde 0.05, orman ortamında 0.1, toprakta ve çim alanda 0.2, kumda 0.3, buzda 0.4-0.6 ve karda 0.8'dir. Bu değerler solar yükseklik ile artar.

Pc konvektif soğuma

Konveksiyon, rüzgârdan bağımsız olarak iletim hatlarının soğuması için en önemli etkendir. İletkenin sıcaklığı konveksiyonun az olduğu durumlarda yüksek değerlere ulaşır. İki çeşit konveksiyon söz konusudur: ilki rüzgâr hızının çok düşük olduğu veya hiç olmadığı durumlarda meydana gelen doğal konveksiyon, diğeri ise rüzgârın etkili olduğu durumlarda meydana gelen zorlanmış konveksiyon. Orta ve yüksek hızlarda doğal konveksiyon ihmal edilip sadece zorlanmış konveksiyon hesaba katılırken düşük rüzgâr hızlarında bunun tam tersi söz konusudur.

Hatlardaki konveksiyon kaybı, boyutsuz olan Nusselt sayısı ile ifade edilir

$$P_c = \pi . \lambda_f . (T_s - T_a) . Nu \tag{2.23}$$

Burada λ_f havanın T_f iletken yüzeyine temas eden sıcaklıktaki termal iletkenliği, T_s ve T_a iletken yüzeyi ve havanın sıcaklığı ve Nu ise Nusselt katsayısıdır. Termal iletkenlik ortan ve iletken sıcaklığına göre formül 2.24'teki gibi hesaplanır:

$$\lambda_f = 2{,}368 . 10^{-2} + 7{,}23 . 10^{-5} . T_f - 2{,}763 . 10^{-8} . T_f^2 \tag{2.24}$$

$$T_f = 0{,}5 . (T_s + T_a) \tag{2.25}$$

Doğal konveksiyon

Doğal konveksiyon rüzgâr hızının sıfır veya çok düşük olduğu durumlarda önem kazanır ve hesaba katılır. Rüzgâr hızının olmadığı durumda Nusselt katsayısı şu formül ile hesaplanır:

$$Nu_{nat} = A . (G_r . P_r)^m \tag{2.26}$$

Burada G_r boyutsuz Grashof sayısını, P_r boyutsuz Prandtl sayısını, A ve m ise katsayılardır. Bu katsayılar Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2.9: Doğal konveksiyon katsayıları.

$G_r.P_r$ aralığı	A	m
10^{-1}-10^{2}	1.02	0.148
10^{2}-10^{4}	0.850	0.188
10^{4}-10^{7}	0.480	0.250
10^{7}-10^{12}	0.125	0.333

İletkenin yatay düzlemden eğimi β doğal konvektif soğumayı azaltır. Bu yüzden Nusselt katsayısının iletkenin yatay pozisyon (Nu_o) ile eğimli durum (Nu_β) arasındaki oranını belirtmek gerekir. Formül 2.27 ve 2.28 kullanılarak iletken tipine göre bu oranlar hesaplanabilir.

$$\frac{Nu_\beta}{Nu_0} = 1 - 1{,}58.10^{-4}.\beta^{1.5} \; tekil\ iletken\ için\ \beta < 60^o \tag{2.27}$$

$$\frac{Nu_\beta}{Nu_0} = 1 - 1{,}76.10^{-6}.\beta^{2.5} \; çok\ telli\ iletken\ için\ \beta < 80^o \tag{2.28}$$

Zorlanmış konveksiyon

Rüzgârın olduğu durumlarda konvektif soğuma hesabı yaparken doğal durumdan farklı formüller kullanılır. Yapılan araştırmalara göre Nusselt katsayısı ile Reynolds katsayısı arasında, içerisinde rüzgâr hızının (v), iletken çapının (D) ve iletken yüzey sıcaklığındaki (T_f) havanın kinetik viskozitenin (v_f) de olduğu bir ilişki olduğu ortaya konmuştur. Bu ilişkiye göre Reynolds katsayısı

$$R_e = v.{}^{D}/_{v_f} \tag{2.29}$$

Şeklinde hesaplanır. Havanın kinetik viskozitesi, deniz düzeyinden yükseldikçe değişir ve şu formül ile hesaplanır:

$$v_f = \mu_f/\gamma \tag{2.30}$$

Burada γ havanın yoğunluğu ve μ_f havanın dinamik viskozitesidir. Havanın dinamik viskozitesi

$$\mu_f = \left(17{,}239 + 4{,}635.10^{-2}.T_f - 2{,}03.10^{-5}.T_f^2\right).10^{-6} \tag{2.31}$$

İle hesaplanır. Burada T_f bulunduğu yükseklikteki iletken yüzeyindeki sıcaklıktır. Havanın yoğunluğu ise yükseklik ve sıcaklık ile değiştiği için y yükseklik olmak üzere formül 2.32 ile ifade edilir:

$$\gamma = \frac{1{,}293 + 1{,}525.10^{-4}.y - 6{,}379.10^{-9}.y^2}{1 + 0{,}00367.T_f} \tag{2.32}$$

Yukarıdaki formüller sadece rüzgârın iletkene dik bir şekilde geldiği zaman geçerlidir. Fakat çoğu zaman bu durum geçerli değildir ve rüzgârın yönü zorlanmış konvekif soğumada büyük önem taşır. Bu yüzden zorlanmış konveksiyonda rüzgâr yönüne göre Nusselt katsayısının değerini hesaplama gerekir. Bu yüzden rüzgârın iletkene dik estiği durum (Nu_δ) ile açı yaparak estiği durum (Nu_{90}) arasındaki oranların hesaplanması gerekir.

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{90}} = \left(sin^2(\delta) + 0{,}0169.cos^2(\delta)\right)^{0.225}, tekil\ iletken\ için \tag{2.33}$$

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{90}} = 0{,}42 + 0{,}68.\left(sin(\delta)\right)^{1.08}, çok\ telli\ iletken\ için\ \delta \leq 24^o \tag{2.34}$$

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{90}} = 0{,}42 + 0{,}58.\left(sin(\delta)\right)^{0.90}, çok\ telli\ iletken\ için\ \delta > 24^o \tag{2.35}$$

Radyasyona bağlı soğuma

İletkendeki radyasyona (ışımaya) bağlı ısı kaybı, iletken yüzeyinden yayılan toplam radyasyon enerjisidir. İki bileşeni bulunmaktadır. Bunlar toprağa yayılan ısıl radyasyon ve havaya yayılan radyasyon. Stefan-Boltzmann yasası gereği iletken yüzeyinden yayılan radyasyon kaybı:

$$\begin{aligned} P_r = {} & \pi.D.\sigma_B.\digamma_{c-g}.\varepsilon_s.\left[(T_s + 273)^4 - \left(T_g + 273\right)^4\right] \\ & + \pi.D.\sigma_B.\digamma_{c-sky}.\varepsilon_s.\left[(T_s + 273)^4 - \left(T_{sky} + 273\right)^4\right] \end{aligned} \tag{2.36}$$

İle hesaplanır. Burada D m cinsinden iletkenin en dış çapı, σ_B Stefan-Boltzmann katsayısı, ε_s iletken yüzeyinin ışıma katsayısı, T_s yüzey sıcaklığı, T_g iletkenin altındaki toprağın sıcaklığı, T_{sky} iletkenin üstündeki havanın sıcaklığı, $\digamma_{c-g}$ radyasyon enerjisinin toprağa yayılan parçası ve $\digamma_{c-sky}$ ise bu enerjinin havaya yayılan parçasıdır.

Genellikle hesaplamalarda iletkenin altındaki ve üstündeki sıcaklıklar ortam sıcaklığı olarak alınabilir. Bu durumda formül şu hale gelir:

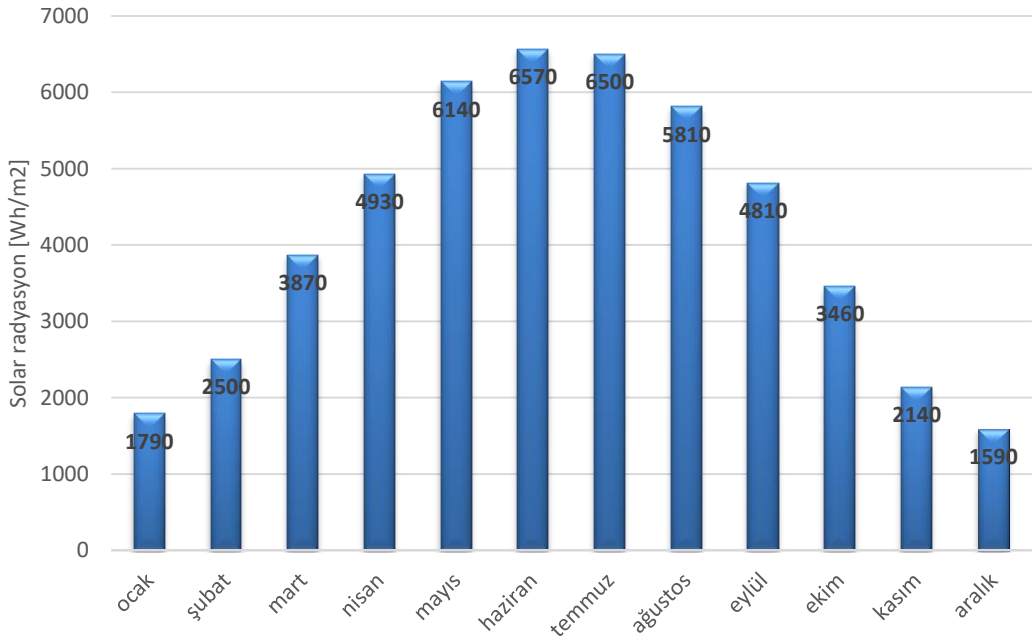
$$P_r = \pi . D . \sigma_B . \varepsilon_s . \left(\mathcal{F}_{c-g} + \mathcal{F}_{c-sky}\right)[(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \qquad (2.37)$$

Toprağa ve havaya yayılan radyasyon enerjilerinin toplamı 1 olduğu için formül daha da basitleşebilir.

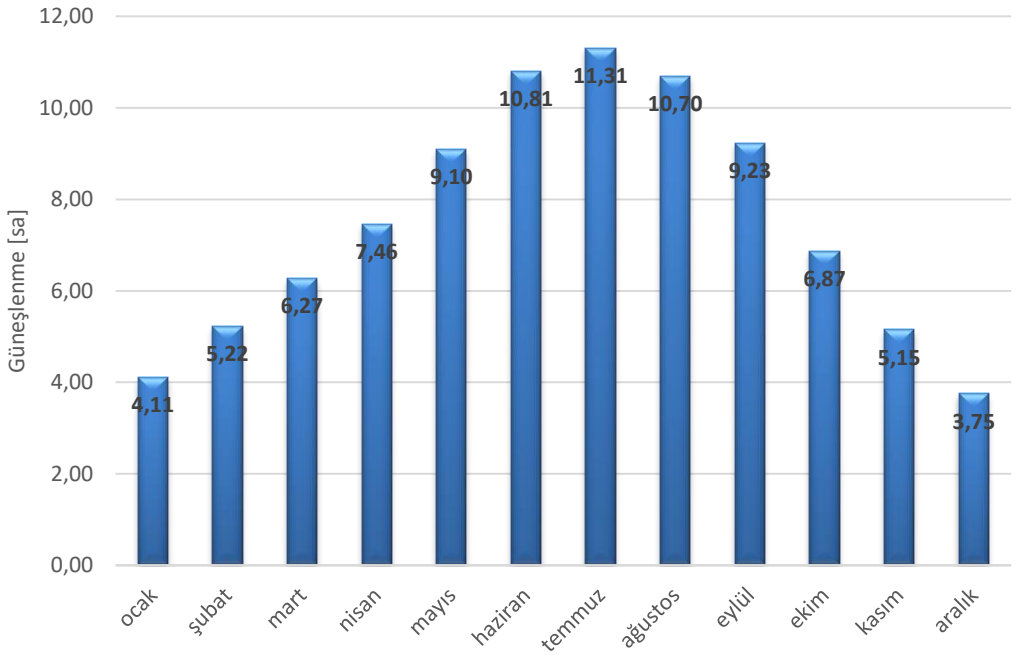
$$P_r = \pi . D . \sigma_B . \varepsilon_s . [(T_s + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \qquad (2.38)$$

İletken yüzeyinin ışıma katsayısı eskime ve deformasyon ile artar. Yeni iletkenlerde bu değer 0.2-0.3 arasında iken iki yıllık iletkenlerde 0.8-0.9 seviyelerine ulaşabilir **[91]**.

Bütün bu bilgiler eşiğinde iletkendeki gerilim düşümleri ve kayıplar tekrardan hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda önceki bölümlerde kullanılan aynı aylık yük eğrisi kullanılmıştır. Bunun yanında Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'de verilmiş olan ve yük eğrisinin alındığı yıla ilişkin yıllık ortalama radyasyon (Wh/m^2) ve güneşlenme değerleri hesaba katılmıştır **[92].**



Şekil 2.6: Aylara göre güneş ışıması.



Şekil 2.7: Aylara göre güneşlenme değerleri.

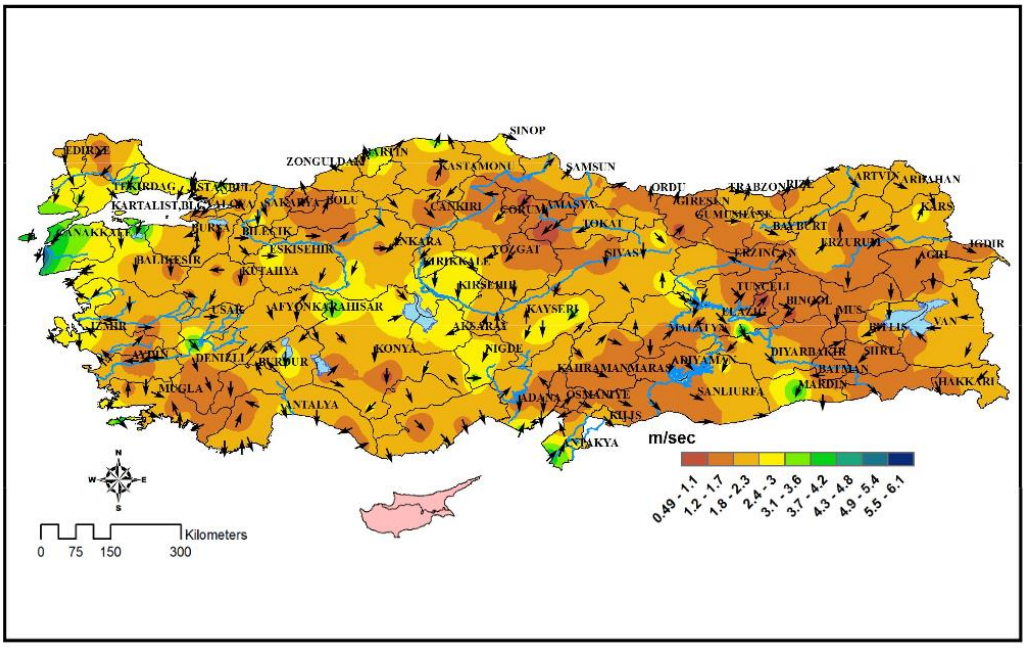
İletkenlerin ısınma hesaplarına bakıldığında radyasyon değerleri Wh/m^2 olarak verildiği için, meteorolojiden alınan değerler ve ortalama güneşlenme değerlerinden istenilen birime çevrilip kullanılmıştır. Bu değerlerin toplu gösterimleri Çizelge 2.10'da görülmektedir. Çizelgede hesaplanan değerlere göre hesaplarda güneş ışıması yıllık ortalama olan 538.09 W/m^2 olarak alınıp kullanılmıştır.

Çizelge 2.10: Hesaplanmış aylara göre güneş ışıması değerleri.

Ay	Radyasyon degeri [Wh/m^2]	Güneşlenme [sa]	Radyasyon [W/m2]
Ocak	1790	4,11	435,52
Şubat	2500	5,22	478,93
Mart	3870	6,27	617,22
Nisan	4930	7,46	660,86
Mayıs	6140	9,10	674,73
Haziran	6570	10,81	607,77
Temmuz	6500	11,31	574,71
Ağustos	5810	10,70	542,99
Eylül	4810	9,23	521,13
Ekim	3460	6,87	503,64
Kasım	2140	5,15	415,53
Aralık	1590	3,75	424,00
Ocak	1790	4,11	435,52
ort.	**4175.83**	**7.5**	**538.09**

İletim hatlarındaki ısınmayı belirleyen bir diğer önemli parametre rüzgâr hızıdır. Türkiye gibi geniş bir coğrafyada rüzgâr hızları bölgesel olarak değişmektedir. Şekil

2.8'de Türkiye için verilmiş 2018 yılı rüzgâr haritası görülmektedir. Ayrıca meteorolojiden alınan bilgilere göre Türkiye'deki ortalama rüzgâr hızı yaklaşık 2 m/s olmaktadır [93].



Şekil 2.8: Türkiye için 2018 yılı rüzgâr haritası.

Elde edilmiş güneşlenme, güneş ışıması ve rüzgâr hızları kullanılarak tasarım olarak seçilmiş üç DC iletim konfigürasyonu için, kayıp ve gerilim düşümü hesapları tekrardan yapılmıştır. Yapılmış hesapların sonuçları Çizelge 2.12, Çizelge 2.13, Çizelge 2.14 ve Çizelge 2.15'te verilmiştir. Ayrıca Çizelge 2.11'de günlük yük eğrisi ve buna bağlı ısınmalar dikkate alındığında, gerilim düşümü ve kayıpların değişim oranları verilmiştir. Bu çizelgeye göre, yeni nesil iletkenlerde sıcaklığa bağlı artış oranları daha düşük olmaktadır.

Çizelge 2.11: Hat ısınmasına göre kayıp ve gerilim düşümü değişimleri [%].

	4x 1272 MCM				3x 1272 MCM				3x 954 MCM			
	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC
500 kV'da Kayıp artış [%]	4,48	5,59	5,59	4,46	6,27	7,61	7,61	6,26	7,49	9,79	9,79	8,06
600 kV'da Kayıp artış [%]	3,77	4,7	4,7	3,59	5,15	6,22	6,22	4,97	5,83	7,63	7,63	6,13
500 kV'da gerilim düşümü artış [%]	5,35	6,55	6,55	5,1	6,24	8,01	8,01	6,9	7,16	10,02	10,02	7,82
600 kV'da gerilim düşümü artış [%]	2,74	4,89	4,89	3,25	5,38	5,55	5,55	5,11	5,35	6,68	6,98	6,25

Çizelge 2.12: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (500 kV için).

	Joule Kaybı [MW]											
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
Saat	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC	AAC	ACSR	ACSR/TW	AAAC
1	140,1	122,2	122,2	137,4	190,0	165,9	165,9	186,3	226,1	227,0	227,0	250,1
2	123,2	107,5	107,5	120,8	167,2	146,0	146,0	163,9	198,9	199,7	199,7	219,9
3	113,9	99,3	99,3	111,7	154,4	134,9	134,9	151,4	183,8	184,6	184,6	203,3
4	109,9	95,9	95,9	107,7	149,1	130,2	130,2	146,1	177,4	178,2	178,2	196,1
5	109,3	95,2	95,2	107,1	148,1	129,5	129,5	145,3	176,4	177,1	177,1	195,0
6	111,4	97,1	97,1	109,2	151,1	132,0	132,0	148,1	179,8	180,6	180,6	198,8
7	122,2	106,5	106,5	119,8	165,8	144,8	144,8	162,5	197,2	198,1	198,1	218,1
8	141,0	123,0	123,0	138,2	191,3	167,1	167,1	187,4	227,6	228,6	228,6	251,7
9	185,8	162,0	162,0	182,1	251,9	220,1	220,1	246,9	299,7	301,0	301,0	331,4
10	222,4	194,0	194,0	218,0	301,6	263,5	263,5	295,7	358,9	360,6	360,6	396,9
11	231,6	202,0	202,0	227,1	314,2	274,5	274,5	308,0	373,9	375,5	375,5	413,4
12	239,8	209,1	209,1	235,0	325,2	284,1	284,1	318,8	387,0	388,7	388,7	427,9
13	217,2	189,4	189,4	212,9	294,6	257,3	257,3	288,8	350,5	352,1	352,1	387,6
14	212,2	185,0	185,0	208,0	287,7	251,4	251,4	282,0	342,4	343,9	343,9	378,6
15	215,6	188,0	188,0	211,3	292,3	255,5	255,5	286,7	347,9	349,5	349,5	384,8
16	218,7	190,7	190,7	214,4	296,6	259,1	259,1	290,7	352,9	354,5	354,5	390,3
17	221,1	192,7	192,7	216,7	299,8	261,9	261,9	293,9	356,8	358,4	358,4	394,5
18	224,9	196,2	196,2	220,5	305,1	266,5	266,5	299,1	363,1	364,7	364,7	401,6
19	224,3	195,7	195,7	219,9	304,3	265,8	265,8	298,3	362,0	363,6	363,6	400,4
20	211,0	184,0	184,0	206,9	286,3	250,1	250,1	280,6	340,6	342,1	342,1	376,7
21	201,2	175,5	175,5	197,2	272,9	238,5	238,5	267,6	324,7	326,2	326,2	359,2
22	191,8	167,3	167,3	188,0	260,1	227,3	227,3	255,0	309,6	310,9	310,9	342,3
23	184,4	160,8	160,8	180,8	250,2	218,6	218,6	245,2	297,6	299,0	299,0	329,2
24	168,9	147,3	147,3	165,6	229,1	200,2	200,2	224,6	272,7	273,8	273,8	301,5

Çizelge 2.13: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış hat kayıpları (600 kV için).

Joule Kaybı [MW]												
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
Saat	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
1	96,6	84,1	84,1	94,6	130,5	113,8	113,8	127,7	154,6	154,6	154,6	170,6
2	85,0	74,0	74,0	83,2	114,8	100,1	100,1	112,4	136,0	135,9	135,9	150,0
3	78,6	68,4	68,4	76,9	106,1	92,5	92,5	103,9	125,6	125,7	125,7	138,6
4	75,9	66,0	66,0	74,2	102,4	89,2	89,2	100,2	121,3	121,3	121,3	133,8
5	75,3	65,6	65,6	73,8	101,8	88,7	88,7	99,6	120,5	120,5	120,5	133,0
6	76,8	66,9	66,9	75,2	103,8	90,5	90,5	101,6	122,9	122,9	122,9	135,6
7	84,3	73,4	73,4	82,5	113,9	99,2	99,2	111,5	134,8	134,9	134,9	148,8
8	97,2	84,7	84,7	95,2	131,4	114,5	114,5	128,6	155,6	155,6	155,6	171,6
9	128,1	111,5	111,5	125,3	173,1	150,8	150,8	169,4	204,9	204,9	204,9	226,1
10	153,4	133,5	133,5	150,1	207,3	180,7	180,7	202,8	245,4	245,4	245,4	270,7
11	159,8	139,1	139,1	156,4	215,9	188,1	188,1	211,3	255,6	255,6	255,6	282,0
12	165,4	144,0	144,0	161,9	223,4	194,7	194,7	218,7	264,6	264,6	264,6	291,9
13	149,8	130,5	130,5	146,6	202,4	176,4	176,4	198,1	239,7	239,7	239,7	264,4
14	146,3	127,4	127,4	143,2	197,7	172,3	172,3	193,5	234,1	234,1	234,1	258,2
15	148,7	129,4	129,4	145,5	200,9	175,1	175,1	196,6	237,9	237,9	237,9	262,5
16	150,9	131,3	131,3	147,6	203,8	177,6	177,6	199,4	241,3	241,3	241,3	266,2
17	152,4	132,8	132,8	149,3	206,0	179,5	179,5	201,6	243,9	243,9	243,9	269,0
18	155,1	135,1	135,1	151,9	209,7	182,7	182,7	205,2	248,3	248,3	248,3	273,8
19	154,7	134,7	134,7	151,4	209,0	182,2	182,2	204,6	247,5	247,5	247,5	273,1
20	145,6	126,7	126,7	142,5	196,7	171,4	171,4	192,5	232,9	232,9	232,9	256,9
21	138,8	120,8	120,8	135,8	187,5	163,5	163,5	183,6	222,0	222,0	222,0	244,9
22	132,3	115,2	115,2	129,5	178,8	155,8	155,8	175,0	211,7	211,7	211,7	233,5
23	127,2	110,8	110,8	124,5	171,9	149,8	149,8	168,3	203,5	203,5	203,5	224,5
24	116,5	101,5	101,5	114,1	157,4	137,2	137,2	154,1	186,5	186,4	186,4	205,7

Çizelge 2.14: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümleri (500 kV).

	% Gerilim Düşümü											
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
Saat	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
1	6,1	5,3	5,3	6,0	8,3	7,2	7,2	8,1	9,9	9,9	9,9	10,9
2	5,8	5,0	5,0	5,7	7,8	6,8	6,8	7,7	9,2	9,4	9,4	10,2
3	5,6	4,8	4,8	5,5	7,4	6,6	6,6	7,4	8,9	8,9	8,9	9,8
4	5,5	4,8	4,8	5,4	7,3	6,5	6,5	7,3	8,7	8,8	8,8	9,6
5	5,5	4,8	4,8	5,4	7,3	6,4	6,4	7,3	8,7	8,8	8,8	9,6
6	5,5	4,8	4,8	5,4	7,4	6,5	6,5	7,3	8,8	8,8	8,8	9,7
7	5,8	5,0	5,0	5,7	7,8	6,8	6,8	7,6	9,2	9,2	9,2	10,1
8	6,2	5,4	5,4	6,1	8,3	7,2	7,2	8,2	9,9	9,9	9,9	10,9
9	7,1	6,2	6,2	6,9	9,6	8,3	8,3	9,4	11,4	11,4	11,4	12,5
10	7,8	6,8	6,8	7,6	10,4	9,2	9,2	10,3	12,4	12,5	12,5	13,7
11	7,9	6,9	6,9	7,8	10,6	9,3	9,3	10,5	12,6	12,8	12,8	14,0
12	8,1	7,0	7,0	7,9	10,8	9,5	9,5	10,7	12,9	13,0	13,0	14,2
13	7,7	6,7	6,7	7,5	10,3	9,1	9,1	10,2	12,2	12,3	12,3	13,6
14	7,6	6,6	6,6	7,5	10,2	9,0	9,0	10,0	12,1	12,2	12,2	13,4
15	7,7	6,7	6,7	7,5	10,3	9,0	9,0	10,2	12,2	12,3	12,3	13,5
16	7,7	6,7	6,7	7,6	10,3	9,1	9,1	10,2	12,3	12,4	12,4	13,6
17	7,7	6,7	6,7	7,6	10,4	9,1	9,1	10,3	12,3	12,4	12,4	13,7
18	7,8	6,8	6,8	7,7	10,5	9,2	9,2	10,4	12,4	12,5	12,5	13,8
19	7,8	6,8	6,8	7,7	10,5	9,2	9,2	10,4	12,4	12,5	12,5	13,8
20	7,6	6,6	6,6	7,4	10,2	9,0	9,0	10,0	12,1	12,2	12,2	13,4
21	7,4	6,4	6,4	7,3	9,9	8,7	8,7	9,8	11,8	11,9	11,9	13,0
22	7,2	6,3	6,3	7,0	9,7	8,5	8,5	9,5	11,5	11,7	11,7	12,7
23	7,1	6,2	6,2	6,9	9,5	8,3	8,3	9,4	11,3	11,3	11,3	12,5
24	6,7	5,9	5,9	6,6	9,1	8,0	8,0	9,0	10,8	10,9	10,9	12,0

Çizelge 2.15: Günlük yük eğrisine göre hesaplanmış gerilim düşümleri (600 kV).

	% Gerilim Düşümü											
	4X1272 MCM				3X1272 MCM				3X954 MCM			
Saat	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**	**AAC**	**ACSR**	**ACSR/TW**	**AAAC**
1	4,2	3,7	3,7	4,1	5,7	5,0	5,0	5,6	6,7	6,7	6,7	7,4
2	3,9	3,5	3,5	3,8	5,4	4,6	4,6	5,3	6,3	6,3	6,3	7,0
3	3,8	3,4	3,4	3,7	5,2	4,4	4,4	5,0	6,0	6,0	6,0	6,7
4	3,7	3,3	3,3	3,6	5,1	4,3	4,3	4,9	5,9	5,9	5,9	6,6
5	3,7	3,3	3,3	3,6	5,1	4,3	4,3	4,9	5,9	5,9	5,9	6,6
6	3,7	3,3	3,3	3,7	5,1	4,4	4,4	4,9	6,0	6,0	6,0	6,6
7	3,9	3,5	3,5	3,8	5,4	4,6	4,6	5,3	6,2	6,3	6,3	6,9
8	4,2	3,7	3,7	4,1	5,7	5,0	5,0	5,6	6,7	6,7	6,7	7,4
9	4,8	4,2	4,2	4,7	6,5	5,7	5,7	6,4	7,7	7,7	7,7	8,6
10	5,2	4,6	4,6	5,2	7,2	6,2	6,2	7,0	8,4	8,4	8,4	9,4
11	5,3	4,7	4,7	5,3	7,4	6,3	6,3	7,1	8,6	8,6	8,6	9,6
12	5,4	4,8	4,8	5,4	7,5	6,4	6,4	7,3	8,7	8,7	8,7	9,8
13	5,2	4,6	4,6	5,2	7,1	6,1	6,1	6,9	8,3	8,3	8,3	9,2
14	5,1	4,5	4,5	5,1	7,1	6,0	6,0	6,8	8,2	8,2	8,2	9,1
15	5,1	4,5	4,5	5,1	7,1	6,1	6,1	6,9	8,3	8,3	8,3	9,2
16	5,2	4,6	4,6	5,2	7,2	6,1	6,1	6,9	8,4	8,3	8,3	9,4
17	5,2	4,6	4,6	5,2	7,2	6,2	6,2	7,0	8,4	8,4	8,4	9,4
18	5,2	4,6	4,6	5,2	7,3	6,2	6,2	7,0	8,5	8,4	8,4	9,5
19	5,2	4,6	4,6	5,2	7,3	6,2	6,2	7,0	8,5	8,4	8,4	9,5
20	5,1	4,5	4,5	5,1	7,0	6,0	6,0	6,8	8,2	8,2	8,2	9,1
21	5,0	4,4	4,4	5,0	6,8	5,9	5,9	6,7	8,0	8,0	8,0	8,9
22	4,9	4,3	4,3	4,9	6,6	5,8	5,8	6,5	7,9	7,8	7,8	8,7
23	4,8	4,2	4,2	4,7	6,5	5,7	5,7	6,4	7,7	7,7	7,7	8,5
24	4,6	4,0	4,0	4,5	6,2	5,4	5,4	6,1	7,4	7,4	7,4	8,2

3. KORONA KAFESİ TASARIMI VE MODEL İLETKENLERİN BELİRLENMESİ

3.1 Korona Kafesi

Korona kafesi, laboratuvar ortamında iletkenlerdeki koronanın incelenmesi ve veri (akım verisi vb.) toplanması için kullanılır. Uygulanacak gerilime ve kullanılacak iletkenin özelliklerine göre bir kafes tasarımı yapmak gereklidir. Buradaki amaç, gerçek sistemde, gerilim altında iletkenlerde oluşan elektrik alan dağılımını, kafes kullanarak elde etmektir. Özellikle elektrik alan şiddetinin yüksek olduğu kritik bölgelerde, gerçek sisteme yakın alan şiddetleri elde edilebilen bir kafes kullanılırsa, deneysel sonuçlar bir o kadar gerçeğe yakın ve doğru olur. Bu yüzden uygun bir kafes tasarlamak, korona deneyleri için çok önemlidir.

Korona kafesi iki bölümden oluşur. Ortada, içerisinden iletkenlerin geçtiği, gerilim altında koronanın oluştuğu ve ölçümlerin alındığı ölçüm kısmı; kenarlarda ise kenar etkilerinin sonuçları etkilemesini önleyen ve iletken üzerindeki alanın daha düzgün olmasını sağlayan koruma elektrotları vardır. Koruma elektrotları doğrudan topraklanırken, ölçüm kısmı, yapılacak ölçüme göre uygun bir şönt direnç üzerinden veya doğrudan topraklanır. Yapılacak ölçümlerin doğruluğu, kafes içerisinde oluşan elektrik alan dağılımı ile ilgili olduğu için, ölçüm ve koruma kısımlarının boyutları (boyları ve kesitleri) uygun şekilde belirlenmelidir.

Korona kafesi tasarımında üç önemli parametre vardır. Bunlar, korona kafesi ile iç iletken arasındaki uzaklık (kafes çapı ve kesit özelliği), korona kafesinin uzunluğu (ölçüm kısmı) ve koruma elektrotlarının boyutlarıdır. Bu parametrelerin belirlenmesi için ayrı yarı kriterler göz önüne alınır.

Korona kafesi ile yapılacak olan deneylerde kafes boyutunu belirleyen en önemli etken uygulanacak gerilim (deney gerilimi) düzeyidir. Gerilim ne kadar yüksek olursa, kullanılacak olan kafesin de aynı ölçüde büyük olması gerekir. Literatüre bakıldığında, boyut bakımında korona kafesleri çeşitlilik göstermektedir. En yaygın olarak, çok ince iletkenler üzerinde koronanın kolayca incelenebildiği küçük boyutlu kafesler

kullanılmaktadır. Bu kafesler genellikle daire kesitlidir ve kafesi oluşturan gözler (mesh) çok küçük boyutludur (Şekil 3.1). Bu kafeslerde genellikle 0.1-1 mm aralığında çapa sahip iletkenlerle 100 V- 5kV arası gerilimlerde çalışılır.



Şekil 3.1: Küçük boyutlu korona kafesi örneği.

Daha yüksek gerilimlere çıkabilmek için daha büyük kafesler tasarlanır. Şekil 3.2'de deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere yapılmış farklı korona kafesleri görülmektedir. 100 kV'da deneyler yapabilmek için, 1m x 1m kare kesitli ve 1.5 m uzunlukta bir kafes kullanılmaktadır [23]. Bunun yanında 1.6m x 1.6m kesitli ve uzunluğu 4m olan bir kafes ile 300 kV deneyleri yapılmaktadır [81]. Benzer gerilim düzeyinde (300 kV) kullanılmak üzere 2m x 2m kesitli başka bir kafes daha yapılmıştır [47]. Japonya'daki açık alan (outdoor) büyük korona kafesinin boyutları 8m x 8m ve uzunluğu 24 m'dir [94]. Bu kafes ile 1200 kV gerilimde deneyler yapılmaktadır. Benzer bir kafes de Çin'de bulunmaktadır. 1200 kV deneylerinin yapıldığı bu kafes kare kesitli (8m x 8m) ve uzunluğu 70 m'dir [44].



Şekil 3.2: Büyük boyutlu korona kafesi örnekleri.

Geçmiş deneysel çalışmalarda kullanılan bu kafesler ve elektrik alan dağılımları göz önüne alınarak; öngörülen deney gerilime uygun boyutlar belirlenebilir. Yüksek deney gerilimlerinde, yapım kolaylığı ve iletkenlerin kafes içerisinde konumlandırma rahatlığı nedeniyle, kare kesitli kafesler daha avantajlıdır.

3.2 Korona Kafesi Tasarım Kriterleri

Gerçek boyutlu iletkenler ile korona deneyleri yapabilmek için, gerilim uygulandığında iletkenlerde korona oluşacak şekilde büyük kafeslerin kullanılması gereklidir. Korona kafesinin; hem istenilen düzeyde korona oluşmasına izin verecek, hem iletken ile kafes arasında atlama olmasına izin vermeyecek, hem de ölçüm sonuçlarının yeterince doğru ve hassas olmasını sağlayacak boyutlarda tasarlanması önemlidir. Burada öne çıkan üç tasarım parametresi vardır. Bunlar, korona kafesi ile iletken arasındaki uzaklık, korona kafesinin uzunluğu ve koruma elektrotlarının uzunluğudur. Bu üç bölüm kendi içerisinde bir takım tasarım kriterleri barındırır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

Korona kafesi ile iletken arasındaki uzaklık:

- Mesafe, gerilim altındaki iletkenden, topraklı kafese atlama olmayacak şekilde belirlenmelidir.
- Mesafe, havadaki atlama geriliminin, korona başlangıç geriliminin en az %50 üzerinde olacak şekilde belirlenmelidir.
- Kafes çapı veya kenar uzunluğu, öngörülen gerilimde iletken üzerinde korona oluşmasını sağlayacak kadar küçük olmalıdır.

Korona kafesinin uzunluğu:

- Radyo girişimi ölçümleri için, kafes uzunluğu, iletken ile kafes arasındaki uzaklığın 10 katı veya daha büyükse, ölçüm hataları ihmal edilebilecek seviyede küçük olur [95].
- Küçük kafeslerde bu oran, 3-5 kat olabilir.

Koruma elektrotlarının uzunluğu:

- Sonlu elemanlar analizi yapılarak belirlenir.

- İletken üzerindeki elektrik alan şiddeti, ölçme kısmında olabildiğince düzgün olacak şekilde uzun seçilir.
- Gerilmiş iletkenin sehim yapmaması, kafes deneylerinde önemlidir.

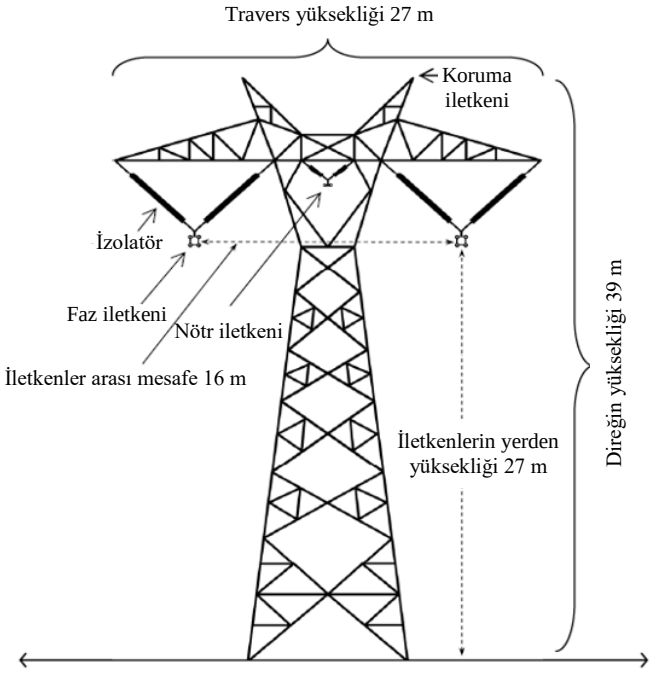
Deneylerde kullanılacak iletken çapı/çapları belirlendikten sonra, uygulanacak gerilim ve seçilen iletkenlere göre kafesin kesiti belirlenir. Daha sonra bu kesite uygun ölçme kısmının uzunluğu belirlenir ve son olarak iletken yüzeyindeki elektrik alan şiddetinin düzgünlüğüne göre de koruma elektrotlarının uzunlukları belirlenir. Eğer deneylerde demet iletken yapısı kullanılacak ise, sonlu elemanlar analizleri yapılarak alan şiddetleri bulunmalı ve tasarım kriteri olarak hesaplanan maksimum alan şiddetleri kullanılmalıdır.

3.3 Korona Kafesi Tasarımı

Korona kafes tasarımı iki bölümden oluşur. İlk önce deneysel çalışma yapılacak olan sistemin gerçek davranışının, yani gerilim altındaki elektrik alan dağılımının ve özellikle maksimum alan şiddetinin bulunması gerekir. Bunun için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır.

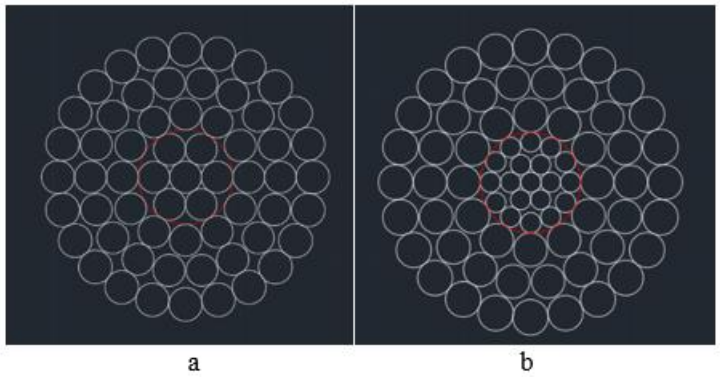
Deneylerde üç farklı iletken yapısı ve konfigürasyonu kullanılacaktır. Bu yapılar seçilme nedenleri ile birlikte bir önceki bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştı. Gerçek sistem iki kutuplu olarak tasarlanacağı için, alan şiddetlerinin de iki kutuplu HVDC sistem modeli kullanılarak yapılması gereklidir. Burada iletkenlerin bağlı bulunduğu iletim hattı direği referans alınarak, iletkenlerin birbirine, koruma teline ve toprağa olan uzaklıkları belirlenir.

Şekil 3.3'te 500 ve 600 kV gerilim düzeylerinde kullanılacak iki kutuplu sistem için seçilmiş olan iletim hattı direği görülmektedir. Direğin toplam yüksekliği 39 m ve iletkenlerin toprağa olan uzaklığı de 27 m'dir. İletkenler birbirinden 16 m uzaklıkta konumlandırılmışlardır. Koruma iletkenleri ise faz iletkenlerinin 12 m üstünde yer almaktadır.



Şekil 3.3: 500-600 kV HVDC iletim hattı direği.

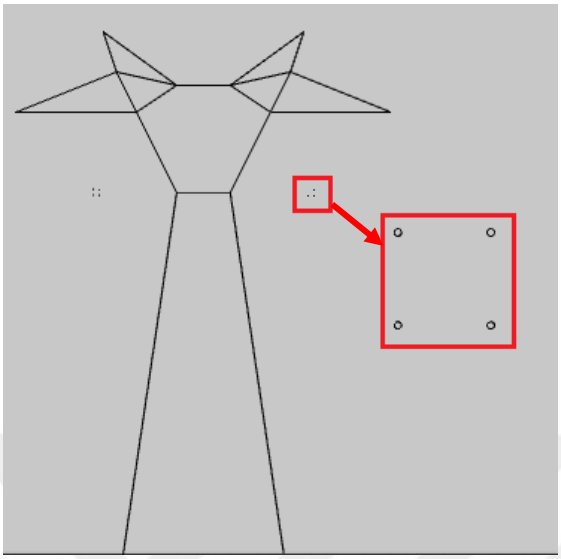
1272 MCM ve 954 MCM iletkenler sırası ile 35 ve 31 mm çapa sahiplerdir. Şekil 3.4'te HVDC iletim hatlarında kullanılan 954 MCM ve 1272 MCM ACSR iletkenlerin model çizimleri görülmektedir. Üçlü ve dörtlü demet şeklide kullanılan, çok telli (stranded) yapıdaki bu iletkenler arasındaki uzaklık (demet açıklığı) 45 cm'dir. Bu durumda iletken üzerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddeti sonlu elemanlar analizi yapılarak belirlenir.



Şekil 3.4: Gerçek sistem iletkenleri a) 954 MCM, b) 1272 MCM.

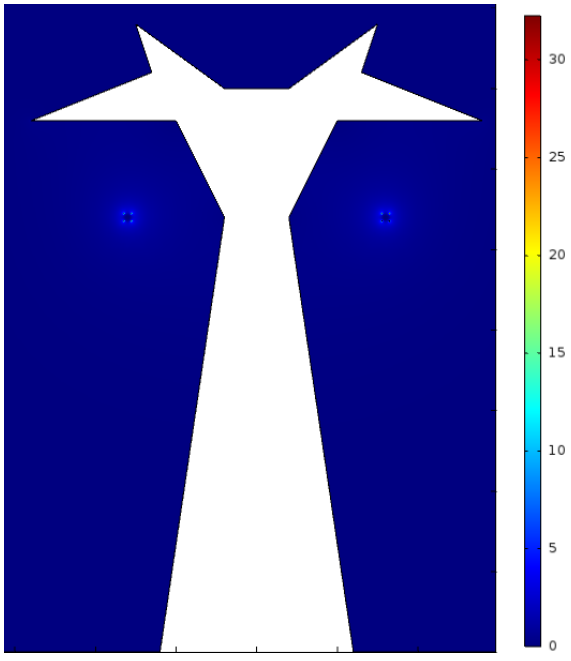
Bu gerçek verilerle kurulmuş sonlu elemanlar modeli Şekil 3.5'te görülmektedir. İki kutuplu sistemde sonlu elemanlar analizi, üç farklı iletken konfigürasyonu için, farklı gerilimlerde gerçekleştirilmiştir. 100 kV'dan başlayarak, 100 kV artımlarla 600 kV değerine kadar analizler yapılarak gerçek sistemde oluşan statik elektrik alan dağılımı belirlenmiştir. İletken üzerinde oluşan en yüksek elektrik alan şiddeti değeri, gerçek

sistemde oluşan maksimum alan şiddeti değeri olarak alınmıştır. Analizlerin doğruluğu açısından bütün benzetimlerde aynı ağ yapısı ve sayısı korunmuş ve sınır koşulları gerilim dışında değiştirilmemiştir.



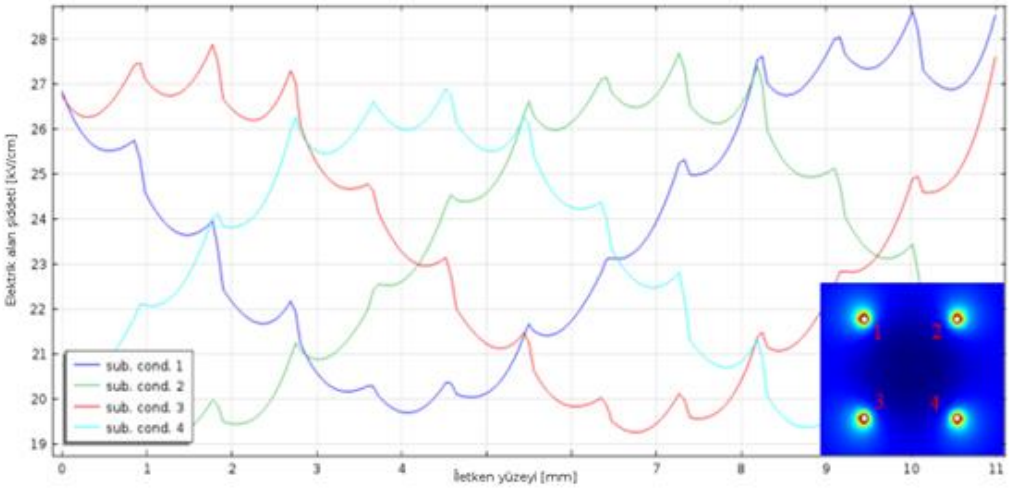
Şekil 3.5: İki kutuplu HVDC sistemin sonlu elemanlar model geometrisi.

1272 MCM 4'lü demet (4x1272 MCM) iletken yapısı için 600 kV gerilimde yapılan analiz sonucu elde edilen elektrik alan dağılımları Şekil 3.6'da görülmektedir. 4'lü demette her bir iletkenin çevresindeki elektrik alan dağılımı değişim göstermektedir. Bu değerlerden en büyüğü, bu yapı için maksimum elektrik alan şiddeti olarak kabul edilmiştir.



a

Şekil 3.6: İki kutuplu HVDC sistemin elektrik alan dağılımı.



b

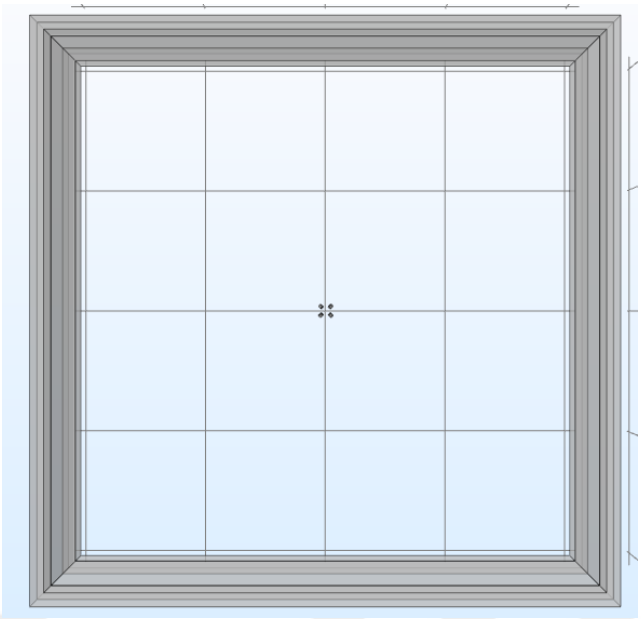
Şekil 3.6 (devam): İki kutuplu HVDC sistemin elektrik alan dağılımı a) genel dağılım, b) iletken çevresi boyunca dağılım.

Diğer iletkenler için de aynı analizler yapılıp elektrik alan şiddetleri elde edilmiş ve sonuçlar Çizelge 3.1'de gösterilmiştir. Beklendiği gibi, alan şiddetleri, küçük çaplı iletkenlerde ve demet sayısı az olan yapılarda daha yüksek olmaktadır.

Çizelge 3.1: İki kutuplu sistemde iletken çevresinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetleri.

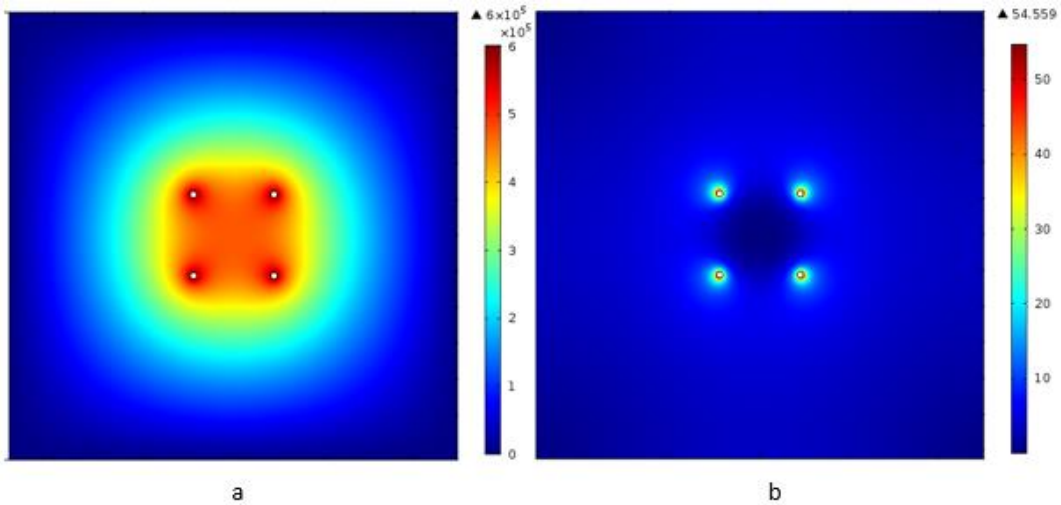
	Maksimum elektrik alan şiddeti [kV/cm]		
Gerilim [kV]	**4x1272 mcm**	**3x1272 mcm**	**3x954 mcm**
100	4,68	5,47	6,37
200	9,35	10,94	12,74
300	14,03	16,42	19,11
400	18,70	21,89	25,48
500	**23,38**	**27,36**	**31,85**
600	**28,05**	**32,83**	**38,22**

Referans elektrik alan şiddeti değerleri elde edildikten sonra, kafes boyutlandırılması ve kafeste elde edilebilecek elektrik alan şiddetlerinin hesaplarının yapılması gereklidir. Bunun için, ilk önce üç tasarım öngörülmüş ve incelenmiştir. Kafesler kare kesitli olacak şekilde tasarlanmış ve kenar uzunlukları sırasıyla 2.5 m, 3 m ve 3.5 m'dir. Bu yapının içerisinde, gerçek sistemde kullanılacak iletkenler tam ortaya yerleştirilip deneyleri yapılacağı için, oluşturulan modelde de bu şekilde iletkenler ortaya yerleştirilmiştir. Yapılan kafes tasarımlarından birinin geometrisi ve iletken yerleşimi 2-boyutlu olarak Şekil 3.7'de görülmektedir. Burada iletkenlerin gerilmesinde oluşabilecek sehim durumu ihmal edilmiş ve ideal durum göz önüne alınmıştır.



Şekil 3.7: Korona kafesi ve iletkenlerin sonlu elemanlar model geometrisi.

Gerilim altındaki iletkenlerle, topraklı kafes arasında oluşan elektrik alan dağılımı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve maksimum elektrik alan şiddetleri elde edilmiştir. Şekil 3.8'de kafes içerisindeki iletkenlerde oluşan potansiyel ve elektrik alan dağılımı görülmektedir. Elde edilen benzetim sonuçları gerçek sistem benzetimleri ile benzerlik göstermektedir.



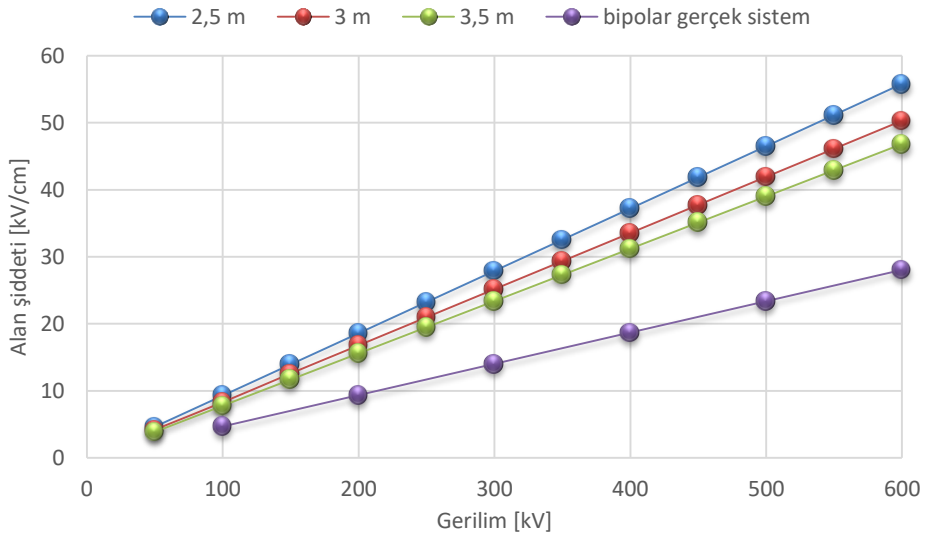
Şekil 3.8: Korona kafesi ve iletkenlerin sonlu elemanlar analizi a) Potansiyel dağılımı b) Elektrik alan dağılımı.

Her üç iletken konfigürasyonu için, farklı gerilim değerlerinde hesaplanmış alan maksimum alan şiddetleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Korona kafesi kullanılarak elde edilen maksimum elektrik alan şiddetleri.

	Maksimum elektrik alan şiddeti [kV/cm]								
	2,5 m'lik kafes			3 m'lik kafes			3,5 m'lik kafes		
Gerilim [kV]	4x1272 MCM	3x1272 MCM	3x954 MCM	4x1272 MCM	3x1272 MCM	3x954 MCM	4x1272 MCM	3x1272 MCM	3x954 MCM
50	4,6	5,0	5,7	4,2	4,7	5,3	3,9	4,4	5,0
100	9,3	10,1	11,4	8,3	9,3	10,5	7,8	8,7	9,9
150	13,9	15,1	17,2	12,6	14,0	15,8	11,7	13,0	14,9
200	18,6	20,2	22,9	16,8	18,6	21,0	15,6	17,4	19,8
250	23,2	25,2	28,6	21,0	23,3	26,3	19,5	21,7	24,8
300	27,9	30,3	34,3	25,2	27,9	31,6	23,4	26,1	29,7
350	32,5	35,2	40,0	29,3	32,6	36,8	27,3	30,4	34,7
400	37,2	40,4	45,8	33,5	37,2	42,1	31,2	34,8	39,7
450	41,8	45,4	51,5	37,7	41,9	47,4	35,1	39,1	44,6
500	46,5	50,5	57,2	41,9	46,5	52,6	39,0	43,5	49,6
550	51,1	55,5	62,9	46,1	51,2	57,9	42,9	47,8	54,5
600	55,8	60,6	68,7	50,3	55,8	63,1	46,8	52,2	59,5

Kafes ve gerçek sistem benzetimleri ile hesaplanan maksimum elektrik alan şiddetleri karşılaştırıldığında (Şekil 3.9), bu boyutlarda bir kafes ile aynı gerilimlerde, aynı değerlerin değerlerinin sağlanamadığı görülmüştür. Bu nedenle, daha büyük boyutlu kafesler için benzetimler yapılarak, gerçek sistem sonuçları ile uyumun sağlandığı boyutlar belirlenmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.9: Korona kafesinde elde edilen elektrik alan şiddetleri (4x1272 MCM).

Çizelge 3.3'te farklı kenar uzunluklarına sahip korona kafes tasarımları için elde edilmiş maksimum elektrik alan şiddeti değerleri görülmektedir. Çizelgeye göre,

gerçek sistem durumunu temsil edebilmek için 15 m kenar uzunluğuna sahip bir korona kafesinin gerekli olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.3: Farklı boyutlarda korona kafeslerinde elde edilmiş elektrik alan şiddetleri.

Maksimum elektrik alan şiddeti [kV/cm]												
	4 m'lik kafes			6 m'lik kafes			8 m'lik kafes			15 m'lik kafes		
Gerilim [kV]	**4x1272 MCM**	**3x1272 MCM**	**3x954 MCM**	**4x1272 MCM**	**3x1272 MCM**	**3x954 MCM**	**4x1272 MCM**	**3x1272 MCM**	**3x954 MCM**	**4x1272 MCM**	**3x1272 MCM**	**3x954 MCM**
50	3,7	4,1	4,7	3,1	3,6	4,1	2,8	3,3	3,8	2,3	2,8	3,2
100	7,4	8,3	9,5	6,3	7,2	8,2	5,6	6,6	7,5	4,7	5,6	6,4
150	11,1	12,4	14,2	9,4	10,8	12,3	8,4	9,9	11,3	7,0	8,4	9,6
200	14,8	16,5	19,0	12,5	14,4	16,4	11,3	13,2	15,0	9,3	11,2	12,7
250	18,4	20,7	23,7	15,7	18,0	20,5	14,1	16,5	18,8	11,6	13,9	15,9
300	22,1	24,8	28,5	18,8	21,6	24,6	16,9	19,8	22,5	14,0	16,7	19,1
350	25,8	28,9	33,2	21,9	25,2	28,7	19,7	23,1	26,3	16,3	19,5	22,3
400	29,5	33,0	38,0	25,0	28,8	32,8	22,5	26,3	30,1	18,6	22,3	25,5
450	33,2	37,2	42,7	28,2	32,4	36,9	25,3	29,6	33,8	20,9	25,1	28,7
500	36,9	41,3	47,5	31,3	36,0	41,0	28,1	32,9	37,6	**23,3**	**27,9**	**31,9**
550	40,6	45,4	52,2	34,4	39,6	45,0	30,9	36,2	41,3	25,6	30,7	35,1
600	44,3	49,6	57,0	37,6	43,2	49,1	33,8	39,5	45,1	**27,9**	**33,5**	**38,2**

Laboratuvar ölçüleri de göz önüne alındığında, bu tasarımın uygulama açısından mümkün olmadığı görülmektedir. Korona kafesinde gerçek iletkenlere, gerçek sistem gerilimlerini uygulayıp aynı elektrik alan şiddetlerini elde edebilmek için, kafes boyutunun çok büyük olması gerekir (4x1272 MCM iletken ve ± 600 kV gerilim için 15m x 15m). Pratikte çok uygun olmayan bu kafes boyutu yerine, daha küçük gerilimlerde aynı elektrik alan şiddetini verecek şekilde daha küçük boyutlu kafes kullanmak gerekir. Bu nedenle daha küçük bir kafeste, küçültülmüş (ölçeklendirilmiş-scaled) iletkenlerle çalışmanın uygun olacağına karar verilmiştir.

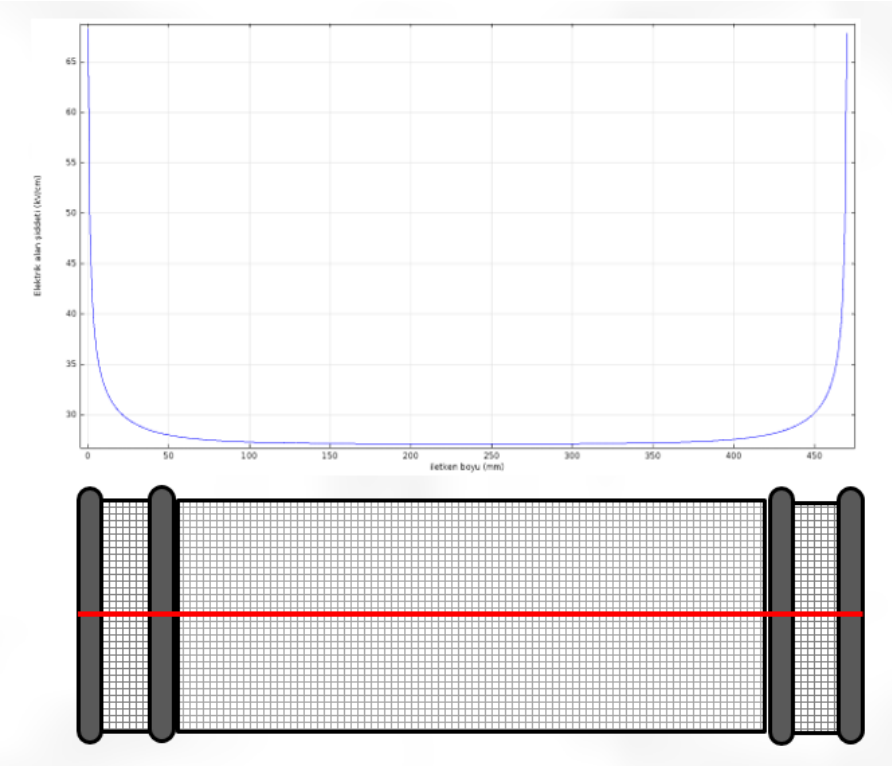
Laboratuvar boyutları, kullanılacak olan iletken çapları ve demet iletken sayıları göz önüne alındığında, kare kesitli ve her bir kenarı 2 m olan bir kafes yapısının deneylerde kullanılmasının uygun olduğu sonucunun varılmıştır. Bu kafes çapı, hem gerçek iletkenler ile daha düşük gerilimlerde çalışma olanağı sağlayacak, hem de boyutları nedeniyle laboratuvarda gereksiz yer kaplamayacaktır.

Kafesin ölçme kısmının uzunluğu, kullanılacak iletkenin kafese olan uzaklığına göre belirlenmektedir. 4x1272 MCM iletken kullanılması durumunda demet açıklığı 45 cm olacağından, iletken ile kafes arasındaki uzaklık 77.5 cm olmaktadır. Bu uzaklığın beş katından fazlası kafes boyu olarak uygun olacağından tasarlanan kafesin ölçme kısmının boyu 4 m olarak belirlenmiştir.

3.4 Koruma Elektrodu Boyutlarının Belirlenmesi

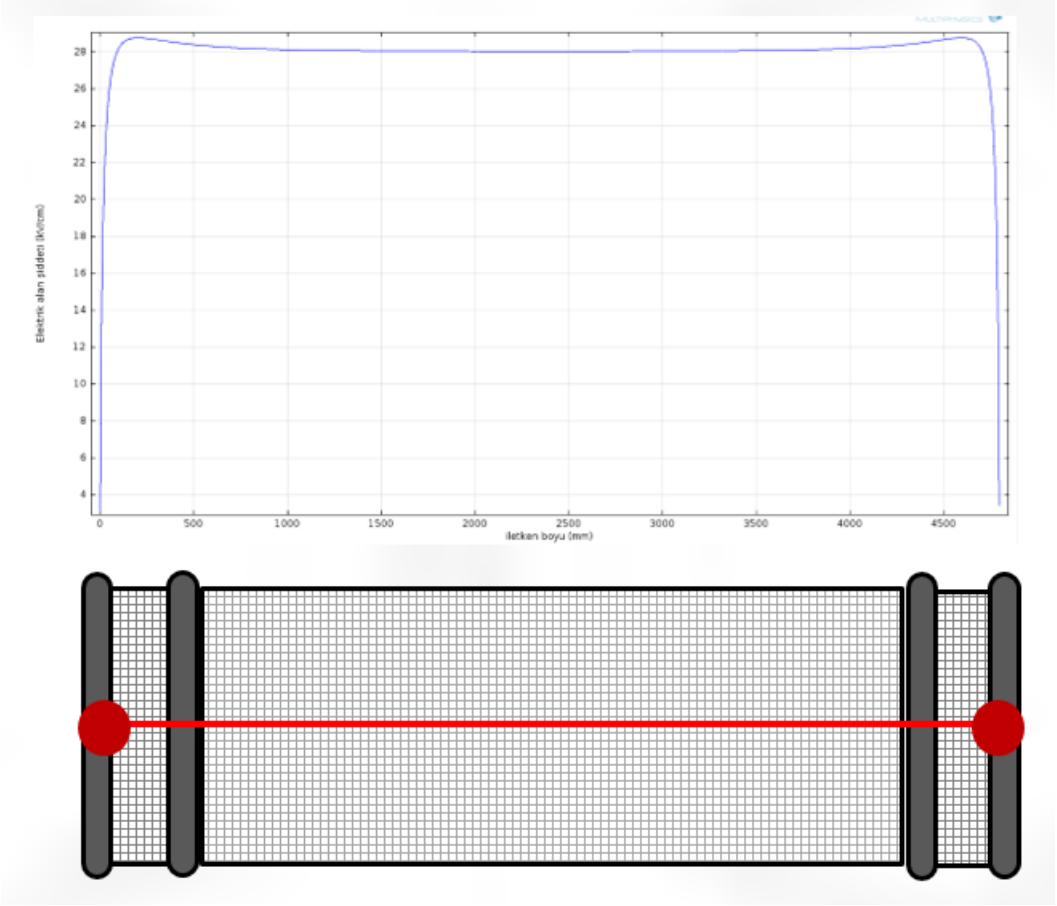
Son olarak koruma (guard) elektrotlarının uzunluklarının belirlenmesi gerekir. Bunların belirlenmesi için sonlu elemanlar analizleri kullanılmıştır.

2m x 2m kenar uzunluğuna sahip kafes içerisine yerleştirilmiş 1272 MCM tekil iletken (elektrik alan şiddetinin en fazla olduğu durumu) durumu için, 4 m uzunluğundaki ölçme bölümünün yanlarına yerleştirilmiş, farklı uzunluklardaki koruma elektrotları için analizler yapılmıştır. İletkene sırasıyla 200 kV, 250 kV ve 300 kV gerilim değerleri uygulanmış ve her gerilim değeri için beş farklı koruma elektrotu uzunluğunda, ölçme bölümündeki iletken parçası üzerinde oluşan maksimum ve minimum elektrik alan şiddetleri hesaplanmıştır. Buradaki amaç, ölçme kısmında, iletken yüzeyindeki elektrik alanın her noktada aynı veya birbirine çok yakın değerlerde olmasını sağlayacak koruma elektrotu uzunluğunun bulunmasıdır. Bu amaçla, yukarıda belirtilen her gerilim ve uzunluk için, iletken yüzeyindeki maksimum ve minimum elektrik alan şiddetleri ayrı ayrı hesaplanmıştır**.** Şekil 3.10'da, korona kafesi içerisindeki iletken üzerindeki alan şiddetleri görülmektedir. İletken uçlarında sonlandırma kullanılmadığı için kafesin uç kısımlarına doğru gittikçe elektrik alan şiddetleri artmaktadır.



Şekil 3.10: Korona kafesinde bulunan iletken yüzeyindeki elektrik alan şiddetleri (korona halkasının olmadığı durum).

İkinci olarak, kafes içerindeki iletkenin iki ucuna sonlandırma halkaları (korona halkaları) yerleştirilmesi durumunda analizler yinelenmiş ve bütün değerler birbirleri ile karşılaştırılarak en uygun uzunluk bulunmaya çalışılmıştır. Şekil 3.11'de görüldüğü gibi sonlandırma kullanılan durumda, iletken üzerindeki elektrik alan dağılımı değişmekte; uç kısımlara doğru elektrik alan dağılımı artan eğrilik yarıçapı nedeniyle azalma eğilimi göstermektedir.

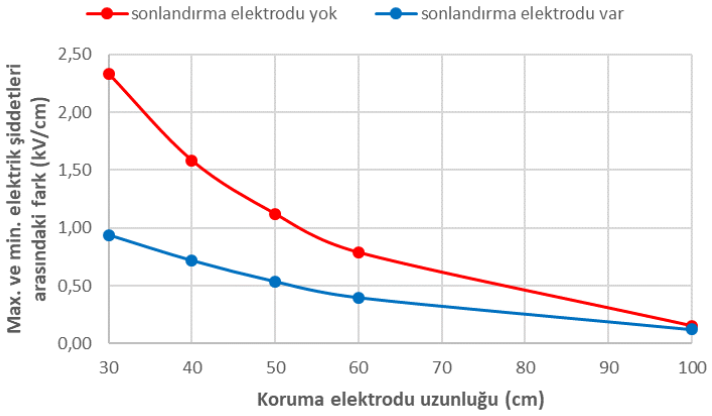


Şekil 3.11: Korona kafesinde bulunan iletken üzerindeki elektrik alan dağılımı (korona halkasının olduğu durum).

Analiz sonucu elde edilen bütün değerler Çizelge 3.4'te görülmektedir. Ayrıca Şekil 3.12'de sonlandırma olan ve olmayan durumlar için elektrik alan şiddetleri arasındaki farklar verilmiştir. Analizlerden de anlaşılabileceği gibi, her bir taraftan 1m uzunluğunda koruma elektrotları ile yapılmış olan analizlerde, elektrik alan şiddetleri arasındaki fark en az olmaktadır. Bu da, bu durumda ölçme kısmında kalan iletken üzerinde en düzgün alan dağılımının bu şekilde sağlanabildiğini göstermektedir.

Çizelge 3.4: Korona kafesi içerisindeki iletkende oluşan maksimum ve minimum elektrik alan şiddetlerinin, koruma elektrotu uzunluğuna göre değişimleri.

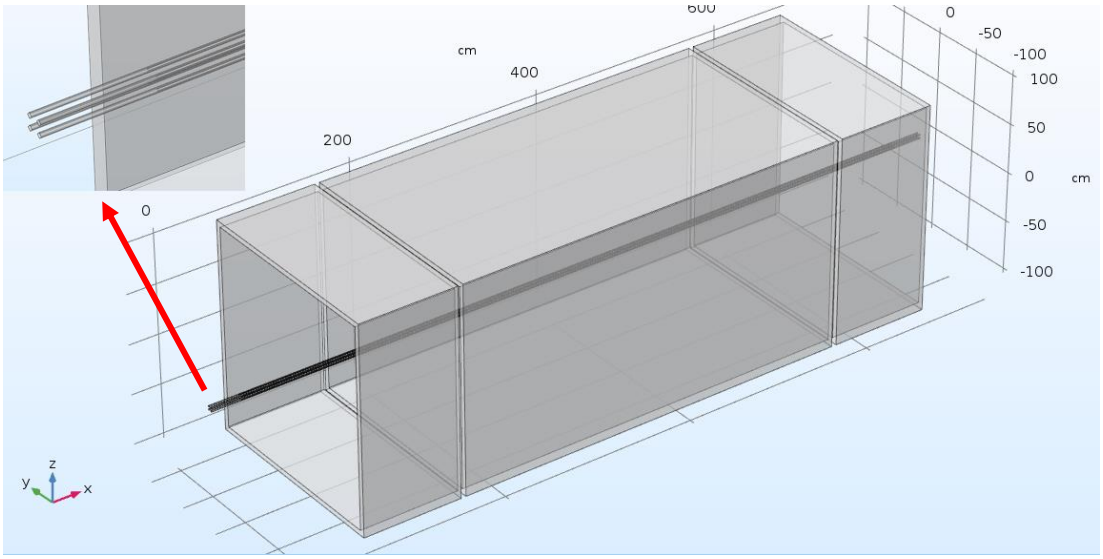
Koruma elektrodu uzunluğu [cm]		30			40			50			100		
Maksimum elektrik alan şiddeti [kV/cm]		max	min	fark	max	min	fark	max	min	fark	max	min	fark
Sonlandırma	200 kV	28,67	27,11	1,56	28,17	27,11	1,06	27,86	27,11	0,75	27,21	27,11	0,10
elektrodu	250 kV	35,84	33,89	1,94	35,21	33,89	1,32	34,82	33,89	0,94	34,01	33,88	0,13
yok	300 kV	43,00	40,67	2,33	42,25	40,67	1,58	41,79	40,67	1,12	40,82	40,66	0,16
Sonlandırma	200 kV	28,68	28,05	0,63	28,53	28,05	0,48	28,41	28,05	0,36	28,13	28,05	0,08
elektrodu	250 kV	35,84	35,06	0,78	35,66	35,06	0,60	35,51	35,06	0,45	35,16	35,06	0,10
var	300 kV	43,01	42,08	0,94	42,79	42,08	0,72	42,61	42,07	0,54	42,19	42,07	0,12



Şekil 3.12: Korona kafesi içerisindeki iletkende oluşan elektrik alan şiddetlerinin koruma elektrotu uzunluğuna göre değişimi.

Sonuç olarak yapılan analizler sonucunda tasarlanan kafesin özellikleri şu şekildedir (Şekil 3.13):

- Kafes kesiti: kare
- Kenar uzunlukları: 2m x 2m
- Ölçme kısmının uzunluğu: 4m
- Koruma elektrotlarının uzunlukları: 1 m
- Toplam kafes uzunluğu: 6m
- Kafes ağ boyutları: 2.5 cm x 2.5 cm
- Kafes malzemesi: Alüminyum



Şekil 3.13: Tasarlanmış olan korona kafesi.

3.5 Model İletkenlerin Belirlenmesi

Model iletken oluşturmanın ilk adımı, kullanılacak olan iletken kesitinin belirlenmesidir. İletken kesiti belirlenirken, küçük gerilimlerde korona oluşturabilmesi ve 2 m çaplı kafeste demet iletken yapısının yerleştirilebilmesi referans alınmıştır. Ayrıca, belirlenen kesite sahip iletkenin temin edilebilir olması da gereklidir. Tüm bu koşullar göz önüne alındığında 7.14 mm çaplı swallow ve 10.11 mm çaplı raven tipi çok telli iletkenlerin modelleme için uygun olduğu sonucuna varılmış ve modellerin bu çaplarda iletkenler ile yapılmasına karar verilmiştir.

Yapılacak olan modellerin, gerçek sistem alan dağılımını yansıtacağı için, aynı demet iletken yapısına sahip olması gerekmektedir. Bu yüzden ölçekli modeller, üçlü ve dörtlü demet olacak şekilde düşünülmüştür. Gerçek sistemde demet açıklığı 45 cm'dir. Modellerde ise bu uzaklık ölçekleme ile belirlenmiştir. Bu çalışmada ölçekleme, gerçek sistemin geometrik ortalama yarıçapı (GMR) üzerinden yapılmış ve demet açıklığı belirlenmiştir.

Sırasıyla 35.10 mm ve 30.42 mm çaplı 1272 MCM ve 954 MCM iletkenlerin, üçlü ve dörtlü demet durumları için geometrik ortalama yarıçapları şu şekildedir:

<u>4x1272 MCM (d=45 cm demet açıklıkları için)</u>

$$GMR_{4x1272} = 1.09\sqrt[4]{D_s\ x\ d^3} \tag{3.1}$$

Burada D_s çok telli iletkenin geometrik yarıçapıdır [96]. Bu değer

$$D_s = 0.7722\ x\ r \tag{3.2}$$

Eşitliğinden 13.552 mm olarak hesaplanır. GMR değeri ise;

$$GMR_{4x1272} = 1.09\sqrt[4]{13.552\ x\ 450^3}$$

204.324 mm olarak bulunur.

3x1272 MCM (d=45 cm demet açıklıkları için)

$$GMR_{3x1272} = \sqrt[3]{D_s\ x\ d^2} \tag{3.3}$$

Eşitliğine göre 139.997 mm olarak hesaplanır. 3 x 954 MCM için de hesaplama benzer şekilde yapılmıştır. Çizelge 3.5'te hesaplanmış olan geometrik ortalama yarıçap değerleri görülmektedir. Kafes ile daha önce deney yapılmadığı için, model iletkenler iki farklı ölçekleme durumuna göre hazırlanacaktır. Birincisi geometrik ortalama yarıçapın 1/10'u ikincisi ise 1/5'si olacak şekilde olacaktır.

Çizelge 3.5: İletkenlerin hesaplanmış geometrik ortalama yarıçapları (GMR).

	4 x 1272 MCM	3 x 1272 MCM	3 x 954 MCM
GMR [mm]	204,324	139,997	133,484
1/10 GMR [mm]	20,432	13,999	13,348
1/5 GMR [mm]	40,864	27,999	26,696

Bu belirlenen yeni GMR değerlerine göre swallow (7,14 mm) ve raven (10.11 mm) iletkenlerin çapları sabit tutularak iletkenler arası uzaklık aynı formüller kullanılarak hesaplanabilir.

SWALLOW 1/10 GMR ölçeklemesi için demet açıklıkları:

Deneylerde kullanılacak olan swallow tip iletkenin 3'lü ve 4'lü demet iletken konfigürasyonlarında demetteki demet açıklıkları, gerçek sistem GMR'lerinin ölçeklenmiş hallerinden hesaplanmıştır.

$$d_{4x1272} = \sqrt[3]{\frac{{GMR_{4x1272}}^4}{1.09^4\ x\ D_s}} \tag{3.4}$$

Formül 3.4 kullanılarak 4'lü demet iletkenler için uzaklık 36.257 mm hesaplanmıştır (1/10 ölçekleme için).

Benzer şekilde 3'lü demet açıklıkları da formül 3.5 ile

$$d_{3x1272} = \sqrt{\frac{GMR_{3x1272}{}^{3}}{D_s}} \tag{3.5}$$

32.545 mm olarak hesaplanmıştır.

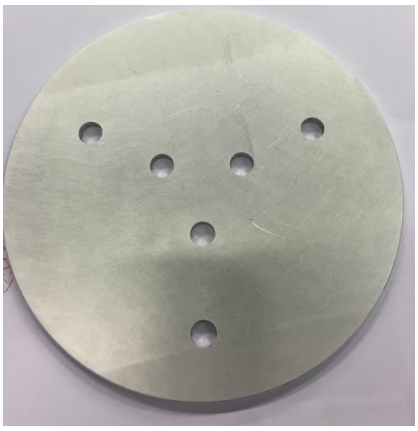
Deneylerde raven iletken kullanılması durumunda ise benzer formüller kullanılarak hesaplar yapılır. Her bir iletken konfigürasyonu ve ölçekleme için ayrı ayrı demet açıklıkları bu şekilde hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6: Ölçeklenmiş GMR değerleri üzerinden hesaplanmış demet açıklıkları.

	D_s açıklıkları [mm]	4 x 1272 MCM	3 x 1272 MCM	3 x 954 MCM
SWALLOW (7.14 mm)	GMR	450	450	450
	1/10 GMR	36.257	32.545	30.301
	1/5 GMR	91.361	92.0515	85.701
RAVEN (10.5 mm)	1/10 GMR	32.292	27.348	25.463
	1/5 GMR	91.361	77.357	73.128

Bu durumda toplam 12 farklı iletken kombinasyonu için deneyler yapılacaktır. Pozitif ve negatif DC gerilim için toplam deney sayısı 24 olmaktadır.

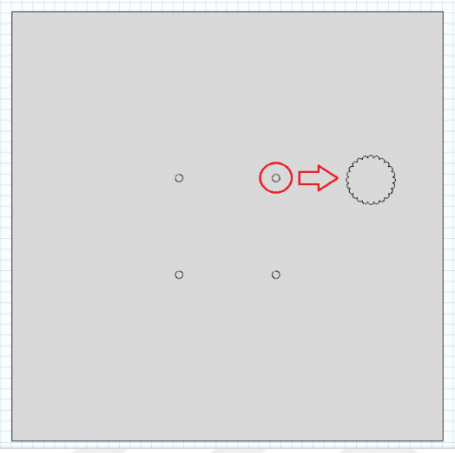
Bu hesaplamalar ayrıca, kafes içerinde demet iletken oluşturmak için kullanılacak olan iletken ayırıcıların (spacer) hazırlanması için de kullanılmıştır. İletken çapı ve ölçeklenmiş demet açıklıklarına uygun ayırıcılar autocad ortamında modellenmiştir. Daha sonra alüminyum diskler üzerine 0.25 mikron hassasiyetli lazer kesim tekniği ile şablonlar yüksek hassasiyetle kesilip elde edilmiştir. Örnek bir iletken ayırıcı Şekil 3.14'te görülmektedir. Yüksek gerilimlerde iletken ayırıcı üzerinde korona oluşmaması için, disk şeklinde yapılmışlardır. Aynı disk içerisinde hem 1/10 GMR hem de 1/5 GMR ölçeği yerleştirilmiştir.



Şekil 3.14: Demet iletken modelleri için hazırlanmış spacer (3x954 MCM iletken için).

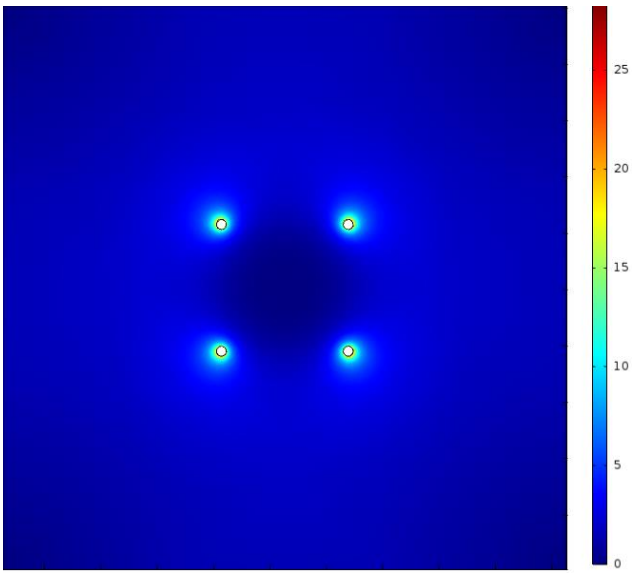
3.6 Elektrik Alan Analizleri

Tasarlanan büyük boyutlu korona kafesinde gerçek iletkenler kullanılarak elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde amaç, gerçek sistemde elde edilen elektrik alan şiddetlerini veren gerilim değerlerini elde etmektir. Şekil 3.15'te 4x1272 MCM konfigürasyonunun analizi için hazırlanmış olan 2D geometri görülmektedir.



Şekil 3.15: Korona kafesinde 4x1272 MCM sonlu elemanlar iletken geometrisi.

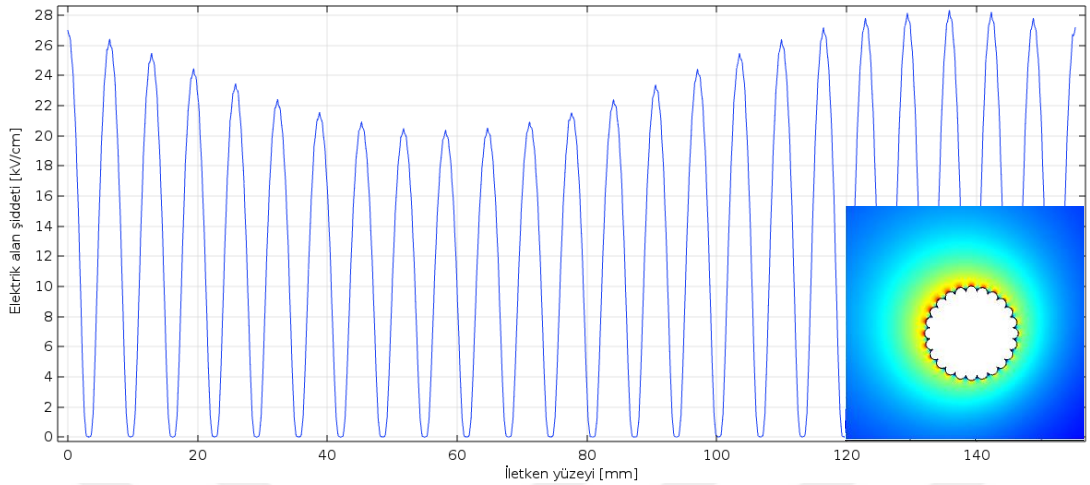
Kafes kısmı topraklanmış ve iletkenler 50 kV gerilimden başlayarak 600 kV'a kadar 50 kV'luk kademelerde uygulanmış gerilimler için, ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Şekil 3.16'de 4x1272 MCM iletken durumu ve 200 kV için yapılmış olan elektrik alan analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.16: Korona kafesinde 4x1272 MCM iletkenlerin elektrik alan analizi.

Elektrik alan dağılımı, iletkenin kenarlara bakan taraflarında, iç tarafa bakan kısımlarından daha yüksektir. Ayrıca çok telli iletken yapısında, dış yüzeydeki alan

dağılımı düzgün değildir. Şekil 3.17'de, aynı analiz sonucu elde edilen iletken yüzeyindeki elektrik alan dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.17: 4x1272 MCM iletkenlerin yüzeyindeki elektrik alan dağılımı.

Bütün analizlerde iletken yüzeyinde oluşan maksimum elektrik alan şiddeti tek tek hesaplanmış ve Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7: Korona kafesinde farklı iletken durumları için oluşan elektrik alan şiddetleri.

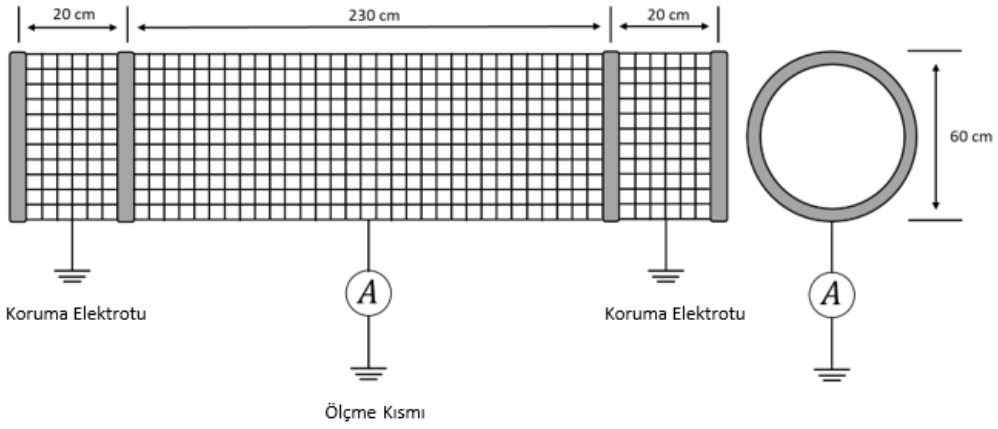
Maksimum Elektrik Alan Şiddetleri [kV/cm]			
Gerilim [kV]	**4x1272 mcm**	**3x1272 mcm**	**3x954 mcm**
50	7,14	7,58	8,60
100	14,27	15,16	17,20
150	21,41	22,74	25,80
200	28,54	30,32	34,40
250	35,68	37,90	43,00
300	42,81	45,49	51,60
350	49,95	53,07	60,20
400	57,08	60,65	68,80
450	64,22	68,23	77,40
500	71,36	75,81	86,00
550	78,49	83,39	94,60
600	85,63	90,97	103,20

Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.7 birlikte değerlendirildiğinde gerçek sistemde 500 kV ve 600 kV geriliminde iletken yüzeyinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetlerini 2 m'lik kafes kullanarak en fazla 250 kV gerilim uygulayarak elde edilebileceği görülmüştür.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deneysel Çalışmaların Özeti

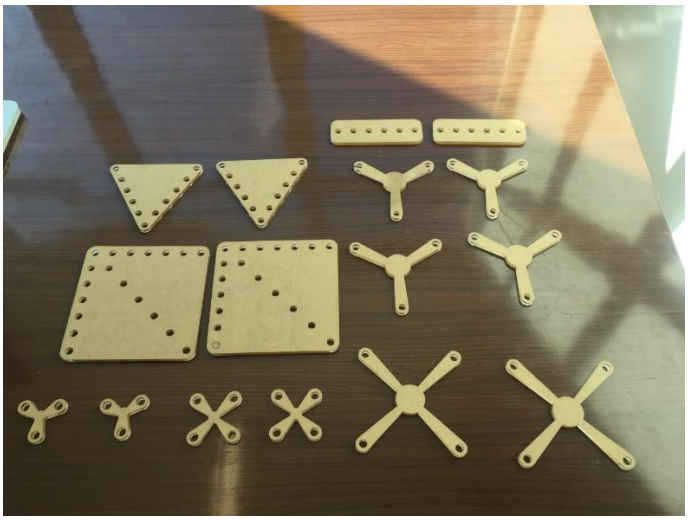
Korona deneyleri; ya deney hatları (test lines) ya da korona kafesleri (corona cage) kullanılarak yapılır. Yeteri kadar yüksek gerilim verebilen kaynak olması durumunda, deney hatları kullanılarak açık havada korona deneyleri yapılabilir. Fakat genellikle laboratuvarlardaki kaynak gerilimleri sınırlı olduğundan, bu tür deneyler daha küçük gerilimlerde yapılmaktadır. Bu küçük gerilimlerde, iletken üzerinde korona oluşturabilmek için, küçük kesitli (ölçekli) model iletkenler kullanılarak, deneyler korona kafesi içerisinde yapılır.



Şekil 4.1: Daire kesitli (küçük) korona kafesi.

Şekil 4.1'de deneyler sırasında kullanılan korona kafesinin ayrıntıları ve boyutları görülmektedir. Kafesin toplam uzunluğu 270 cm'dir. Kafes üç kısımdan oluşmaktadır: 230 cm'lik ölçme kısmı ve kenarlarda 20'şer cm uzunluğunda yapılmış olan koruma elektrotları. Kafes yuvarlak kesitli olup, çapı 60 cm'dir. Kafesin yüzeyini kaplayan iletken çerçevedeki gözlerin boyutları 1.2 cm x 1.2 cm'dir.

Deneylerde, 4mm ve 7mm çapta iki farklı çubuk iletken ve 7.14 mm çaplı çelik özlü alüminyum iletken (ACSR) kullanılmıştır. İletkenlerin hem tekil, hem de farklı demet açıklıklı 2'li, 3'lü ve 4'lü demet yapıları için deneyler gerçekleştirilmiştir. Düzgün demet yapısı elde edebilmek için Şekil 4.2'de gösterilen plexiglass iletken ayırıcılar tasarlanmış ve imal ettirilmiştir.



Şekil 4.2: Model iletkenler için hazırlanmış farklı iletken ayırıcı yapıları.

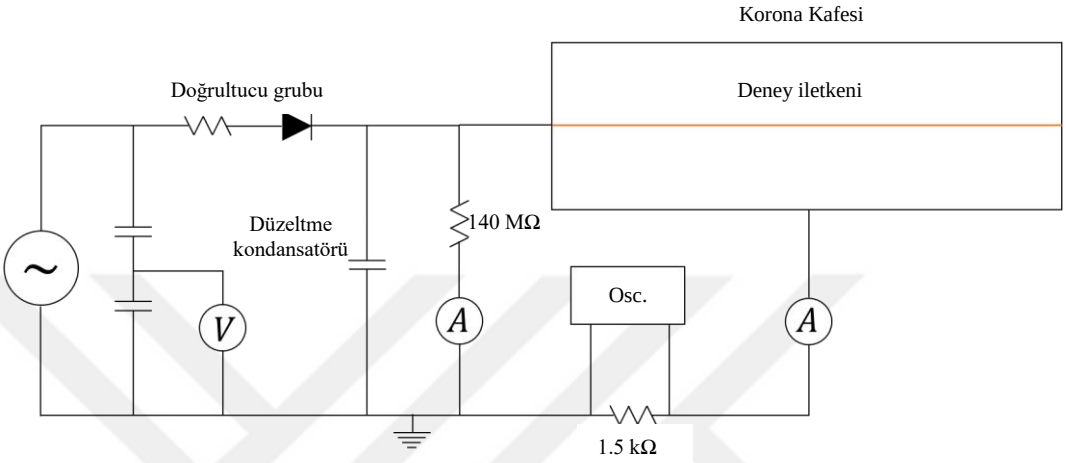
İletken ayırıcıların bir kısmı belirli ölçüler için hazırlanmıştır (bir önceki bölümde hesaplar ve analizler ayrıntılı olarak verilmişti). Diğerleri ise aralıkları değiştirilebilir şekilde tasarlanmıştır. İletken ayırıcılar, iletken aralıkları 2 ile 10 cm arasında 2 cm aralıklarla değiştirilebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu ayırıcılar kullanılarak, iletkenler istenilen açıklıklarda iletim hattı modeli oluşturabilecek şekilde hazırlanabilmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: 4'lü demet model iletken montajı ayrıntısı (kafes dışı).

Küçük kafes kullanılan deneyler, İTÜ Gümüşsuyu Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı'ndaki ekranlı odada gerçekleştirilmiştir. Deney devresi Şekil 4.4'te görülmektedir. Devrede doğru gerilim; 100 kV'luk deney transformatörü çıkışında

doğrultucu grubu yardımıyla elde edilmektedir. Elde edilen bu gerilim, 140 MΩ'luk ölçme direncine bağlı bir mikro-ampermetre yardımıyla ölçülmektedir. Kafes bir mikro-ampermetre ve ona seri bağlı bir 1.5 kΩ'luk şönt direnç üzerinden topraklanmıştır. Bu sayede korona akımları ölçülebilmiştir. Uygulanan DC deney geriliminin dalgalılığı %3'dür. Deneyler sırasınca boşalma karakterinin değişmemesi için, ortam sıcaklığı 23±1 ºC, ve bağıl nem %40±2 değerlerinde sabit tutulmuştur.



Şekil 4.4: Korona kafesi ile yapılan HVDC deney şeması.

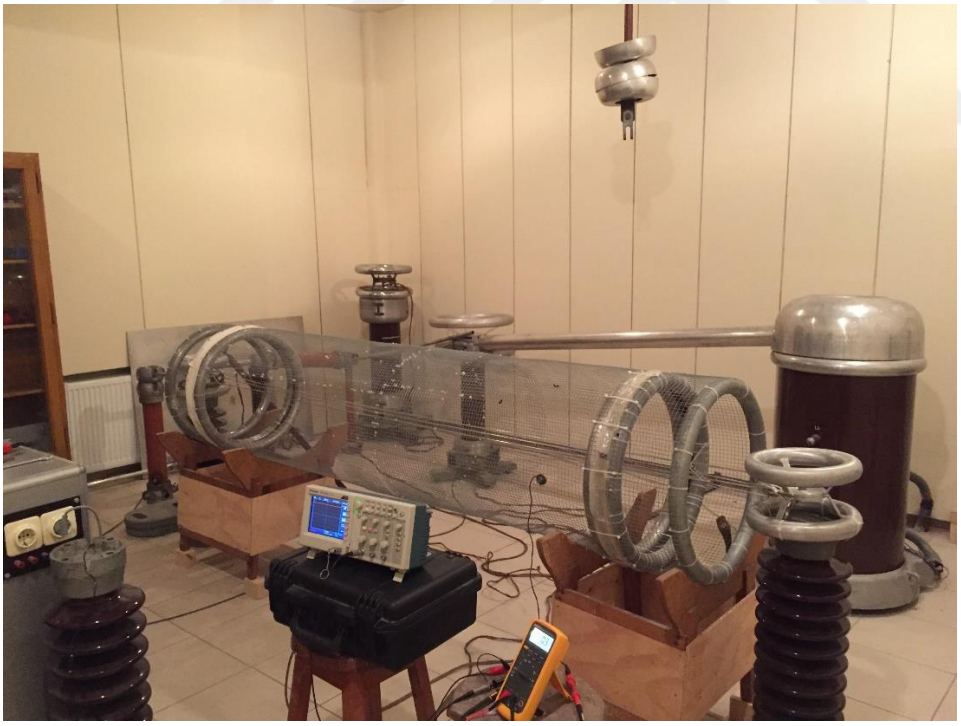
İlk deneylerde 270 cm uzunluğunda korona kafesi kullanılacağı için, iletkenler bu kafese uygun olarak 300 cm uzunluğunda hazırlanmıştır. Bu iletkenler ve iletken ayırıcılar kullanılarak çeşitli model iletken konfigürasyonları elde edilmiştir.

Deneyleri yapılan 12 farklı iletken konfigürasyonu şu şekildedir:

- 7 mm çubuk
  - Tekil
- 7.14 mm çok telli
  - Tekil
- 4 mm çubuk
  - Tekil
  - 2'li demet
    - ✓ 2 cm demet açıklığı
    - ✓ 4 cm demet açıklığı
    - ✓ 6 cm demet açıklığı

- 3’lü demet
  - ✓ 2 cm demet açıklığı
  - ✓ 4 cm demet açıklığı
  - ✓ 6 cm demet açıklığı
- 4’lü demet
  - ✓ 2 cm demet açıklığı
  - ✓ 4 cm demet açıklığı
  - ✓ 6 cm demet açıklığı

Her konfigürasyon kafes içerisine yerleştirilmiş ve sehim yapmayacak şekilde gerilmiştir. Gerilim bağlantı yerleri ve iletken bağlantı noktalarında, korona olmaması için korona halkaları kullanılmıştır. Yapılan her bağlantı sivri uç oluşturmayacak şekilde bu halkaların içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 4.5’te hazırlanmış olan deney montajı görülmektedir.



Şekil 4.5: Korona kafesi ile yapılan HVDC deney montajı.

Deneyler sırasında, eş zamanlı olarak çok sayıda parametre ölçümü yapılmıştır. Korona başlangıç ve sönme gerilimleri, korona akımı, korona akımının dalga şekli ve darbe sayısı deneyler sırasında ölçülen büyüklüklerdir. Bu ölçümler sırasında gerilimin ortalama değerini ölçen doğru gerilim voltmetresi, korona kamerası, hassas

mikro ampermetre ve 2000 MHz/1 Gs/sec örnekleme frekansına sahip bir osiloskop kullanılmıştır. Korona kamerasının UV hassasiyeti 10^{-8} W/cm^2, ampermetrenin hassasiyeti ise 0.1 μA'dir.

Deneylerin ikinci kısmında, daha kalın iletkenlerle kullanılacak olan büyük boyutlu kafes imal ettirilmiş olup, laboratuvarda uygun bir yere konumlandırılmıştır. Şekil 4.6'da büyük korona kafesi görülmektedir. 2 m kenar uzunluklu ve kare kesitli yapı, 2 m uzunluklu parçalar halinde imal edilmiş; bu parçalar birleştirilerek kafes oluşturulmuştur. Ölçme kısmı 4 m, koruma elektrotları ise 1'er m uzunluğundadır. Koruma elektrotları ile ölçme kısmı arasında elektriksel yalıtım bulunmaktadır.



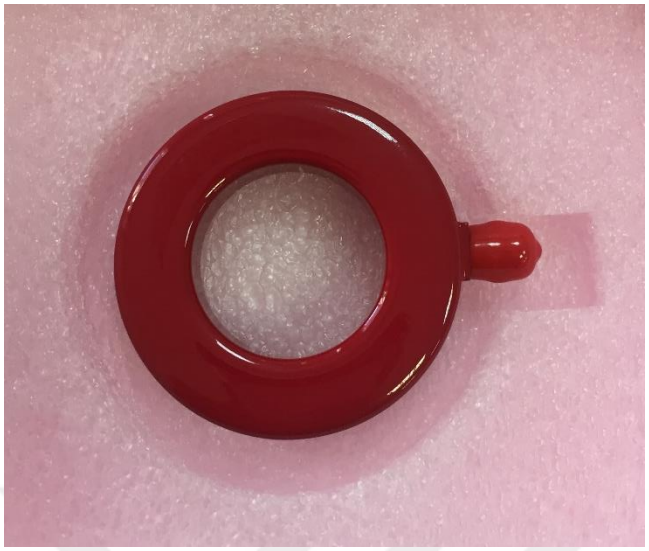
Şekil 4.6: Büyük korona kafesinin laboratuvardaki yerleşimi.

İletkenlerin düzgün gerilebilmesi için, bir tarafı duvara sabitlenmiş, diğer tarafta ise yere sabitlenmiş olan destek parçası kullanılmıştır. Yüksek gerilimli iletkenler, duvara ve destek parçalarına izolatörler üzerinden bağlanmıştır. 4'lü iletken yapısının kafese gerilmiş hali Şekil 4.7'de görülmektedir. Gerilim altında, bağlantı kısımlarında korona oluşmaması için iletkenlerin uç kısımlarına korona halkaları yerleştirilmiştir.



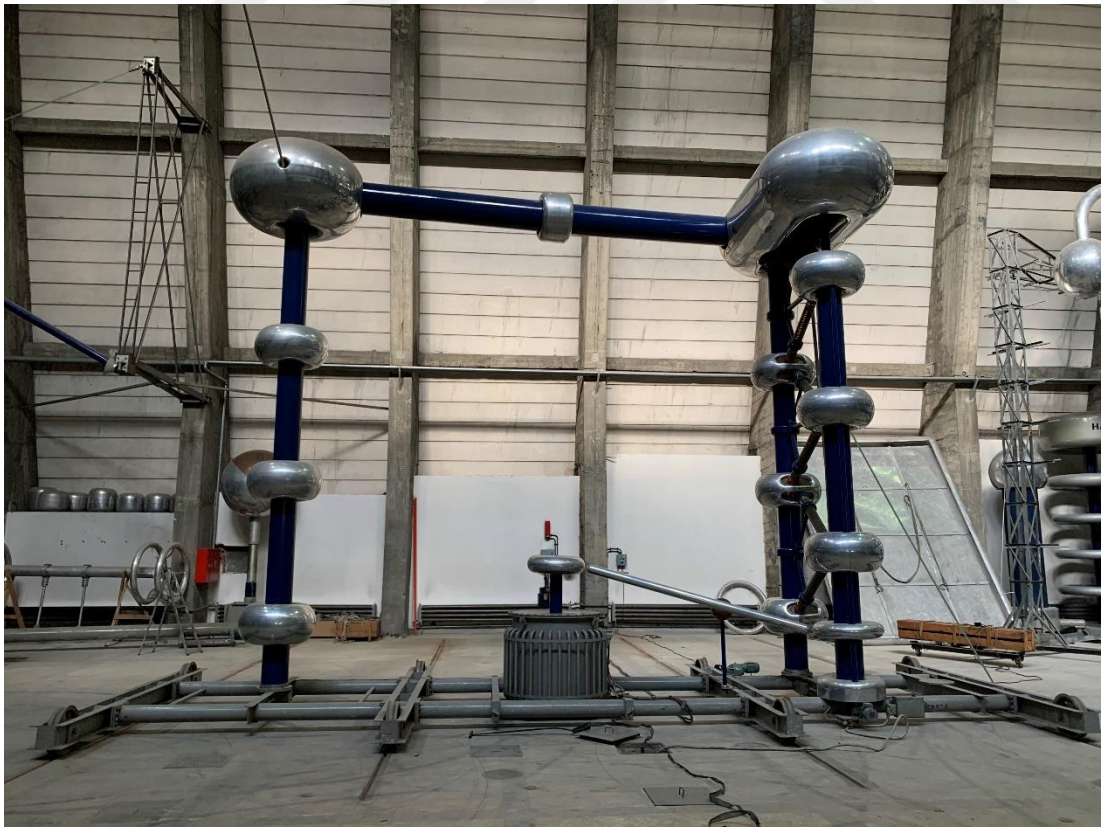
Şekil 4.7: Büyük korona kafesine iletkenin gerilmesi ve sonlandırmalar.

Koruma elektrotları doğrudan topraklanmış; ölçme kısmı ise, korona akımını algılayacak hassas bir akım transformatörü (Şekil 4.8) üzerinden topraklanmıştır.



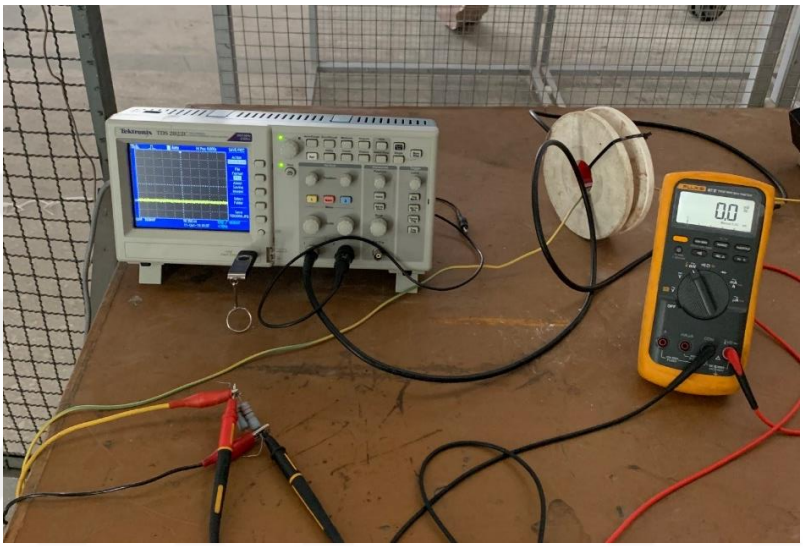
Şekil 4.8: Hassas akım ölçü trafosu.

Gerilim kaynağı olarak Şekil 4.9'da görülen 1000 kV, 10 mA'lik 6 katlı yüksek doğru gerilim üreteci kullanılmıştır. Kafes içerisine iletken konfigürasyonları yerleştirildikten sonra, korona başlayana kadar gerilim kademeli olarak arttırılacaktır.



Şekil 4.9: Yüksek doğru gerilim üreteci.

Korona boşalması başladıktan sonra, korona akımı söz konusu akım transformatörü üzerinden osiloskop yardımıyla gözlenmiştir. Bunun için hazırlanmış olan ölçüm sistemi Şekil 4.10'da görülmektedir. korona akım işaretleri (akım darbeleri), kafesin ölçme düzeneğinin toprak bağlantısı üzerine yerleştirilmiş olan akım sensörü yardımı ile toplanmıştır. Korona darbeleri, 25 MHz. örnekleme frekansı ile ayrık data olarak alınmıştır. Bu sırada işaret üzerindeki gürültülerin süzülmesi için akım trafosunun bağlı olduğu iletken, bir direnç (163.5 Ω) üzerinden topraklanmıştır. Aynı hat üzerine yerleştirilmiş olan hassas mikro-ampermetre ile ortalama korona akımı ölçülmüştür.



Şekil 4.10: Korona akımı ölçüm düzeneği.

Şekil 4.11'de, DC gerilim üreteci, kafes ve korona akımı ölçme düzeneğinden oluşan deney montajı görülmektedir.



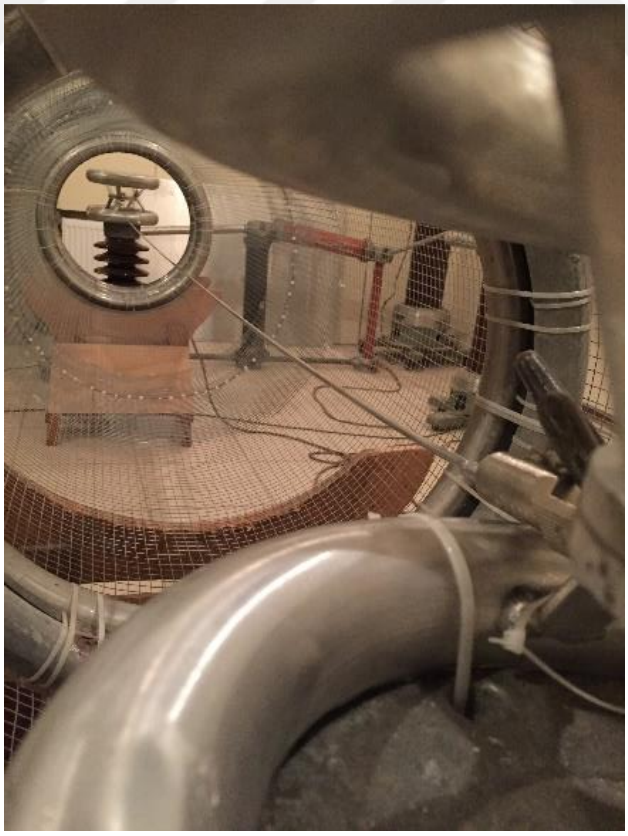
Şekil 4.11: Büyük korona kafesi deney düzeneği.

Büyük kafes deneylerinde, SWALLOW iletkenlerden, iki farklı ölçekleme durumu için (1/5 GMR ve 1/10 GMR) üçer farklı iletken yapısında toplamda 6 konfigürasyon oluşturulmuştur. Pozitif ve negatif doğru gerilimde bu konfigürasyonlar kullanılarak toplamda 12 ayrı deney yapılmıştır.

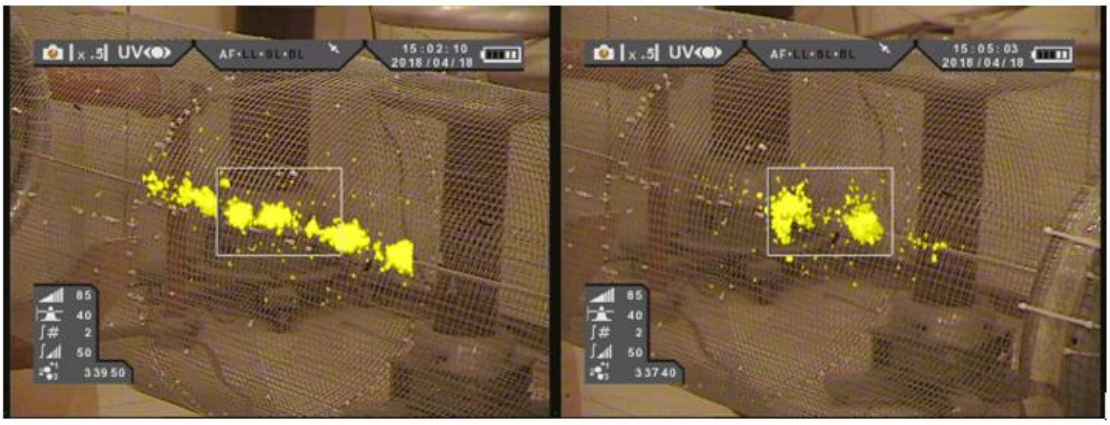
4.2 2.7 m, 60 cm Çaplı Korona Kafesi İle Yapılan Deneyler

4.2.1 Korona başlangıç gerilimlerinin belirlenmesi

Şekil 4.5'teki devre kurulduktan sonra her bir iletken konfigürasyonu için pozitif ve negatif doğru gerilimde deneyler yapılmıştır. Gerilim sabit bir hızla yükseltilirken, iletim hattı korona kamerası ile taranarak koronanın başlayıp başlamadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Belirli bir gerilim değerinden sonra, iletken üzerinde korona başlamakta ve bu andan itibaren korona kamerası yardımıyla, koronanın başladığı noktalarda oluşan akım darbeleri gözlemlenebilmektedir. Bu sayede koronanın, hangi nokta(lar)da, hangi gerilim değerinde başladığı belirlenebilmektedir. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'te 7 mm tekil iletkene ait kafes ve korona kamerası görüntüleri verilmiştir.



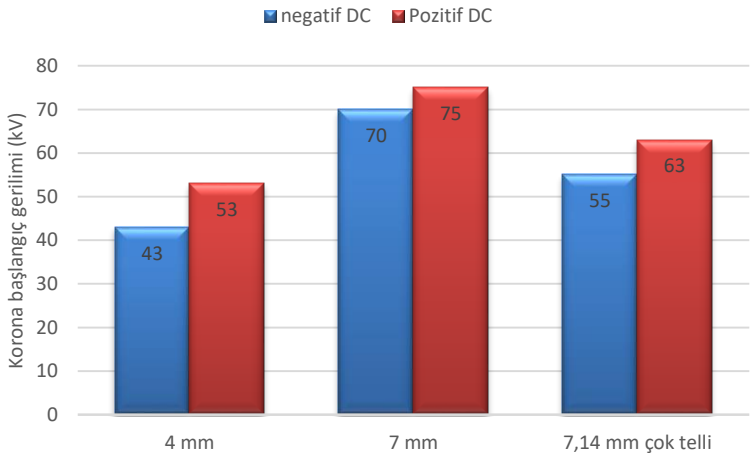
Şekil 4.12: Korona kafesine yerleştirilmiş iletken modeli.



(a) (b)

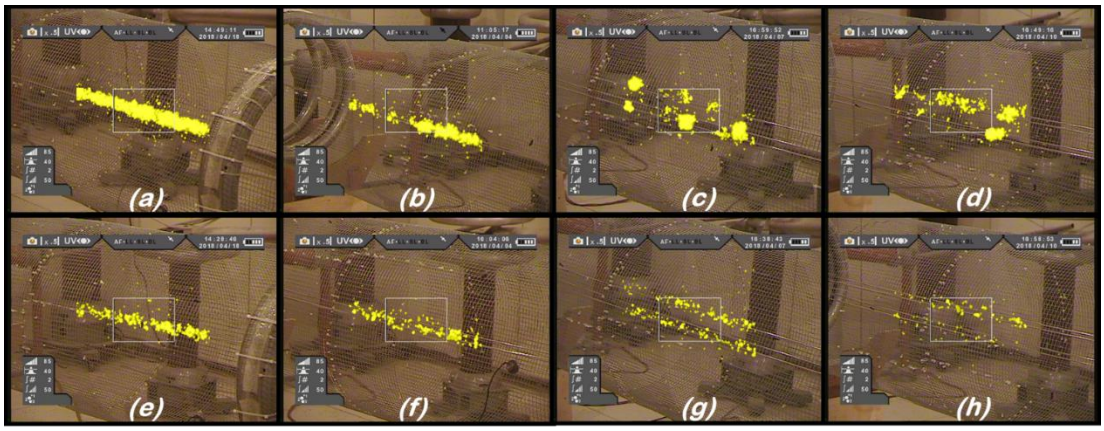
Şekil 4.13: Korona kamerası ile iletken yüzeyindeki koronanın oluşumu (a –DC, b +DC).

7 mm Al. çubuk iletkenin tekil konfigürasyonunu için, korona başlama gerilimleri, negatif ve pozitif doğru gerilim için sırasıyla 70 kV ve 75 kV olarak bulunmuştur. Sönme gerilimleri ise 60 ve 70 kV olarak not edilmiştir. Tekil iletken yapıları için elde edilen korona başlangıç gerilimleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, iletken çapı arttıkça korona başlangıç gerilimi artmaktadır. Fakat yüzey pürüzlülüğü daha fazla olan çok telli iletken için korona başlangıç gerilimi daha düşük olmaktadır. Ayrıca, her durumda negatif korona başlangıç gerilimi, pozitif korna başlangıç geriliminden küçük çıkmaktadır.



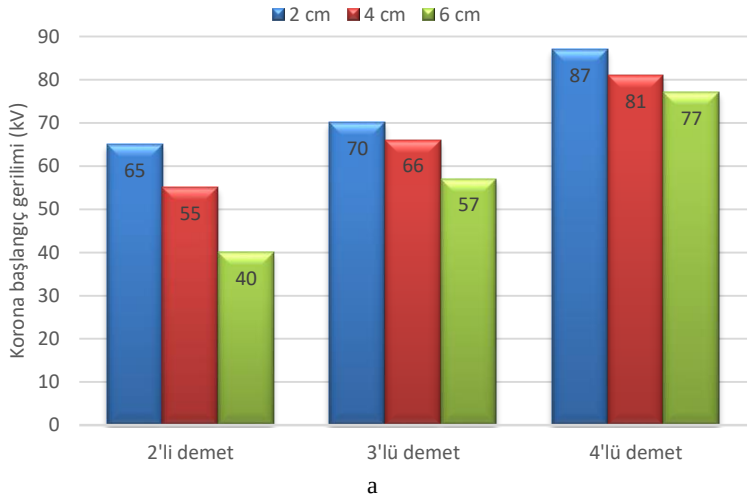
Şekil 4.14: Tekil iletkenlerde korona başlangıç geriliminin değişimi.

Demet iletken yapısında ise, d = 6 mm demet açıklığı için, 90 kV deney geriliminde, korona kamerasında gözlenen boşalmalar, tekil yapı ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15'te verilmiştir. Görüldüğü üzere, demet sayısı arttıkça (ortalama geometrik yarıçap büyüdükçe) korona boşalmasının şiddeti azalmaktadır.



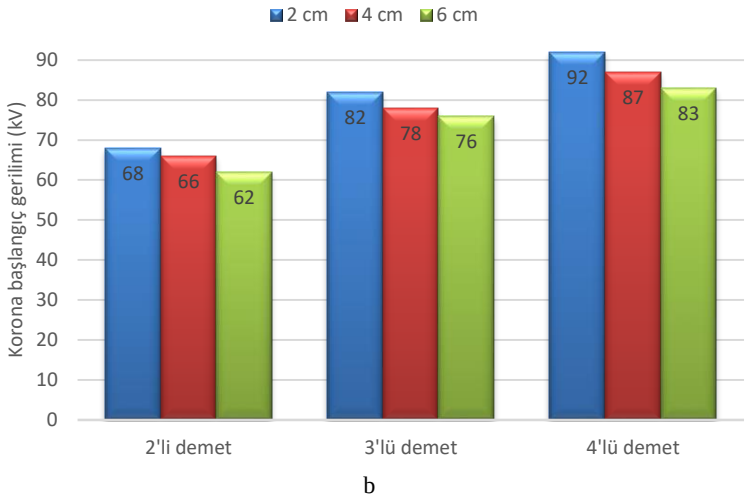
Şekil 4.15: Demet iletken yapısında korona boşalması a) tekil iletken (-), b) 2'li demet (-), c) 3'lü demet (-), d) 4'lü demet (-), e) tekil iletken (+), f) 2'li demet (+), g) 3'lü demet (+), h)4'lü demet (+).

Demet iletken yapısı için belirlenen korona başlangıç gerilimleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Tüm demet yapıları için, tekil yapıda olduğu gibi, pozitif doğru gerilimde elde edilen korona başlangıç gerilimleri negatif gerilimdeki değerlerden daha yüksek olmaktadır. Demet iletken yapısı incelendiğinde ise demetteki iletken sayısı arttıkça korona başlangıç geriliminin büyüdüğü görülmektedir. Fakat demet açıklığı ile değişim incelendiğinde ters orantılı olan bir değişim gözlemlenmiştir. Demet açıklığı arttıkça, korona başlangıç gerilimi azalmaktadır. Bunun nedeni, kafes boyutu (çapı) nedeniyle, iletkendeki elektrik alan şiddetinin uzaklık arttıkça artmasıdır.



a

Şekil 4.16: Farklı demet yapıları ve açıklıkları için korona başlangıç gerilimleri.

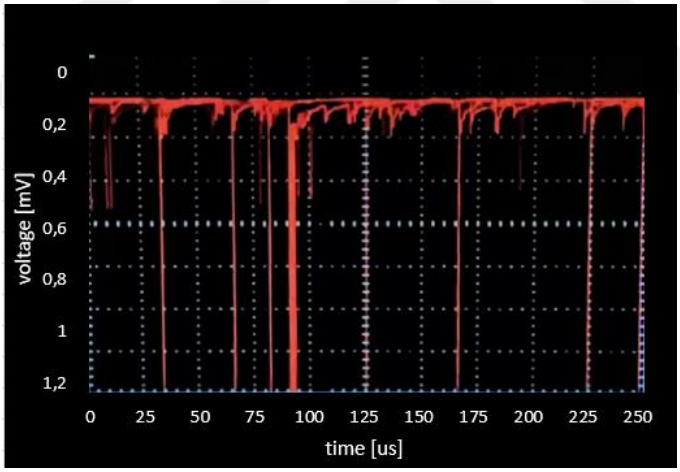


b

Şekil 4.16 (devam): Farklı demet yapıları ve açıklıkları için korona başlangıç gerilimleri a- negatif DC, b- pozitif DC.

4.2.2 Korona akımlarının ölçülmesi

İletken yüzeyindeki boşalmalar sonucu oluşan korona akımı, genliği µA mertebesindeki rastgele darbeler şeklinde kendini göstermektedir. Bu darbelerin genliği ve sıklığı, bir osiloskop ve şönt direnç yardımı ile ölçülebilir.



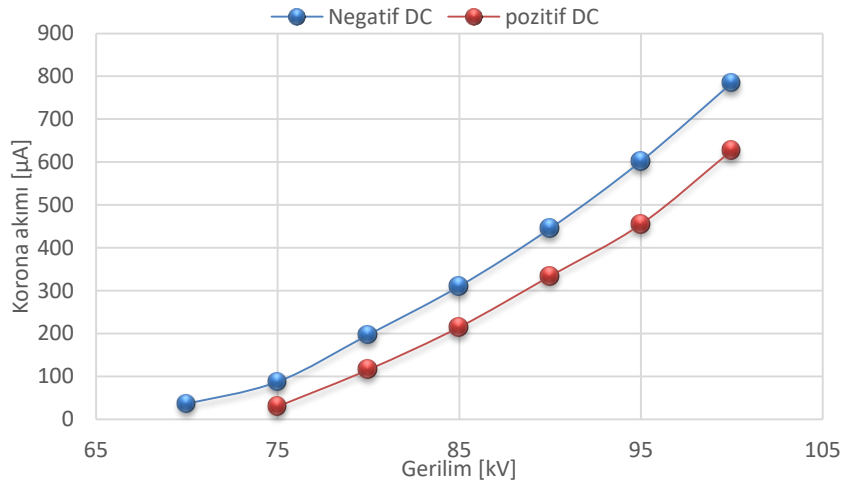
Şekil 4.17: Korona akımının osiloskop görüntüsü (negatif DC).

Korona başlama ve sönme gerilimleri belirlendikten sonra, gerilim 5'er kV'luk kademelerle 100 kV'a kadar arttırılmış ve her kademede mikro-ampermetre ile ölçülen korona akımının ortalama değeri ve korona kamerasında gözlenen darbe sayısı kaydedilmiştir. Bu sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgeye göre deney gerilimi ile birlikte korona akımı ve darbe sayısı artmaktadır. EK A1'de bütün iletken konfigürasyonları için toplanmış deneysel sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.1: 7 mm tekil çubuk iletken için korona akımı ölçüm sonuçları.

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
70	36	5400	-	-
75	87	15000	30	1000
80	197	32000	116	4000
85	310	47000	215	8500
90	445	57000	334	12000
95	602	61000	455	15500
100	785	63500	627	19500

Şekil 4.18'de, 7 mm tekil iletken için ölçülen korona akımı sonuçları görülmektedir. Korona başlangıç gerilimi pozitif doğru gerilimde negatiften daha yüksektir. Akım değerleri ise bununla ters orantılı olacak şekilde negatifte daha yüksektir.



Şekil 4.18: 7 mm tekil iletkende korona akımının gerilimle değişimi.

Demet iletken yapısı kullanılarak gerçekleştirilen deneyler, 7 mm iletken için yapılamadığı için (koronayı oluşturacak kadar gerilim uygulanamadığı için) demet iletken deneyleri 4 mm iletkenlerde yapılmıştır. 4 mm iletken kullanılarak 2'li demet iletkenin, farklı demet açıklıkları için (2 cm, 4cm ve 6 cm) deney sonuçları Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te sırasıyla verilmiştir. Tablolardaki değerler, korona başlangıç geriliminin, demet açıklığı arttıkça azaldığını göstermektedir. Bunun nedeni yapılan elektrik alan analizlerine dayanarak açıklanabilir. Demet açıklığı arttıkça, kafes kenarlarına olan uzaklık azalacağı için iletken yüzeyindeki maksimum elektrik alan şiddeti artmakta ve bu da koronanın daha küçük gerilimlerde başlamasına neden olmaktadır (ayrıntılar bir sonraki bölümde verilmiştir).

Çizelge 4.2: 2x4 mm (2'li demet iletken) için korona akımları (açıklık = 2 cm).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
65	2	-	-	-
70	30	11000	37	1800
75	150	19000	127	5000
80	285	29000	220	10000
85	445	43000	363	12000
90	620	57000	525	19000
95	790	62000	661	23000
100	1012	64000	840	27000

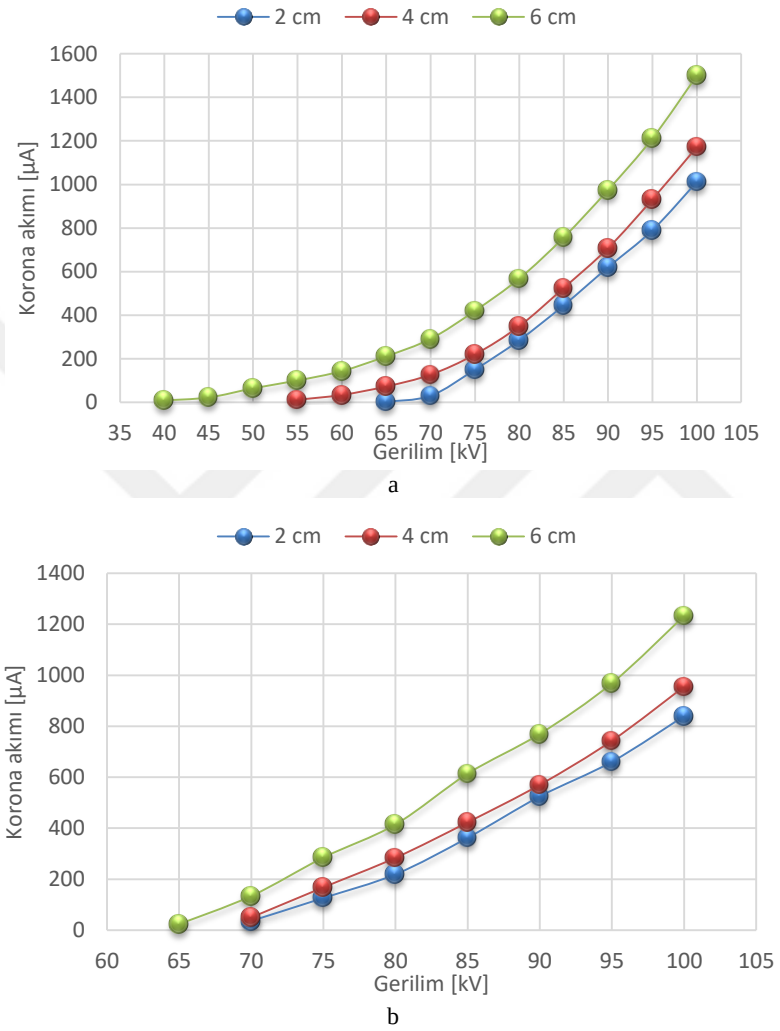
Çizelge 4.3: 2x4 mm (2'li demet iletken) için korona akımları (açıklık = 4 cm).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
55	3	-	-	-
60	34	-	-	-
65	73	12000	-	-
70	127	17000	50	2000
75	220	24000	168	7000
80	350	33000	284	11000
85	525	52000	423	15000
90	708	62000	570	19000
95	932	54000	743	27000
100	1172	56000	955	37000

Çizelge 4.4: 2x4 mm (2'li demet iletken) için korona akımları (açıklık = 6 cm).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
40	8.6	-	-	-
45	22	-	-	-
50	64	-	-	-
55	100	-	-	-
60	143	9000	-	-
65	211	13000	24	2000
70	291	21000	134	7000
75	420	36000	285	12000
80	568	45000	415	15000
85	757	59000	614	24000
90	975	69000	770	29000
95	1212	70000	969	37000
100	1500	73000	1233	40000

Korona akımı karakteristiklerine bakıldığında ise (Şekil 11), demet açıklığı ile korona akımı arasındaki ters orantı görülebilmektedir. Korona akımı; korona başlangıç geriliminin küçük olduğu daha büyük demek açıklıklarında büyük olurken, küçük demet açıklıklarında daha küçük olmaktadır. Tekil iletken sonuçlarındakine benzer şekilde, korona akımı pozitif doğru gerilimde, negatife göre daha küçük olmaktadır.



Şekil 4.19: 4 mm'lik iletkende farklı demet açıklıkları için korona akımının gerilimle değişimi (a- negatif DC, b- pozitif DC).

4.2.3 Korona kayıpları

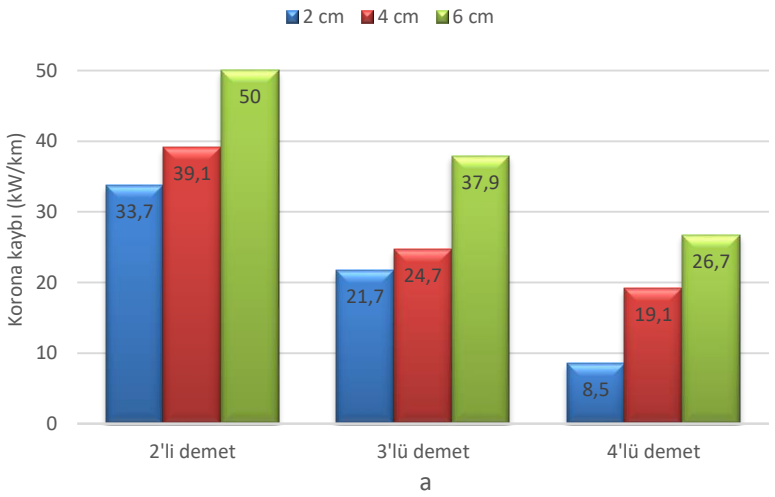
Literatürde, iki kutuplu ve tek kutuplu sistemler için korona kayıpları ile ilgili çeşitli sayısal hesap yöntemleri mevcuttur. Deneylerde oluşan korona kayıpları ise, uygulanan gerilim ve o gerilimde ölçülen korona akımının tepe değeri ile çarpımı sonucu elde edilmiş ve km başına kayıp [kW/km] olarak çizelgelerde verilmiştir. Çizelge 4.5'te tekil iletken deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplanmış

korona kayıpları verilmiştir. Demet iletken sonuçlarına göre hesaplanmış korona kayıp değerleri ise EK A2'de verilmiştir.

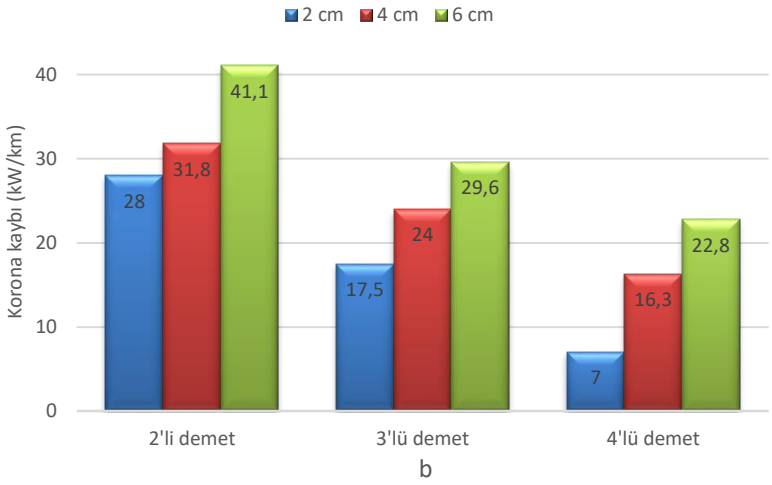
Çizelge 4.5: Tekil iletkenlerde hesaplanmış korona kayıplarının gerilimle değişimi.

	P_{korona} [kW/km]					
	Negatif DC			Pozitif DC		
Test gerilimi [kV]	4 mm	7 mm	7.14 mm	4 mm	7 mm	7.14 mm
45	0.1	-	-	-	-	-
50	0.4	-	-	-	-	-
55	0.9	-	0.8	0.6	-	-
60	2.6	-	2.2	2.1	-	-
65	4.8	-	4	3.9	-	0.1
70	7.9	0.8	5.5	6.3	-	1.9
75	11.4	2.2	8.9	9.5	0.8	4.9
80	15.9	5.3	12.3	13.4	3.1	8.6
85	21.4	8.8	17.2	18.3	6.1	12.8
90	27.8	13.4	22.9	23.8	10	17.3
95	36.3	19.1	29.2	31	14.4	22.5
100	45.6	26.2	37.1	38.7	20.9	29.6

Deneysel yollarla hesaplanan korona kayıplarının demet iletken yapısına göre değişimine bakıldığında, demet iletken yapısında korona kayıplarının tekil iletkenlerden daha küçük olduğu görülmektedir. Şekil 4.20'de, demet iletkenlere ilişkin 100 kV gerilimde korona kayıpları, karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Korona kayıpları demet yapısındaki iletken sayısının artışı ile azalmakta, demet açıklığı artışı ile ise artmaktadır. Ayrıca, demet yapıda negatif gerilimdeki korona kayıpları pozitifteki kayıplardan daha büyük çıkmaktadır.



Şekil 4.20: Demet iletkenler için 100 kV doğru gerilimde oluşan korona kaybı.



Şekil 4.20 (devam): Demet iletkenler için 100 kV doğru gerilimde oluşan korona kaybı a- negatif DC, b- pozitif DC.

4.2.4 Radyo girişim gerilimi (RIV)

Bu çalışmada RIV ölçümleri deneysel olarak yapılamamış; deney gerilimlerine karşı düşen RIV değerleri sayısal olarak dB cinsinden hesaplanmıştır. Hesaplamalarda tek kutuplu sistemler için geçerli olan formüller kullanılmıştır.

Tek kutuplu HVDC sistemlerinde RIV değerleri formül 4.1 ile hesaplanabilir:

$$\Gamma = \Gamma_0 + k_1 \cdot (g - g_0) + k_2 \cdot log\left(\frac{n}{n_0}\right) + 40 \cdot log(\frac{d}{d_0}) \qquad (4.1)$$

Burada Γ, dB cinsinden radyo girişim gerilimi, k_1 ve k_2 mevsim ve hava durumuna göre belirlenmiş katsayılar, g iletken yüzeyindeki maksimum elektrik alan şiddeti, n demet iletken sayısı, d demetteki iletkenlerin çapı ve Γ_0, g_0, n_0 and d_0 ise referans değerlerdir. Γ_0 Çizelge 4.6'dan bulunabilir. Diğer sabitlerin değerleri ise şu şekildedir: d_0=4,064 cm, n_0=6, g_0=25 kV/cm

Çizelge 4.6: RI katsayılarının mevsimsel değişimleri.

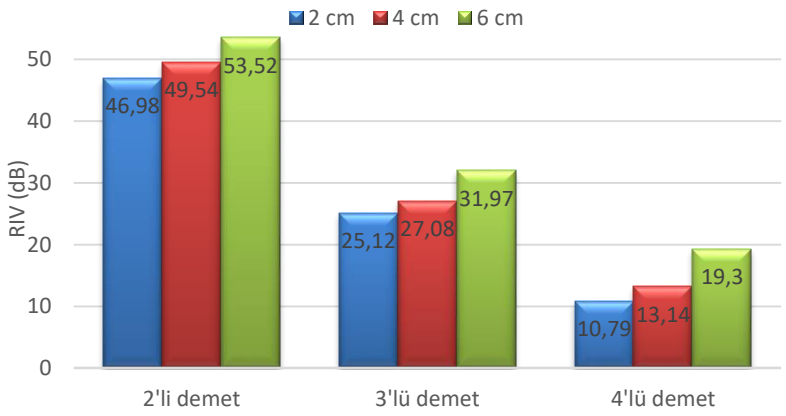
Mevsim	Hava durumu	Γ_0 [dB]	k_1	k_2
Yaz	iyi	27	1.83	45.8
	kötü	20.4	1.39	48
İlkbahar	iyi	23.4	1.68	29
Sonbahar	kötü	19.8	1.68	63.5
Kış	iyi	18.7	1.63	19.7
	kötü	19.5	1.47	10

Bu formüle göre tekil iletkenler için farklı gerilimlerde hesaplanmış RIV değerleri Çizelge 4.7'de verilmiştir. RIV değerleri gerilim arttıkça ve iletken çapı azaldıkça artmaktadır. Demet iletkenler için hesaplanan değerler EK A3'te verilmiştir.

Çizelge 4.7: Tekil iletkenlerde hesaplanmış RIV değerleri.

	RIV [dB]		
Test gerilimi [kV]	4 mm	7 mm	7.14 mm
50	2.25	-	2.33
60	18.99	-	17.07
70	35.73	3.81	31.81
80	52.47	14.6	46.56
90	69.21	25.39	61.3
100	85.95	36.18	76.04

Şekil 4.21, demet iletken yapısı için, korona başlangıç geriliminin üzerinde 100 kV deney geriliminde hesaplanmış RIV değerlerini göstermektedir. Grafikten görülebileceği gibi demetteki iletken sayısı arttıkça RIV değerinde önemli miktarda azalma meydana gelmektedir. Diğer karakteristiklerle benzer şekilde, demet açıklığı arttırıldıkça RIV değerleri de artmaktadır.



Şekil 4.21: Demet iletken yapısında 100 kV doğru gerilimde hesaplanmış RIV değerleri.

4.2.5 Duyulabilir gürültü (AN)

Hatlarda oluşan koronanın en belirgin özelliklerinden biri de çıkardığı sestir. Gerilim düzeyine ve ölçüm noktasının hatta uzaklığına bağlı olarak sesin genliği değişir. Duyulabilir gürültü, uygun koşullar altında uygun donanımlarla ölçülebilir. Bu çalışmada, deney yapılan ortamdaki gürültünün çok yüksek olması nedeniyle, koronanın oluşturduğu duyulabilir gürültü ölçülememiştir. Bunun yerine sayısal yöntemler kullanılarak hesap yoluyla elde edilmiştir.

Duyulabilir gürültü; hattaki elektrik alan şiddetine, iletken sayısına, iletken çapına ve radyal uzaklığa göre formül 4.2 yardımıyla hesaplanır [97]:

$$AN = AN_0 + 86 \cdot log(g) + k \cdot log(n) + 40 \cdot log(d) - 11{,}4 \cdot \log(R) \qquad (4.2)$$

Burada g iletken yüzeyindeki maksimum elektrik alan şiddeti, n demet iletken sayısı, d demetteki iletkenlerin çapı, R radyal uzaklık ve AN_0 ve k da formüldeki sabitlerdir. Bu sabitlerin demet iletken sayısına göre belirlenmiş değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8: Duyulabilir gürültü için belirlenmiş sabit değerler.

n	AN_0 [dB]	k
1	-93,4	0
2	-93,4	0
>2	-100,62	25,6

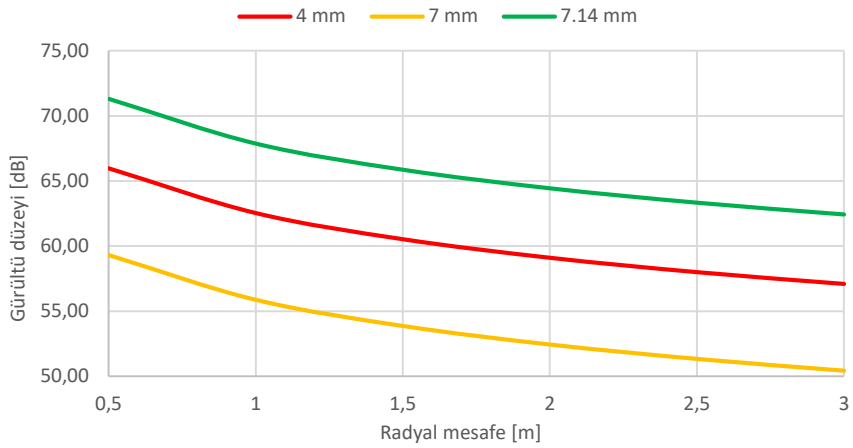
Bu formül kullanılarak farklı deney gerilimlerinde, 2 m uzaklıkta oluşacak gürültü değerleri, her bir iletken konfigürasyonu için dB cinsinden hesaplanmıştır. Çizelge 4.9'de tekil iletkenler için hesaplanmış duyulabilir gürültü değerleri verilmiştir. Demet iletken yapısında oluşan gürültü değerleri EK A4'te görülebilir.

Çizelge 4.9: Tekil iletkenlerde hesaplanmış AN değerleri.

	AN [dB]		
Test gerilimi [kV]	4 mm	7 mm	7.14 mm
20	-	-	4.32
30	14.15	7.47	19.47
40	24.89	18.21	30.21
50	33.23	26.55	38.55
60	40.04	33.36	45.36
70	45.79	39.11	51.11
80	50.78	44.1	56.1
90	55.18	48.5	60.5
100	59.12	52.44	64.43

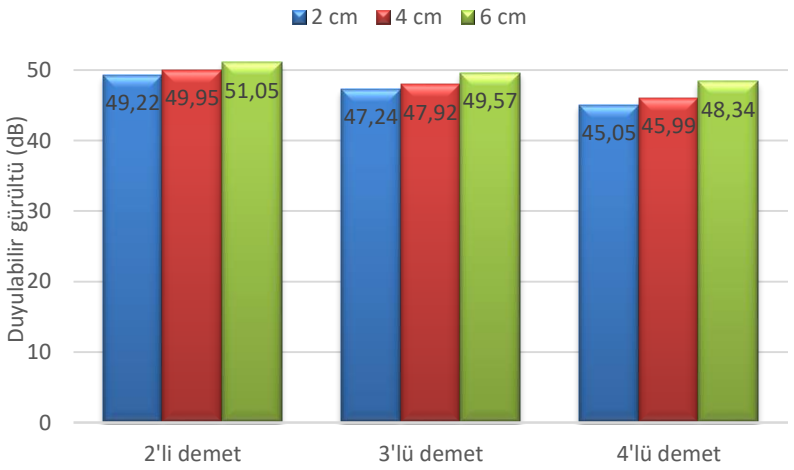
Koronanın oluşturduğu gürültü, gerilim arttıkça artmaktadır. Bunun yanında, farklı ölçüm noktaları için yapılan hesaplar sonucu oluşturulmuş duyulabilir gürültü

karakteristiği Şekil 4.22'de görülmektedir. Uzaklık arttıkça gürültü değeri de azalmaktadır.



Şekil 4.22: Tekil iletkenlerde duyulabilir gürültünün radyal uzaklık ile değişimi (gerilim: 100 kV).

Demet iletken yapısında, 100 kV deney geriliminde ve 2 m radyal uzaklıkta hesaplanmış duyulabilir gürültü düzeyleri Şekil 4.23'te verilmiştir. Değerler birbirine yakın olmakla birlikte, demet iletken sayısı ile az da olsa gürültünün azaldığı, demet açıklığı ile ise az miktarda gürültünün arttığı görülmektedir.



Şekil 4.23: Demet iletken yapısında duyulabilir gürültünün radyal uzaklık ile değişimi (gerilim: 100 kV).

4.3 6 m, 2x2 m Kesitli Korona Kafesi İle Yapılan Deneyler

Büyük kafeste yapılan deneylerde alınan ölçümler, küçük kafes deneyleri ile aynı olsa da; gerek iletken kalınlıkları ve konfigürasyonları, gerekse değerlerin alındığı gerilimler açısından farklılık göstermektedir. Bu farklılığın bir diğer nedeni de doğru

gerilim ayar ve kontrol sistemi duyarlılığının, küçük kafes deneylerinde kullanılan sistemden farklı olmasıdır.

4.3.1 Korona başlangıç gerilimlerinin belirlenmesi

Şekil 4.24'te büyük korona kafesi içerisinde gerilmiş 4x1272 MCM iletkenin 1/10 GMR ölçeğindeki modeli görülmektedir. Gerilim üreteci, iletken borular ve korona önleyen halkalar kullanılarak, kafes gerilim olan iletkene bağlanmıştır. Deney öncesinde, iletken yüzeyi kir ve tozlardan arındırılarak, deney sonuçlarını etkilemesi engellenmiş ve deneyler sonuna kadar iletkenlere temas edilmemiştir.



Şekil 4.24: 4'lü demet iletken yapısının kafes içerisine gerilmiş hali.

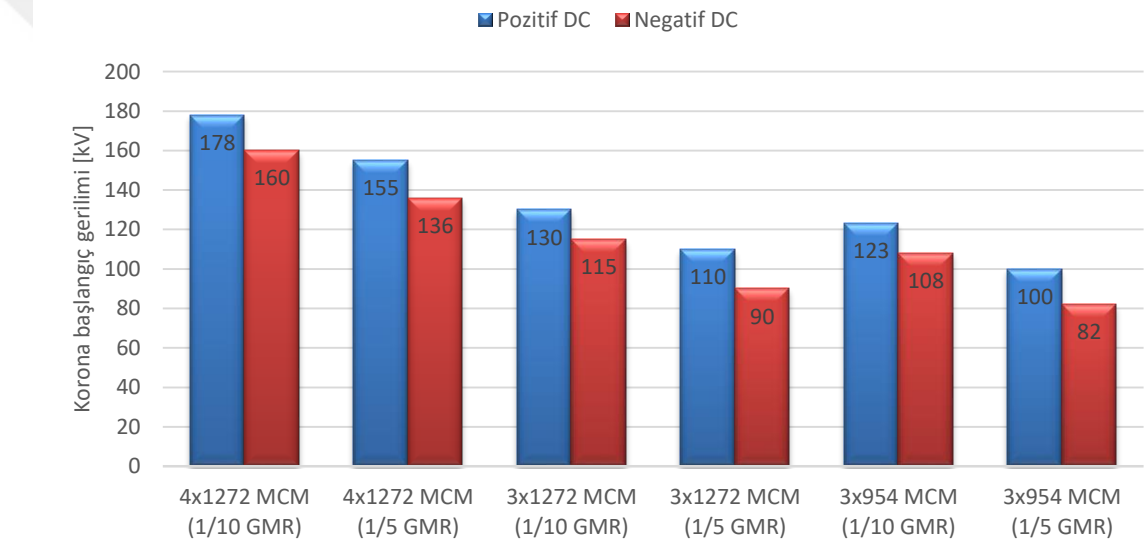
Ortam koşulları koronayı doğrudan etkilediği için, deneylere başlamadan önce ortam koşulları (sıcaklık basınç ve bağıl nem) her bir konfigürasyon için kaydedilmiştir. Sıfırdan itibaren deney gerilimi düzgün bir şekilde kadar kademeli olarak arttırılırken, korona kamerası ile taranan iletken yüzeyinde koronanın başladığı gerilim belirlenmiştir. Ayrıca, kafesin ölçme kısmına bağlı olan akım algılayıcı ve hassas mikro-ampermetre ile de, korona başlangıcı doğrulanmıştır. Yani, korona başlangıç gerilimi belirlenmesinde korona kamerası, akım algılayıcı ve hassas mikro-ampermetre birlikte kullanılmıştır.

Korona başlangıç gerilimi olarak koronanın sürekli olduğu ve iletken yüzeyine dağılmış haldeki durumunun (korona kamerası ile gözlemlenen) elde edildiği gerilim

düzeyi referans alınmıştır. Her bir konfigürasyon için deneysel olarak bulunan korona başlangıç gerilimleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Beklendiği gibi, 4'lü demet yapısının korona başlangıç gerilimi, diğerlerinden daha yüksektir.

Çizelge 4.10: İletken konfigürasyonlarından elde edilmiş korona başlangıç gerilimleri.

Konfigürasyon	+ DC [kV]	- DC [kV]
4x1272 MCM (1/10 GMR)	178	160
4x1272 MCM (1/5 GMR)	155	136
3x1272 MCM (1/10 GMR)	130	115
3x1272 MCM (1/5 GMR)	110	90
3x954 MCM (1/10 GMR)	123	108
3x954 MCM (1/5 GMR)	100	82



Şekil 4.25: Korona başlangıç geriliminin iletken konfigürasyonuna göre değişimi.

Şekil 4.25'te korona başlangıç geriliminin iletken konfigürasyonlarına göre değişimi verilmiştir. Polarite etkisinin açıkça görüldüğü şekilde, pozitif gerilimde korona, negatif gerilimlerden daha geç başlamaktadır. Kafesin sonlu yapısı nedeniyle demet açıklığı arttıkça artan yüzeysel alan şiddeti nedeniyle korona başlangıç gerilimi azalmaktadır.

Her bir konfigürasyon için korona başlangıç gerilimleri elde edildikten sonra, korona sönme gerilimleri de benzer şekilde ölçülmüştür. İlk önce korona başlangıç geriliminin %30 fazlasına kadar kademeli olarak çıkılmıştır (korona akımlarının ölçülmesi bölümünde detaylandırılacaktır). Daha sonra iletken yüzeyinde korona görülmeyene dek gerilim kademeli olarak azaltılmıştır. Koronanın artık görülmediği gerilim değeri, o demet yapısı için korona sönme gerilimi olarak ifade edilmektedir. Bu sonuçlar

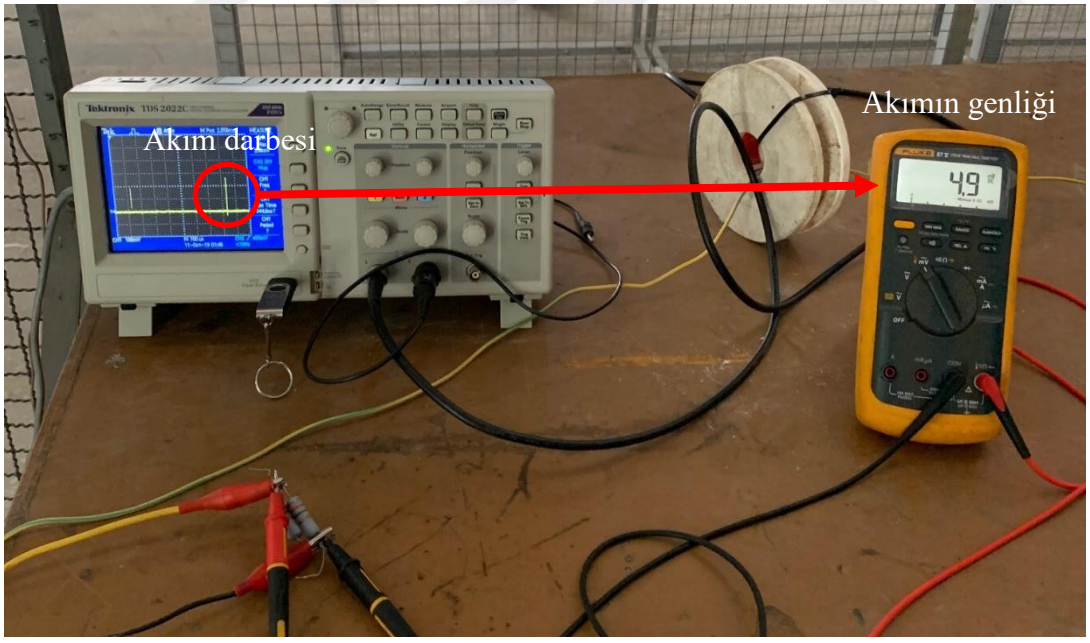
Çizelge 4.11'de verilmiştir. Buna göre bütün konfigürasyonlarda korona sönme gerilimi korona başlangıç gerilimlerinden küçük olmaktadır.

Çizelge 4. 11: İletken konfigürasyonlarında elde edilmiş korona sönme gerilimleri.

Konfigürasyon	+ DC [kV]	- DC [kV]
4x1272 MCM (1/10 GMR)	156	140
4x1272 MCM (1/5 GMR)	136	119
3x1272 MCM (1/10 GMR)	114	101
3x1272 MCM (1/5 GMR)	96	79
3x954 MCM (1/10 GMR)	108	95
3x954 MCM (1/5 GMR)	88	72

4.3.2 Korona akımlarının ölçülmesi

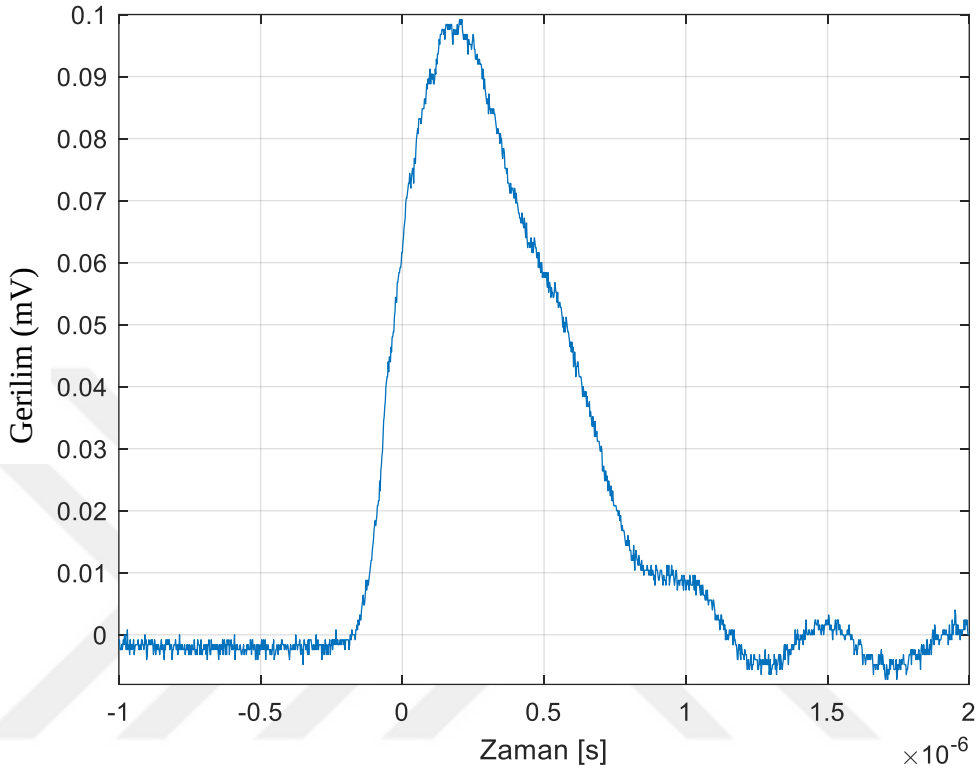
Korona akımları, korona kayıplarının deneysel olarak hesaplanmasında kullanılır. Korona kafesi içerisine yerleştirilmiş olan iletkende, belirli bir gerilimden sonra korona boşalması başlar. Eğer kafes bir ampermetre üzerinden topraklanırsa korona boşalması sırasında ampermetrede korona akımının ortalama değerleri ölçülür (Şekil 4.26). Bu akımın kaynağı, iletken yüzeyinde oluşan koronadır. Bu akımların mertebesi gerilimin genliğine göre mikroamperden başlar, miliampere kadar yükselebilir.



Şekil 4.26: Ölçme düzeneğinde korona akımının gözlemlenmesi.

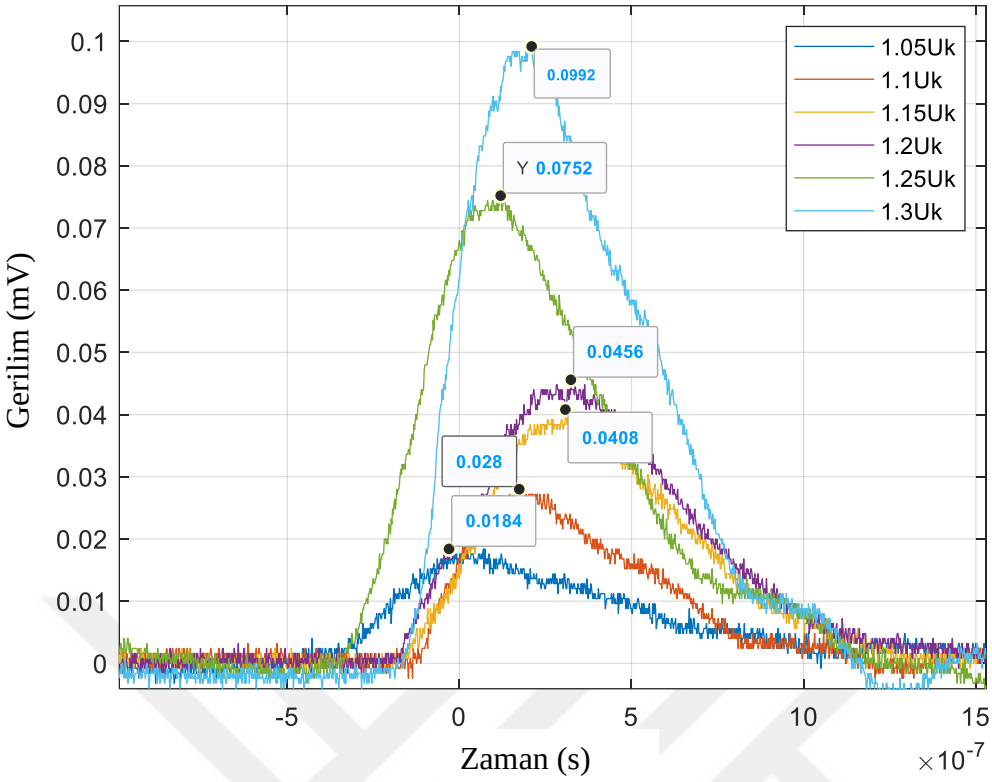
Yüksek frekanslı bu boşalmaları ölçmek için hassas mikroa-mpermetre yanında, akım algılayıcı ve osiloskop da kullanılır.

Korona akımlarını ölçmek için ampermetre ve osiloskop kullanılmıştır. Ampermetre ile akım değeri okunurken, osiloskop ile de akımın dalga şekli elde edilmiştir. Şekil 4.27'de 4'lü demet iletken için, pozitif 200 kV deney geriliminde, osiloskop ile elde edilen dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.27: 200 kV deney geriliminde korona akımının dalga şekli (4x1272 MCM).

Korona akım ölçümleri, korona başlangıç geriliminin üstündeki gerilim değerlerinde yapılmıştır. Her bir iletken konfigürasyonu için korona başlangıç geriliminin farklı olması ve yüksek DC gerilim kontrol sisteminin yeterince hassas ayar yapamamasından dolayı, küçük kafesteki gibi, aynı gerilim düzeyine kadar kademeli olarak gerilim arttırma yoluna gidilmemiştir. Bunun yerine korona başlangıç geriliminin %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 yükseğinde korona akımları ölçülmüştür. Böylece, daha doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi hedeflenmiştir. 4x1272 MCM iletkenin 1/5 GMR ölçeklemesi için alınan dalga şekillerinin karşılaştırılması Şekil 4.28'de verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi gerilim arttıkça artan korona ile birlikte akım darbelerinin genlikleri de büyümektedir.



Şekil 4.28: Korona akımı dalga şeklinin gerilimle değişimi (4x1272 MCM, 1/5 GMR ölçeği).

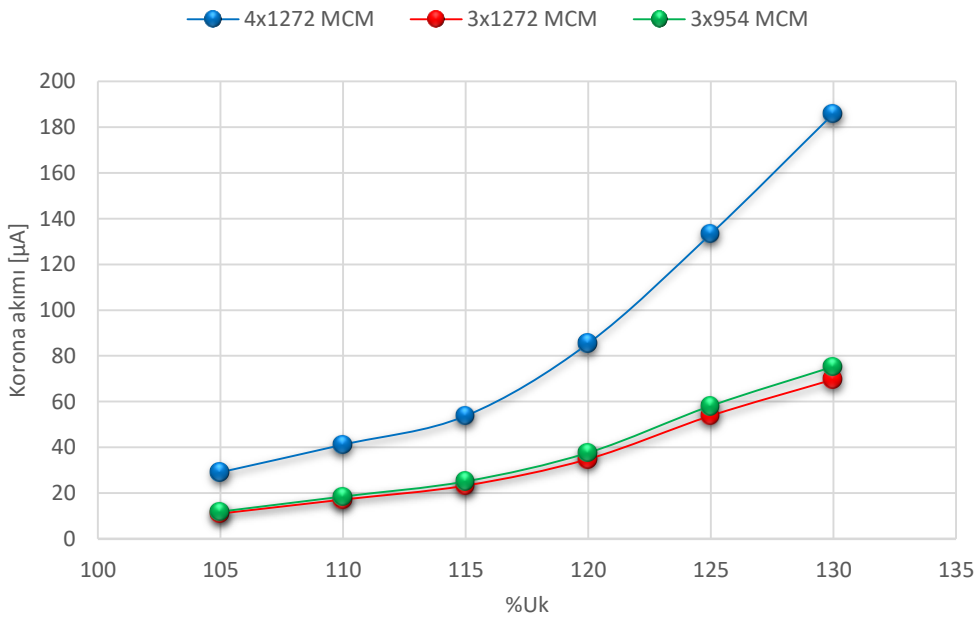
Kurulan ölçüm sistemi ile ilk önce korona başlangıç geriliminin %5 daha yüksek gerilime çıkılarak akımın kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Daha sonra hem osiloskoptan dalga şekilleri hem de ampermetreden akım değerleri okunup kaydedilmiştir. Sonrasında, benzer şekilde, korona başlangıç geriliminin %5'i oranında deney gerilimleri arttırılarak ölçümler yapılmıştır.

Çizelge 4.12: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için korona akımı sonuçları.

Sıcaklık: 21.2 ºC	Basınç: 768.5 mmHg	Nem: %65.2
	Korona akımı [µA]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	23.97	23.24
%110 Uk	29.96	39.75
%115 Uk	38.53	53.21
%120 Uk	45.25	82.93
%125 Uk	62.38	102.75
%130 Uk	79.51	108.86

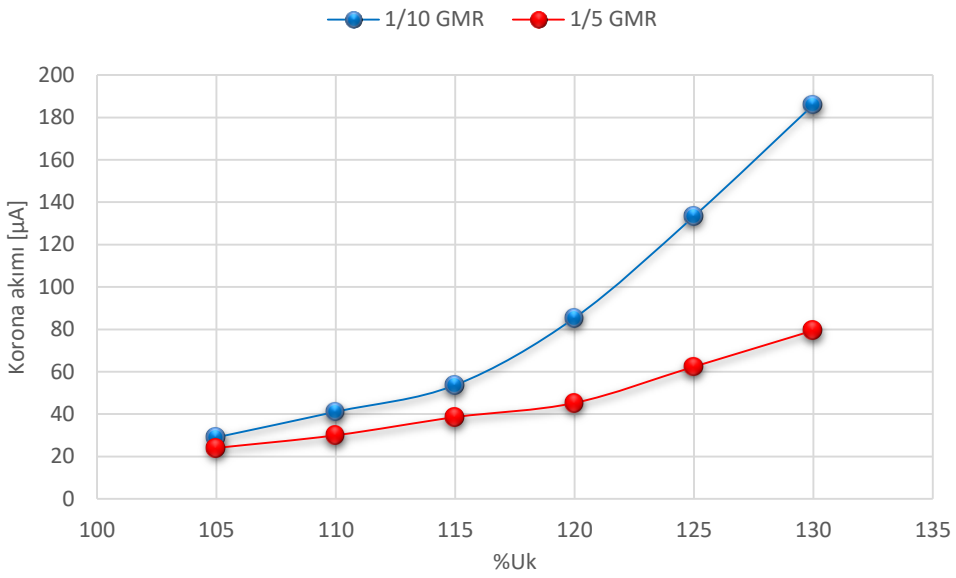
4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi durumu için yapılan korona akımı ölçüm sonuçları Çizelge 4.12'de verilmiştir. Diğer konfigürasyonlara ait veriler EK C1'de verilmiştir.

Çizelgeye göre aynı konfigürasyon ve iletken ölçeklemesi için, negatif doğru gerilimdeki korona akımları, pozitif doğru gerilimdeki akımlardan daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 4.29'da farklı konfigürasyonların korona akımına etkileri görülmektedir (1/10 GMR için). Swallow iletkenin 1/10 ölçeklemesi için sistemde oluşan korona akımlarına bakıldığında, 4'lü demet iletkenlerdeki korona akım değerleri, 3'lü demet iletkenlere göre daha fazla olmaktadır. Bunu nedeni, 4'lü demette, korona başlangıç geriliminin daha yüksek olmasıdır. 3'lü iletkenler arasında çok fazla bir fark olmamasının nedeni, ölçekleme nedeniyle demet açıklıklarının birbirine yakın olmasıdır.



Şekil 4.29: Farklı konfigürasyonlar için korona akımının gerilimle değişimi (negatif DC, 1/10 GMR).

Şekil 4.30'da, 4x1272 MCM demet yapısının, pozitif deney gerilimlerinde, 1/10 ve 1/5 ölçekleme durumları için, korona akımlarının gerilimle değişimleri görülmektedir. Görüldüğü gibi, 1/10 ölçeklemede akım değerleri daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni, koronanın daha küçük ölçekte, daha yüksek değerlerde başlamasıdır.



Şekil 4.30: 4x1272 MCM iletkenin korona akımlarının iletken ölçeklemesine göre değişimi (pozitif DC).

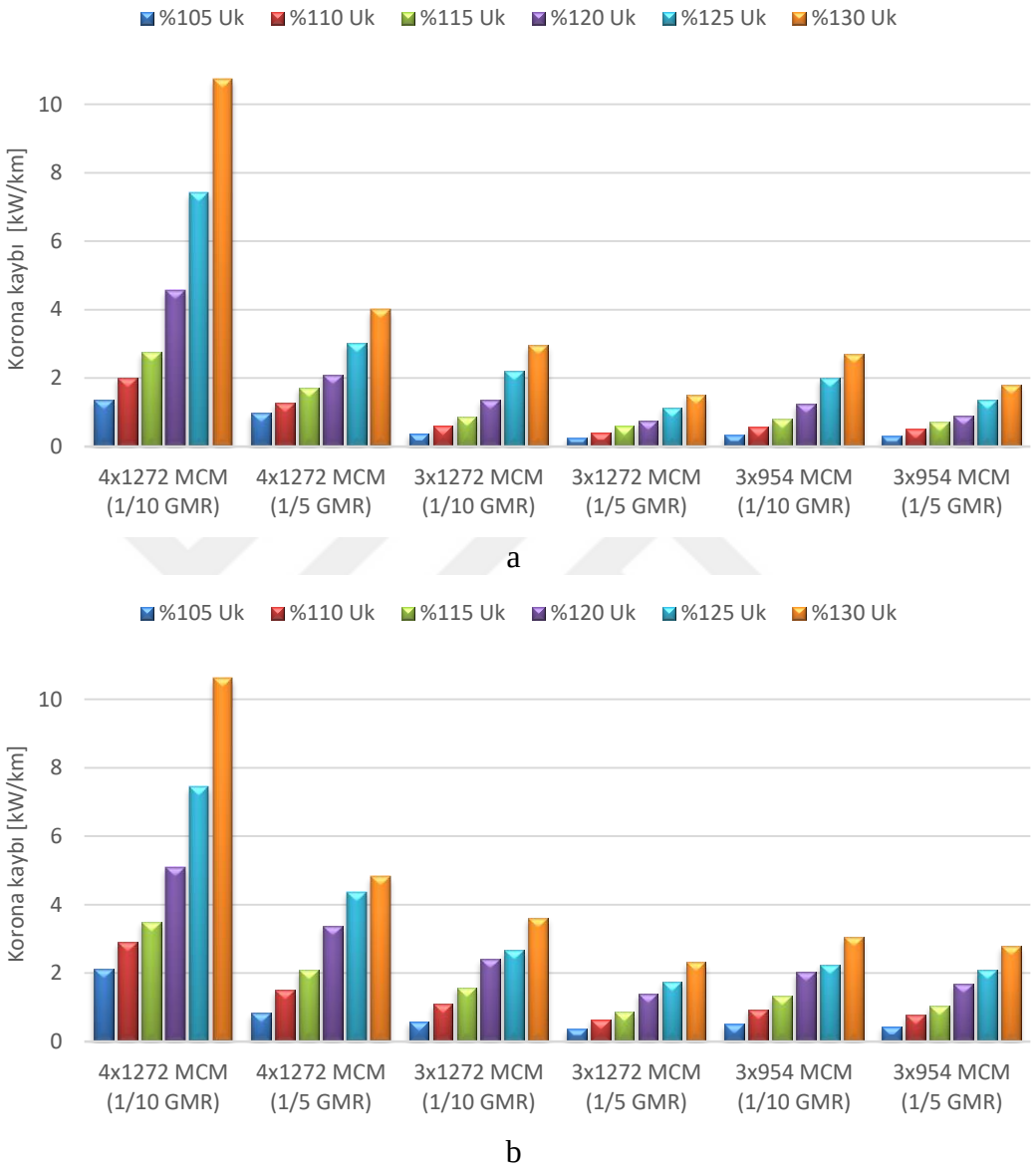
4.3.3 Korona kayıpları

Korona akımları deneysel olarak elde edildikten sonra, bu değerler kullanılarak, her bir gerilim düzeyi ve iletken konfigürasyonu için, km başına korona kayıpları (kW/km) hesaplanmıştır. 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçekleme durumu için hesaplanan değerler Çizelge 4.13'te, diğer konfigürasyonlara ilişkin sonuçları ise EK C2'de verilmiştir.

Çizelge 4.13: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için hesaplanmış korona kaybı değerleri.

Sıcaklık: 21.2 °C	Basınç: 768.5 mmHg	Nem: %65.2
Korona kaybı [kW/km]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	0.98	0.83
%110 Uk	1.28	1.49
%115 Uk	1.72	2.08
%120 Uk	2.10	3.38
%125 Uk	3.02	4.37
%130 Uk	4.01	4.81

Çizelgeye göre, daha yüksek korona akımları veren negatif gerilimlerde, korona kayıpları da daha yüksek çıkmaktadır. Şekil 4.31'de ise tüm iletken konfigürasyonlarında, pozitif ve negatif doğru gerilimler için korona kayıplarının değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.31: Korona kayıplarının demet iletken yapısında değişimi a) pozitif DC b) negatif DC.

Şekilde görüldüğü gibi en yüksek korona kaybı 4'lü demet iletkenlerde oluşmaktadır. Ölçeklemenin etkisi de şekilde açıkça gözükmektedir. Aynı iletken konfigürasyonunda, daha küçük ölçekli modelde akım değerleri daha düşük elde edildiği için kayıplar daha küçük olmaktadır. 3'lü demet iletkenler ile 4'lüler arasında önemli fark olmasına karşın, kendi aralarındaki farklar küçüktür. Bunun nedeni GMR modellemesinde, 1272 MCM ve 954 MCM konfigürasyonlara ilişkin demet

açıklıklarının birbirine yakın olmasıdır. Bunula beraber 954 MCM yapısında demet açıklığı, 1272 MCM'den daha küçük olduğu için, akım ve dolayısıyla korona kaybı değerleri daha büyük olmaktadır.

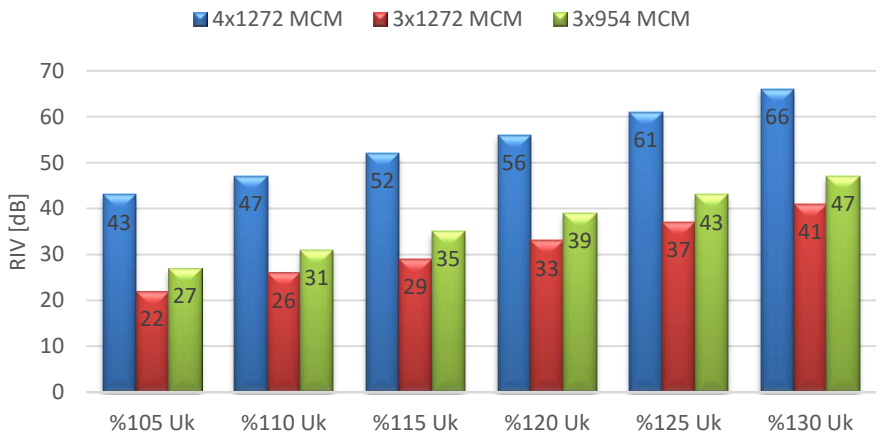
4.3.4 Radyo girişimi (RIV)

Radyo girişimi her bir konfigürasyon için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, daha önce küçük kafes hesaplamalarında da kullanılan, tek kutuplu sistemler için önerilen formül tercih edilmiştir. Tek kutuplu bir HVDC sistemlerinde RIV değerleri formül 4.1 ile hesaplanabilir.

Çizelge 4.14: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için RIV sonuçları.

	RIV [dB]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	43	31
%110 Uk	47	35
%115 Uk	52	39
%120 Uk	56	43
%125 Uk	61	47
%130 Uk	66	51

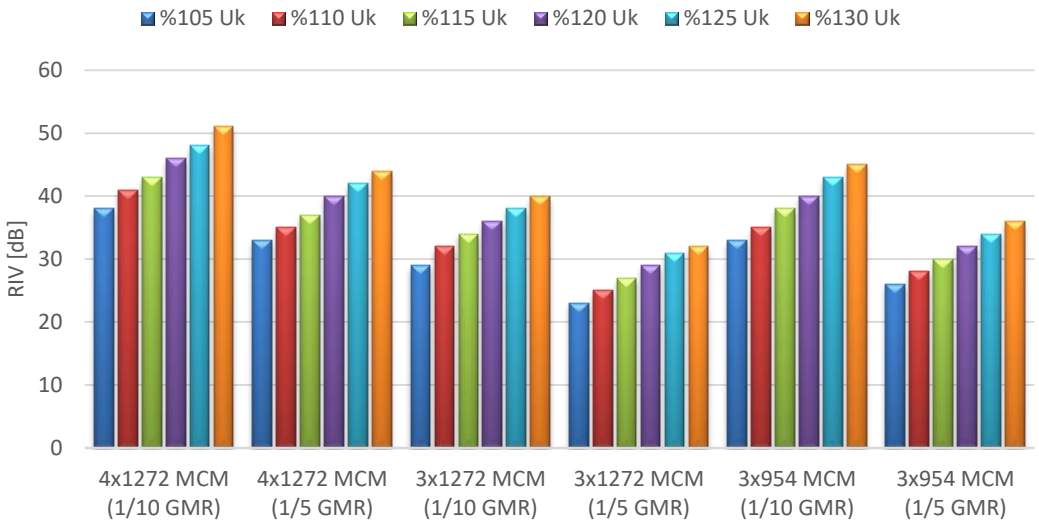
Bu formüle göre 4x1272 MCM iletken konfigürasyonunun 1/5 GMR ölçeği için farklı gerilimlerde hesaplanmış RIV değerleri Çizelge 4.14'te; diğer konfigürasyonlarıa ilişkin değerler ise EK C3'teki Çizelgelerde verilmiştir. Çizelgeye göre, negatif doğru gerilimde RIV değerleri daha düşük çıkmaktadır.



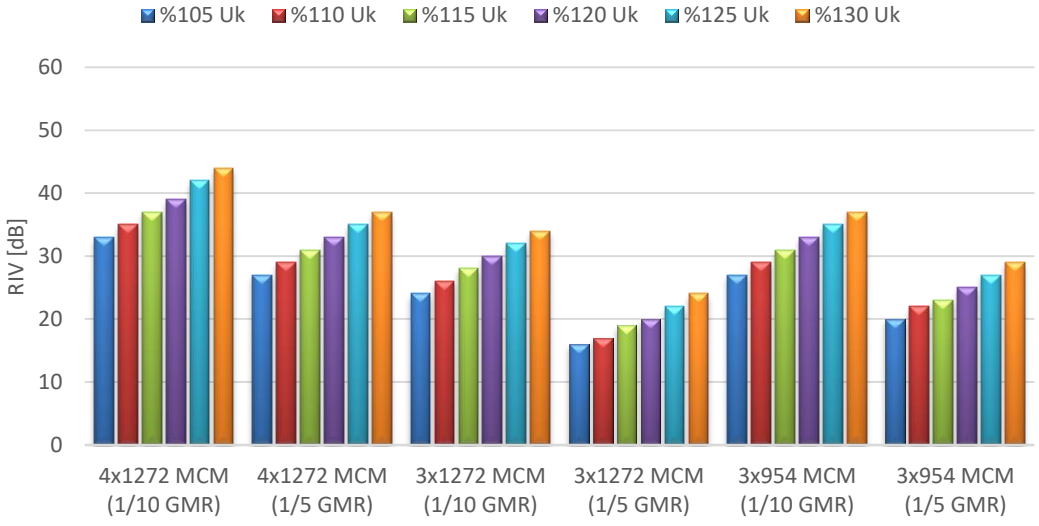
Şekil 4.32: Radyo girişiminin iletken konfigürasyonu ile değişimi (pozitif DC).

Şekil 4.32'de 1/5 GMR ölçeklemesi için farklı pozitif doğru gerilimlerde hesaplanmış radyo girişimleri verilmiştir. Gerilim artışı ile birlikte radyo girişimi artmaktadır. Şekle göre demetteki iletken sayısı arttıkça RIV değerleri artmaktadır.

Demet iletkenlerin radyo girişimi karakteristikleri, her iki polarite için de Şekil 4.33'te verilmiştir. Şekle bakıldığında, gerilim artışı ile birlikte radyo girişimi artmaktadır. Hesaplanan RIV değerlerinin, pozitif gerilimde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni korona başlangıç geriliminin pozitifte daha yüksek olması ve dolayısı ile elde edilen elektrik alan şiddetlerinin de yüksek olmasıdır.



a



b

Şekil 4.33: Radyo girişiminin demet iletken yapısında değişimi a) pozitif DC b) negatif DC.

Demet yapısına bakıldığında, iletken sayısı fazla olan yapılarda RIV daha yüksek olmaktadır. Aynı demet yapısında alan şiddetlerinin yüksek olduğu küçük ölçeklemede (1/10 GMR) RIV değerleri yüksektir. 3'lü yapılara bakıldığında aralarında çok fark olmadığı görülmektedir. Bunun nedeni yapılan ölçeklemede demet açıklıklarının bu yapılarda birbirine yakın olması nedeniyle gerilimlerin ve alan şiddetlerinin arsındaki farkların az olmasıdır.

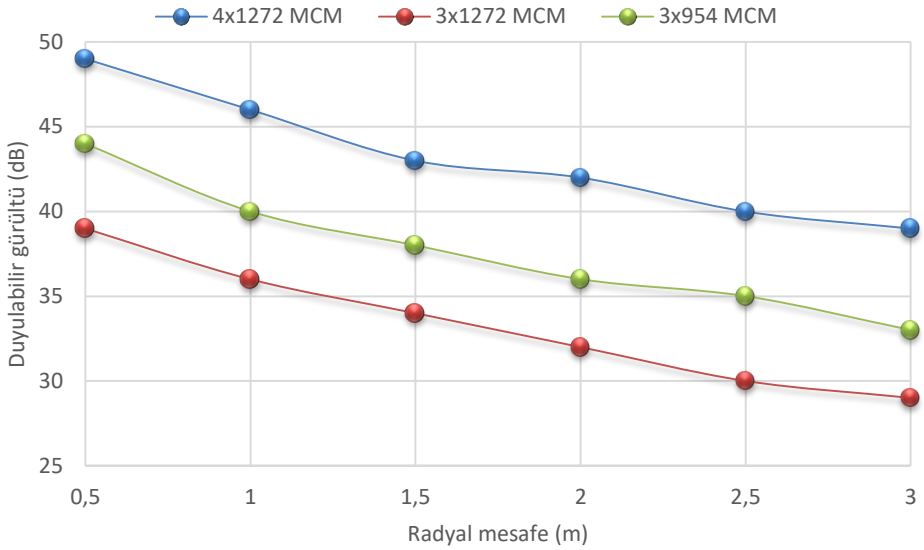
4.3.5 Duyulabilir gürültü (AN)

Deney verileri ve formül 4.2 kullanılarak, kafesten 1 m radyal uzaklıkta hesaplanan gürültü değerleri Çizelge 4.15'te verilmiştir. EK C4'te ise hesapları yapılmış bütün konfigürasyonlara ilişkin değerler bulunmaktadır. Negatif doğru gerilimde hesaplanan değerler pozitifte hesaplanan değerlerden daha küçük olmaktadır.

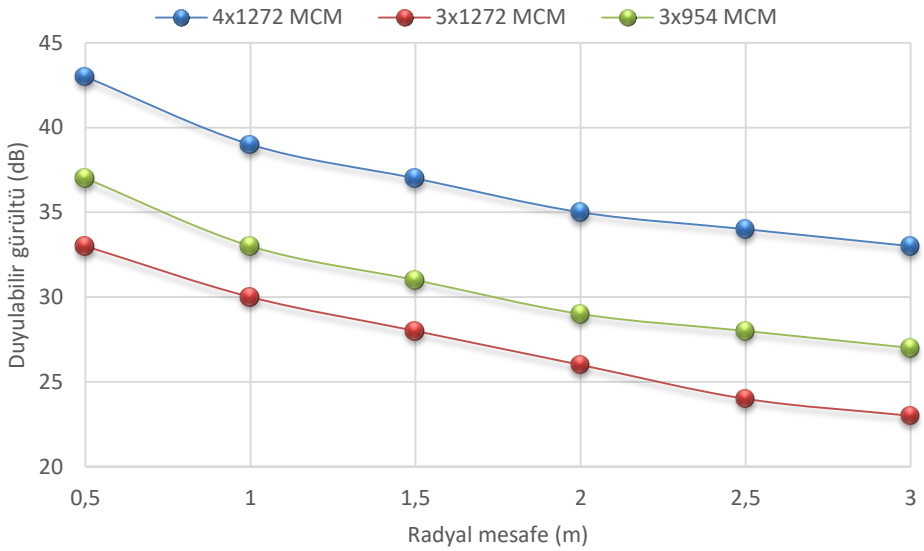
Çizelge 4.15: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için AN sonuçları.

AN [dB]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	33	27
%110 Uk	35	29
%115 Uk	37	31
%120 Uk	40	33
%125 Uk	42	35
%130 Uk	44	37

Şekil 4.34'te korona başlangıç gerilimlerinin %20 üzerinde bir deney geriliminde, iletkenlerin 1/10 GMR ölçekli konfigürasyonlarda, farklı uzaklıklar için hesaplanmış gürültü düzeyleri görülmektedir. Duyulabilir gürültü uzaklık ile birlikte azalmakla birlikte; konfigürasyon olarak bakıldığında, gürültü düzeyinin en fazla olduğu 4'lü yapıdır. 3'lü demetler arasındaki duruma bakıldığında ise, demet açıklığı daha fazla olan konfigürasyonda gürültü düzeyi daha düşük elde edilmiştir.



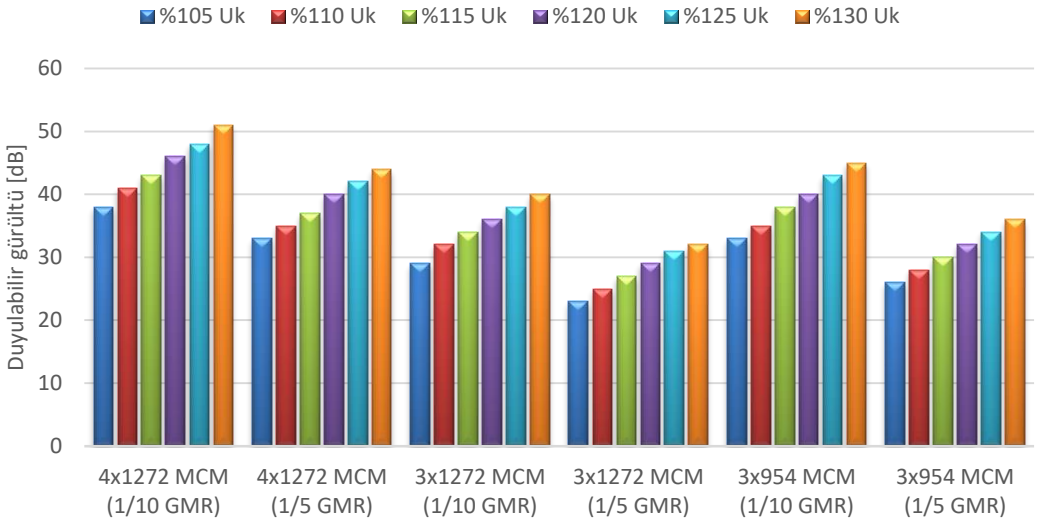
a



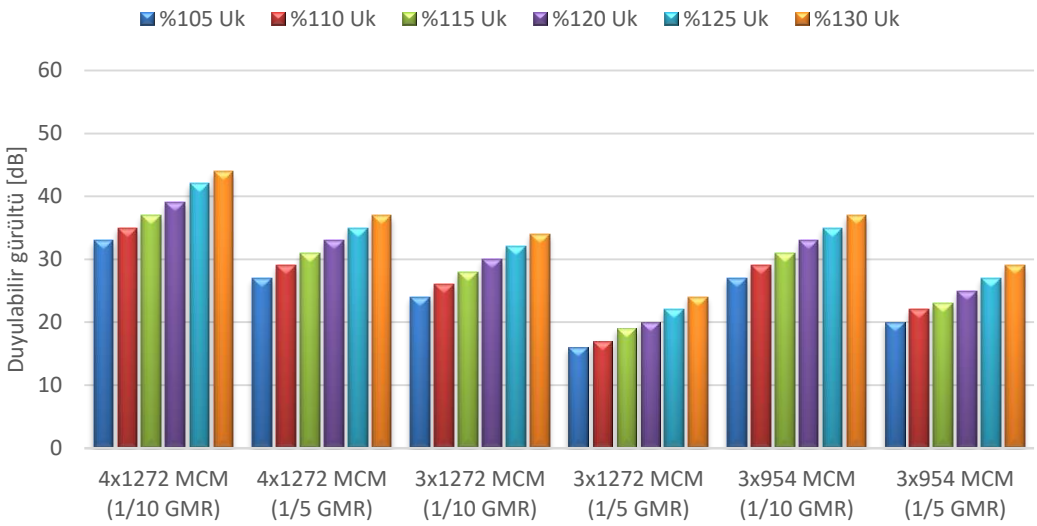
b

Şekil 4.34: Duyulabilir gürültünün uzaklık ile değişimi a) pozitif DC gerilimler, b) negatif DC gerilimler.

Şekil 3.35'te, bütün iletken konfigürasyonları ve gerilimleri için hesaplanmış duyulabilir gürültü değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde, pozitif gerilimde oluşan gürültünün negatiftekilerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Demet yapısında, demetteki iletken sayısı arttıkça gürültü düzeyi de artmaktadır. Şekil ayrıca, aynı konfigürasyonda ölçeklemenin etkisini de göstermektedir. Özellikle 4'lü demet iletken yapısında, daha küçük ölçekte, demet açıklığı daha küçük olduğu ve deney gerilimi daha yüksek olduğundan gürültü değerleri daha yüksek olmaktadır. Bu etki demet açıklığının birbirine yakın olduğu 3'lü demet iletkenlerde daha azdır.



a



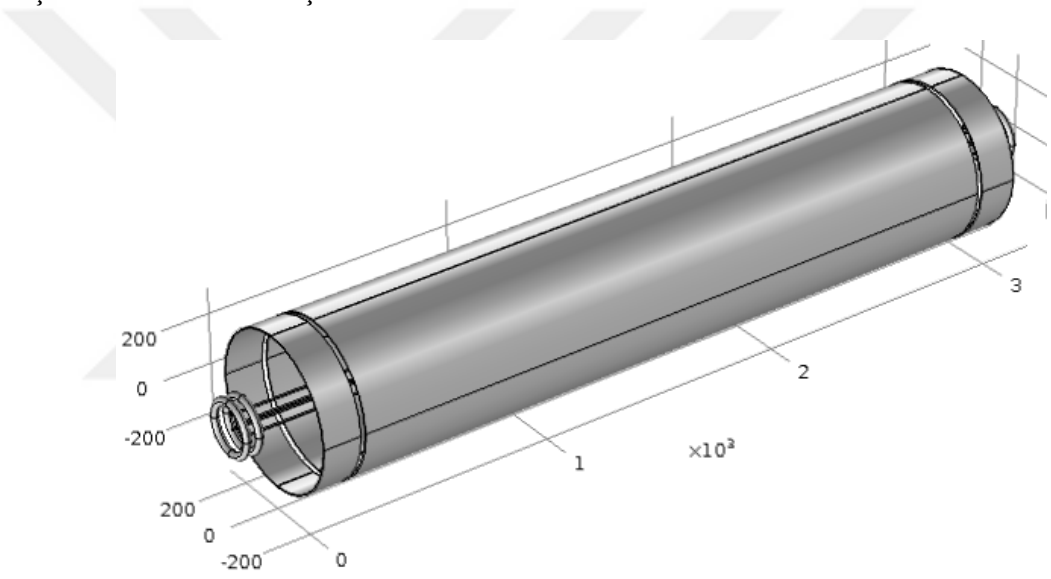
b

Şekil 4.35: Radyo girişiminin demet iletken yapısında değişimi a) pozitif DC b) negatif DC.

5. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ ÇALIŞMALARI

5.1 2.7 m, 60 cm Çaplı Korona Kafesi Analizleri

Yapılan hesaplamalara bakıldığında, ifadelerin iletken yüzeylerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetine bağlı oldukları görülmektedir. Bu nedenle, deneyi yapılan her bir iletken konfigürasyonu için ayrıca elektrik alan analizleri yapılmış ve hem korona başlangıç gerilimindeki elektrik alan şiddetleri, hem de farklı gerilimlerdeki alan şiddetleri elde edilmiştir.

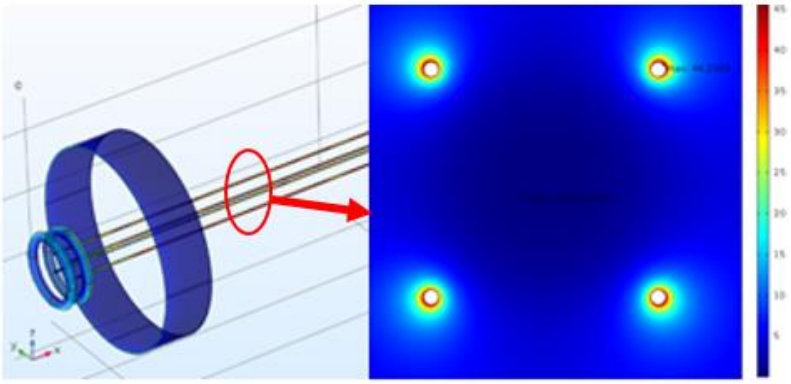


Şekil 5.1: Küçük boyutlu korona kafesinin sonlu elemanlar modeli.

Şekil 5.1'de küçük boyutlu korona kafesinin analizde kullanılan 3D modeli görülmektedir. Özellikle demet yapısında eksenel simetri olmaması nedeniyle, iki boyutlu model kullanılmamış, 3D model tercih edilmiştir. Deney koşullarına uygun olması açısından, iletkenlerin sonlandırıldığı korona halkaları ve ölçme kısmı ile koruma elektrotları arasındaki yalıtkan ortam da modele eklenmiştir.

Elektrik alan analizleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanan Comsol Multiphysics paket programı kullanılarak yapılmıştır. Kafes içerisindeki iletken konfigürasyonlarına gerilim uygulanırken, kafesin tamamı topraklanmıştır. Üç boyutlu model ile yapılan analizler sonunda, iletken yüzeylerindeki maksimum elektrik alan şiddetleri elde

edilmiştir. Bu model kullanılarak yapılan 4x1272 MCM yapısına ilişkin alan dağılımı Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2: 4x1272 MCM iletken için iletken çevresindeki elektrik alan dağılımı.

100 kV'a kadar olan deney gerilimleri için, tekil iletken yapısında belirlenmiş elektrik alan şiddeti değerleri Çizelge 5.1'de görülmektedir. Demet iletken sonuçları ise EK B'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Tekil iletken benzetimlerinde elde edilen maksimum elektrik alan şiddetleri.

	E [kV/cm]		
Deney gerilimi [kV]	4 mm	7 mm	7.14 mm
10	9.96	6.42	8.77
20	19.93	12.85	17.55
30	29.89	19.27	26.32
40	39.86	25.69	35.1
50	49.82	32.11	43.87
60	59.78	38.54	52.65
70	69.75	44.96	61.42
80	79.71	51.38	70.2
90	89.68	57.8	78.97
100	99.64	64.23	87.75

Çizelgeden görüleceği gibi, tekil iletken durumunda, maksimum elektrik alan şiddetleri, küçük deney gerilimlerinde, havanın delinme alan şiddetinin (30 kV/cm) üzerine çıkmaktadır. Bu değerleri veren gerilimlerin üzerine çıkıldığında koronanın başlayacağı düşünülse de deneysel sonuçlara bakıldığında koronanın, bu gerilim düzeylerinden daha yüksek değerlerde başladığı belirlenmiştir. Bu nedenle korona başlangıç gerilimleri deneysel olarak belirlenmiş ve bu gerilimlerde yapılan benzetimler sonucu iletken yüzeyinde oluşan elektrik alan şiddeti, korona başlangıç alan şiddeti olarak varsayılmıştır.

Çizelge 5.2: Tüm iletken yapıları için korona başlangıç alan şiddetleri.

	İletken	Negative DC		Positive DC	
		Korona başlangıç gerilimi [kV]	Korona başlangıç elektrik alanı [kV/cm]	Korona başlangıç gerilimi [kV]	Korona başlangıç elektrik alanı [kV/cm]
tekil	4 mm	43	42,84	53	52,81
	7 mm	70	44,96	75	48,17
	7,14 mm	55	48,26	63	55,28
2'li demet	2 cm	65	49,69	68	51,98
	4 cm	55	42,88	66	51,46
	6 cm	40	32,11	62	49,77
3'lü demet	2 cm	70	44,4	82	52,01
	4 cm	66	42,63	78	50,38
	6 cm	57	38,48	76	51,31
4'lü demet	2 cm	87	47,76	92	50,51
	4 cm	81	45,6	87	48,98
	6 cm	77	46,17	83	49,77

Çizelge 5.2'de, deneyi yapılan bütün durumlar için analizler sonucu elde edilmiş korona başlangıç elektrik alan şiddetleri pozitif ve negatif polariteler için verilmiştir. Çizelgeden görülebileceği gibi, koronanın başlaması için gerekli olan elektrik alan şiddeti, iletken yapısına bağlı olarak 32 kV/cm ile 55 kV/cm arasında değişmektedir.

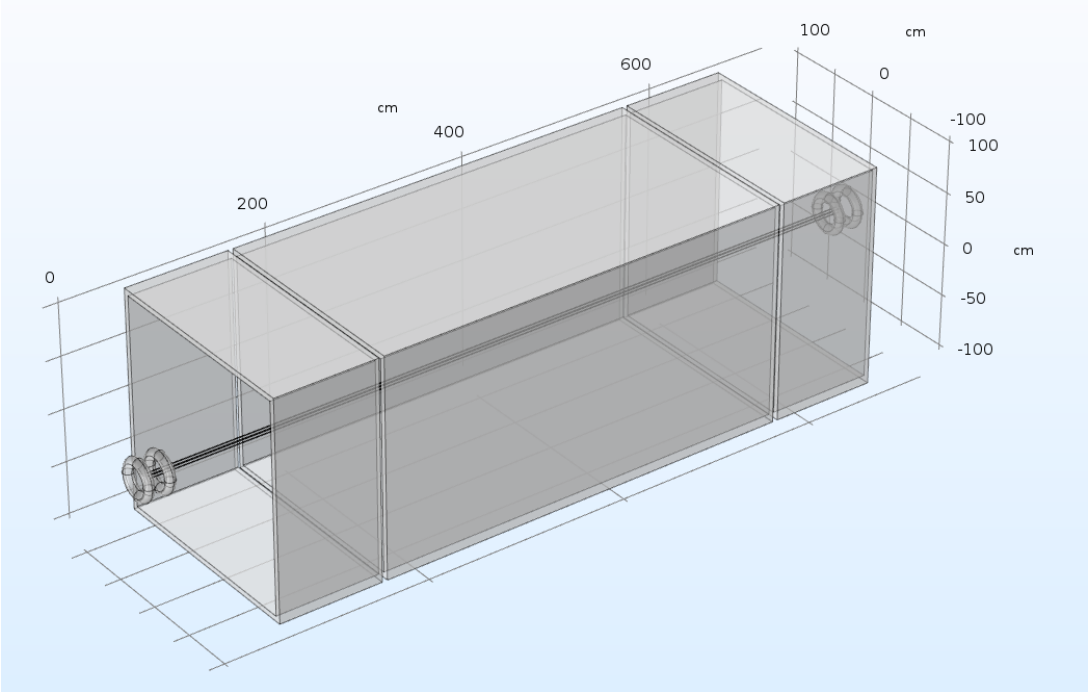
5.2 6 m, 2x2 m Kesitli Korona Kafesi Analizleri

Büyük boyutlu korona kafesinde, deneysel çalışmalar sonrasında hem gerekli hesaplamalar için, hem de alan dağılımlarını görebilmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun için, iletken konfigürasyonlarına ilişkin kafes ortamında sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuştur. Bu yapılırken kafes gerçek boyutları ile 3D olarak modellenmiştir. Kafes tasarımı daha önce 3. Bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Özetlemek gerekirse tasarlanan kafesin özellikleri şu şekildedir:

- Kafes kesiti: kare
- Kenar uzunlukları: 2 m x 2 m
- Ölçme kısmının uzunluğu: 4 m
- Koruma elektrotlarının uzunlukları: 1 m

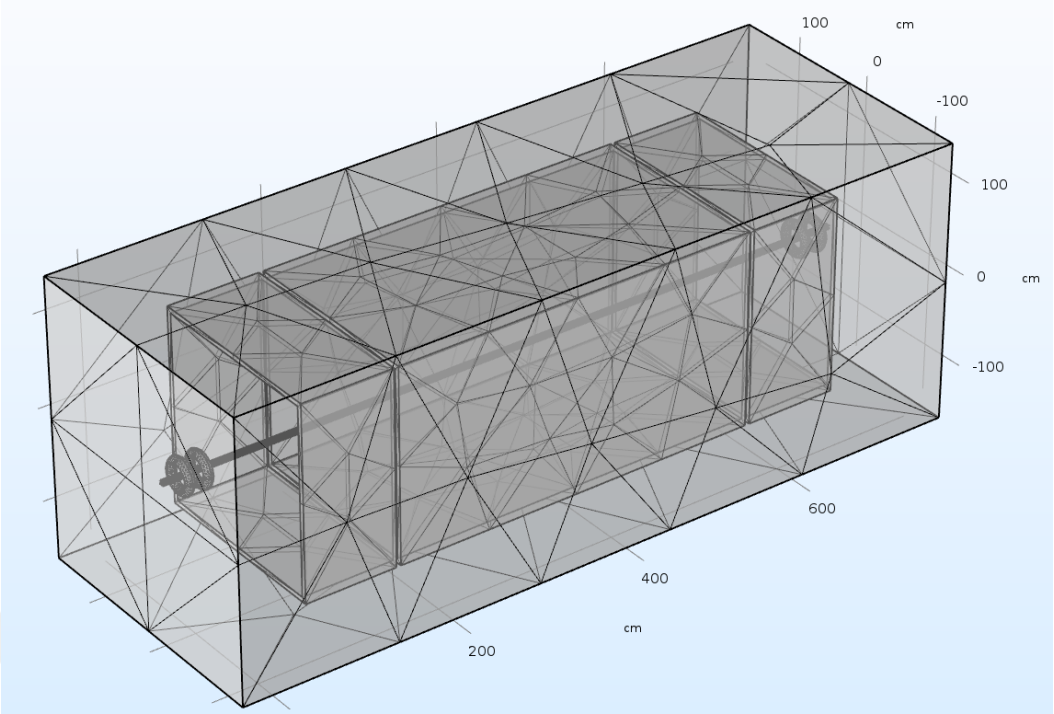
- Toplam kafes uzunluğu: 6 m



Şekil 5.3: Büyük boyutlu korona kefesinin 3D FEM modeli.

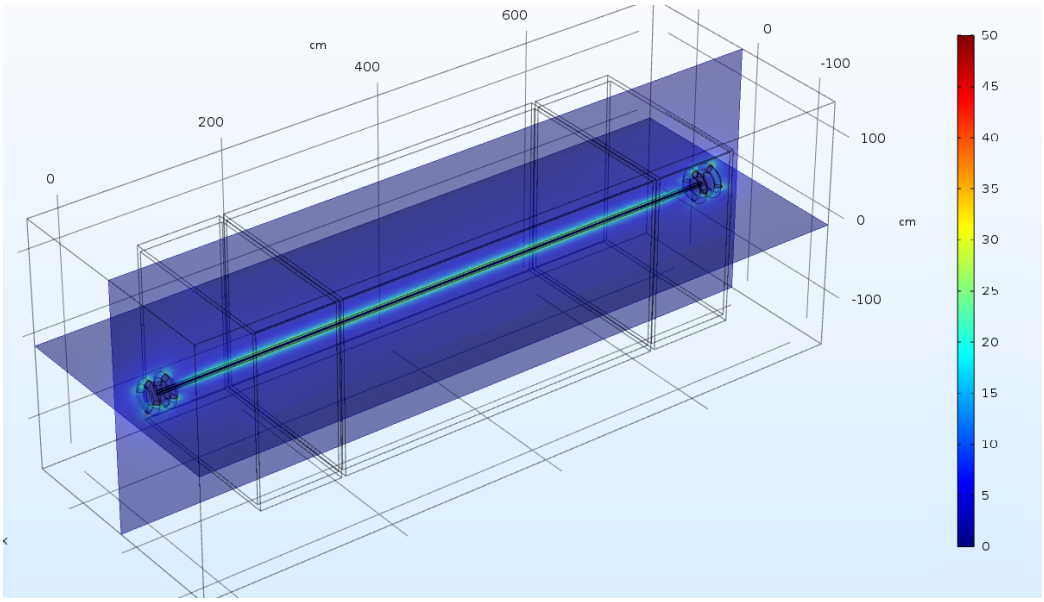
Tasarlanan bu korona kafesinde, ilk olarak model iletken deneyleri yapılacaktır. Bu amaçla ölçeklenmiş iletkenler kullanılarak elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'te 4x1272 MCM konfigürasyonunun 1/10 GMR ölçeklenmiş modelinin analizi için hazırlanmış olan geometri görülmektedir. Kafes, gerçek durumda olduğu gibi, ölçme ve koruma elektrotları birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış olacak şekilde modellenmiştir. İletkenler, kafesin tam ortasına konumlandırılmıştır. Uç noktalardaki kenar etkilerini azaltmak ve bu noktalarda koronanın olmasını engellemek için iletken sonlandırmalarında korona halkaları kullanılmıştır.

Analizler sırasında, iletkenlere yüksek doğru gerilim uygulanmış, kafesin üç bölümü de topraklanmıştır. Analiz edilecek olan yapı çok büyük olduğu için, analiz süresini kısaltmak için, iletken ve çevresine sık bir ağ yapısı, geri kalan kafes ve dış ortam bölümlerine ise daha seyrek bir ağ yapısı atanmıştır (Şekil 5.4). Bu analizlerde önemli olan iletken yüzeyindeki alan şiddetlerinin elde edilmesi olduğu için, özellikle iletken yüzeyindeki ağ yapısının çok iyi olması gerekir.

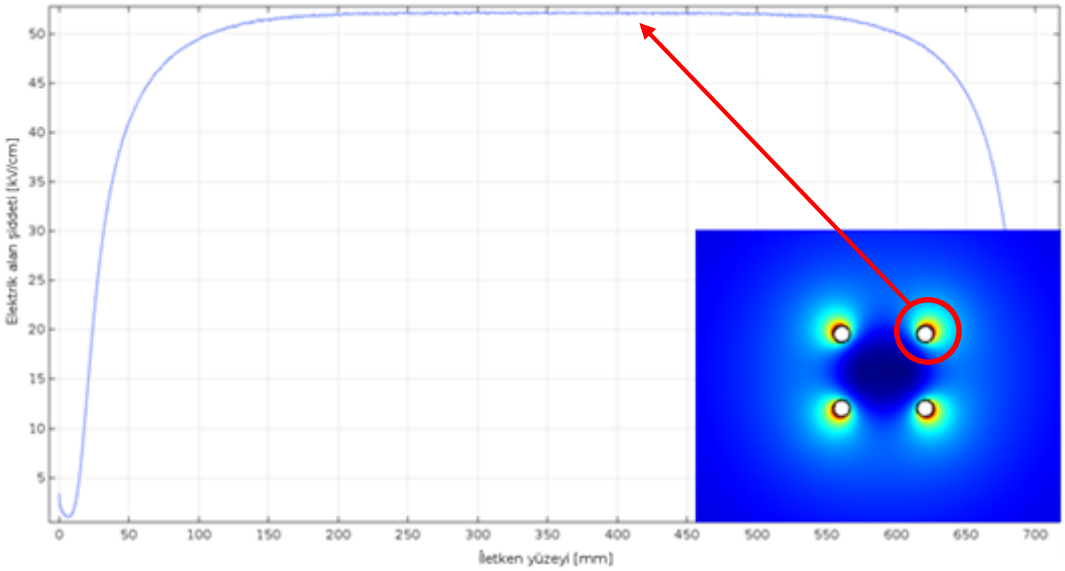


Şekil 5.4: Büyük boyutlu korona kefesinin sonlu ağ modeli.

Şekil 5.5'te ve Şekil 5.6'da 4x1272 MCM swallow iletken kullanılarak yapılmış 1/10 GMR ölçeğindeki modelin 200 kV deney gerilimi altında elde edilmiş olan elektrik alan dağılımı görülmektedir. İletken yüzeyleri boyunca elektrik alan dağılımına bakıldığında ise ölçme kısmı içerisinde alan dağılımının düzgün olduğu görülmektedir. Oluşturulmuş ağ yapısının doğruluğu bu şekilde kontrol edilebilir.

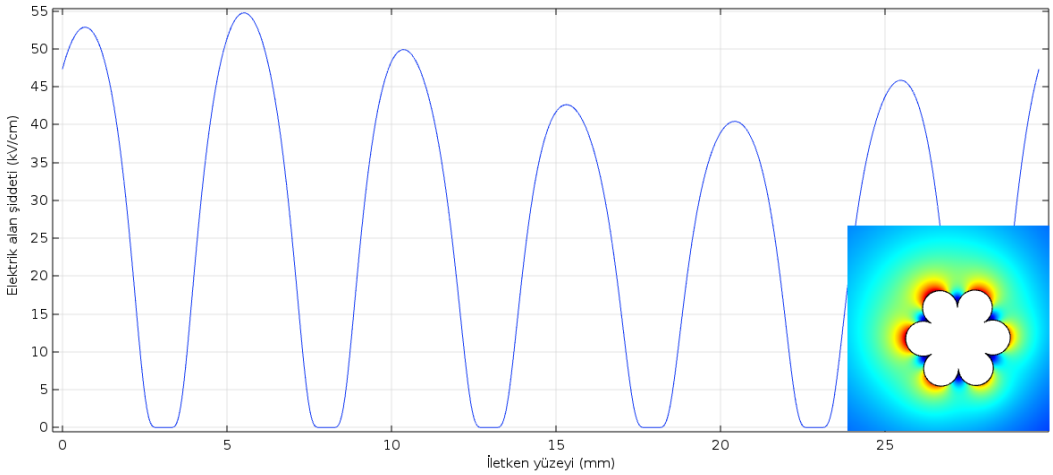


Şekil 5.5: Kafes yapısında iletkenlerdeki elektrik alan dağılımı.



Şekil 5.6: Bir iletken yüzeyi boyunca elektrik alan dağılımı.

Bir iletken çevresinde oluşan elektrik alan dağılımı ise Şekil 5.7'de verilmiştir. Çok telli iletken yapısı nedeniyle, çevresel alan şiddeti değişimi her bir iletkenin yüzeyi boyunca artıp azalış göstermektedir.



Şekil 5.7: İletken yüzeyindeki elektrik alan şiddeti değişimi.

Elektrik alan analizleri bütün 12 konfigürasyon için yapılmıştır. Bu analizler 50 kV ile 200 kV gerilim arasında 50'şer kV adımlarla genişletilmiştir. İletken yüzeylerinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetleri sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3: Ölçeklenmiş iletkenlerde oluşan elektrik alan şiddetleri.

			Elektrik alan şiddetleri [kV/cm]			
		Gerilim [kV]	50	100	150	200
1/10 GMR	Raven	4 x 1272 MCM	10.3	20.6	30.9	41.3
		3 x 1272 MCM	12.2	24.5	36.7	48.9
		3 x 954 MCM	12.3	24.6	36.9	49.3
	Swallow	4 x 1272 MCM	12.8	25.6	38.4	51.3
		3 x 1272 MCM	15.1	30.1	45.2	60.2
		3 x 954 MCM	15.1	30.2	45.3	60.4
1/5 GMR	Raven	4 x 1272 MCM	9.8	19.7	29.5	39.4
		3 x 1272 MCM	11.4	22.8	34.2	45.7
		3 x 954 MCM	11.4	22.9	34.3	45.7
	Swallow	4 x 1272 MCM	12.8	25.7	38.5	51.3
		3 x 1272 MCM	15.1	30.2	45.3	60.5
		3 x 954 MCM	14.9	29.8	44.7	59.6

Bu analizler, deneysel olarak belirlenen korona başlangıç gerilimleri için tekrar edilmiş ve korona başlangıç elektrik alan şiddetleri elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde, ölçme segmentindeki iletken yüzeylerindeki maksimum elektrik alan şiddetleri pozitif ve negatif doğru gerilimler için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çizelge 5.4'te hesaplanmış bu değerler bulunmaktadır. EK D'de ise diğer konfigürasyonlar için elde edilmiş maksimum alan şiddetleri verilmiştir. Çizelgeye göre korona başlangıç elektrik alan şiddetleri pozitif doğru gerilimde negatif doğru gerilimlerden daha yüksek olmaktadır.

Çizelge 5.4: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için max. elektrik alan hesabı.

	Pozitif DC		Negatif DC	
	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]
Uk	155	54.72	136	48.01
%105 Uk	162.75	57.45	142.8	50.41
%110 Uk	170.5	60.19	149.6	52.81
%115 Uk	178.25	62.92	156.4	55.21
%120 Uk	186	65.66	163.2	57.61
%125 Uk	193.75	68.39	170	60.01
%130 Uk	201.5	71.13	176.8	62.41

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, yüksek doğru gerilimde korona olayı deneysel olarak incelenmiş ve karakteristikleri elde edilmiştir. Çalışmanın bütünlüğü açısından, Türkiye ulusal elektrik iletim şebekesi incelenmiş ve 3000 MW'lık gücü 1000 km uzaklığa iletecek bir 500 kV ve 600 kV iki kutuplu HVDC iletim hattı tasarımı yapılmıştır. Bu tasarım yapılırken AC sistemin kurulu olduğu hat güzergâhları referans alınmıştır. Bu sistemin elektriksel özellikleri (hat kayıpları, gerilim düşümü, korona kayıpları, elektrik alan şiddetleri) üç farklı iletken konfigürasyonu (4x1272 MCM, 3x1272 MCM, 3x954 MCM) ve dört farklı iletken tipi (ACSR, ACSR/TW, AAC VE AAAC) için ayrı ayrı hesaplanıp sonuçlar karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Bu hesaplamaların doğruluğunu arttırmak için akımdan ve ortam koşullarından dolayı oluşan ısınmanın iletken direncine olan etkisi de göz önüne alınmış ve bir günlük yük eğrisi üzerinden gerekli hesaplamalar yapılmıştır.

Tasarlanan sistemin DC korona performansını değerlendirebilmek için, temel korona karakteristikleri olan korona başlangıç gerilimi, korona akımı, korona kaybı, radyo girişim gerilimi (RIV) ve duyulabilir gürültü düzeyinin belirlenmesi gerekir. Bunlar laboratuvar ortamında, korona kafesi kullanılarak daha düşük gerilimlerde korona elde edilerek yapılır. Karakteristikleri elde edebilmek için, laboratuvarda bulunan mevcut küçük boyutlu (60 cm çaplı ve 270 cm uzunluğunda) kafesin yanında, 2m x 2m kare kesitli ve 6 m uzunluğunda büyük boyutlu bir kafes tasarımı yapılmıştır. Kafes tasarımında sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmış ve kullanılacak olan iletkenlere uygun kesit ve uzunluklar belirlenmiştir. Kafesteki koruma elektrotlarının boyutları da aynı şekilde belirlenip tasarıma eklenmiş ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Kafes tasarımı yapıldıktan sonra, deneylerde kullanılacak olan model iletkenlerin seçimleri yapılmıştır. Küçük boyutlu kafes için gerilim düzeyini de aşmamak için daha ince tek telli iletkenler (4mm çaplı) seçilirken, büyük boyutlu kafeste kullanılmak üzere swallow tipi (7.14 mm çaplı) çok telli iletken seçilmiştir. Seçilen swallow iletkenin gerçek sistemde kullanılan konfigürasyonların geometrik

ortalama yarıçaplarının (GMR) belirli oranlarda (1/5 ve 1/10) küçültülmüş modelleri olacak şekilde demet açıklıkları belirlenmiştir.

Deneysel çalışmada, küçük kafes kullanılarak 4 mm çaplı iletkenlerin tekli, 2'li, 3'lü ve 4'lü demet yapıları kullanılmıştır. Ortam koşulları (sıcaklık ve bağıl nem) sabit kalmak koşuluyla, ilk önce korona başlangıç gerilimleri pozitif ve negatif gerilimlerde belirlenmiş; daha sonra 100 kV düzeyine kadar belirli aralıklarla gerilim yükseltilerek korona akımları ölçülmüştür. Ölçülen bu değerlerden korona kayıpları hesaplanmıştır. RIV ve AN değerleri ise, literatürde kullanılan hesap yöntemleri ile elde edilmiş ve bütün sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Büyük kafes deneylerinde de benzer bir yol izlenmiştir. Burada farklı olarak, gerilim düzeyleri çok daha yüksek ve konfigürasyonlar farklı olduğu için, alınan değerler korona başlangıç gerilimlerinin belirli yüzdeleri şeklinde (korona başlangıç gerilimini %10, %15, %20, %25 ve %30 fazlası) uygulanarak elde edilmiştir.

Kafes deneylerindeki karakteristiklerin hesaplamalarında gerekli olan iletken yüzeyi maksimum elektrik alan şiddetleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Kafes büyüklükleri ve kullanılan iletken konfigürasyonları eksenel simetriyi bozduğu için 3D modellemeler yapılmış ve her deneyde uygulanan gerilim için ayrı bir analiz yapılarak her duruma ait iletken yüzeyinde oluşan maksimum elektrik alan şiddetleri elde edilmiştir. Bu analizler ve deneysel sonuçlar birleştirilerek korona başlangıç alan şiddeti (CIVG) her durum için hesaplanmıştır.

Yapılan HVDC iletim sistemi tasarımı hesaplarına göre, hat kayıpları açısından en uygun konfigürasyon 600 kV'luk iki kutuplu sistemde ACSR ve ACSR/TW iletkenlerle 4'lü demet yapısıdır. Gerilim düşümü açısından bakıldığında da aynı konfigürasyonun diğerlerine göre daha iyi olduğu görülmektedir. Korona kayıpları söz konusu olduğunda, 3x954 MCM yapısı en uygun olmaktadır. Son olarak maksimum elektrik alan analizleri karşılaştırıldığında 500 kV'luk 4x1272 MCM iletken en düşük alan şiddetini vermektedir.

İletken sıcaklığına bağlı hesaplara bakıldığında, sıcaklık artışı ile birlikte artan direnç nedeniyle gerilim düşümü ve kayıp değerleri artmaktadır. Burada doğru bir sonuca varabilmek için artış oranlarına bakılmalıdır. Artış oranlarına bakıldığında, yeni nesil iletkenlerden olan AAC'de ve AAAC'de bu artışların daha az olduğu görülmektedir. Bu da özellikle yüksek akım ve güç iletimi uygulamalarında sıcaklığa bağlı kayıp artışının uzak mesafeler söz konusu olduğunda ACSR gibi geleneksel iletkenlerden daha az olmasına ve daha ekonomik olmasına yol açar.

Küçük boyutlu korona kafesi ile yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre, iletken ve demetteki korona başlangıç gerilimi, iletken yüzeyindeki elektrik alan şiddetine bağlıdır. İletken çapı büyüdükçe iletkendeki alan şiddeti azaldığı için korona başlangıç gerilimi yükselmektedir. Benzer şekilde demetteki iletken sayısı da korona başlangıç geriliminde belirleyici roldedir. Demetteki iletken sayısı arttıkça korona başlangıç gerilimi artmaktadır. Sonlu yapıya sahip olan kafes içerisindeki demet iletken yapısı, eş-eksenli silindirsel elektrot sisteminden farklı davranmaktadır. Analiz ve deney sonuçları göstermiştir ki, denet açıklıkları ile korona başlangıç gerilimi arasında ters orantı bulunmaktadır. Topraklanmış kafes ile gerilim altındaki iletkenler arasındaki yakınlık etkisinden dolayı, demet açıklığı arttıkça, iletken yüzeyinde oluşan maksimum elektrik alan şiddeti artmakta ve bu nedenle korona başlangıç gerilimi artan uzaklık ile azalmaktadır. Polarite karşılaştırması yapıldığında, negatif korona başlangıç gerilimleri aynı sistemler için pozitif olanlardan daha küçük olmaktadır. Korona başlangıç alan şiddetlerine bakıldığında ise korona başlangıç gerilimi sonuçlarını doğrular şekilde negatifteki alan şiddetlerinin pozitifte olanlardan daha küçük oldukları görülmektedir.

Bu etkiler göz önüne alındığında, korona akımları, pozitif ve negatif doğru gerilimde farklılık göstermektedir. Gerilim artışı ile birlikte artma eğilimi gösteren korona akımında, korona başlangıç gerilimi negatif doğru gerilimde pozitiften daha küçük olduğu için aynı gerilimde elde edilen korona akım değerleri negatif gerilimlerde daha yüksek olmaktadır. Demet yapısının korona akımına etkisine bakıldığında ise büyük açıklıklarda korona akımı daha yüksek, küçük açıklıklarda ise korona akımının değeri daha düşüktür.

Korona kayıpları, korona akımları ile doğru orantılı şekilde değiştiğinden karakteristikte negatif doğru gerilimdeki korona kayıpları pozitiftekilerden daha yüksektir. Bunun yanında korona kayıpları iletken kalınlaştıkça azalmakta, demetteki iletken sayısı azaldıkça da artmaktadır. Demet açıklığı arttıkça ise, kayıplar artış göstermektedir.

Radyo girişim gerilimi hesapları, doğrudan elektrik alan şiddeti ile bağlantılı olduklarından, yapılan hesaplamalara bakıldığında iletken çapı arttıkça RIV değerleri azalmaktadır. Benzer şekilde demet iletken yapısında iletken sayısı arttıkça da radyo girişimi azalmaktadır. Alan şiddeti arttıkça RIV büyüdüğü için, yüksek alan şiddeti oluşturan büyük açıklıklarda RIV değerleri daha yüksek olmaktadır.

Duyulabilir gürültü açısından bakıldığında, RIV ile benzer özellik gösterdiği gözlenmiştir. Duyulabilir gürültü gerilim arttıkça artmakta, kaynaktan radyal olarak uzaklaştıkça ise azalmaktadır. Ayrıca, aynı gerilim düzeyinde, kalın iletkenlerde gürültü değeri daha yüksek olmaktadır. Demet yapısında ise, değerler birbirine yakın olmakla birlikte iletken sayısı arttıkça azalış, demet açıklığı küçüldükçe ise artmaktadır.

Büyük boyutlu korona kafesinde yapılan çalışmalar da küçük boyutlu kafeste yapılan çalışmaları destekler niteliktedir. Korona başlangıç gerilimi karşılaştırmalarına bakıldığında, dörtlü demet iletkenlerde koronanın daha geç başladığı görülmektedir. Ayrıca, aynı konfigürasyonda daha ince iletken kullanıldığında, sonlu kafes yapısında alan şiddetleri düştüğü için korona başlangıç gerilimi yüksek olmaktadır. Aynı durumdan ötürü daha küçük ölçekte (1/10 GMR) korona başlangıç gerilimi daha büyük olmaktadır. Ayrıca polariteye bakıldığında koronanın negatif gerilimde daha erken başladığı görülmektedir.

Korona akımlarının büyük kafes deneylerinde artan gerilim ile birlikte genlikleri de artmaktadır. Yapılan model konfigürasyonlarından elde edilen sonuçlara göre dörtlü demet iletkende elde edilen akım değerleri üçlü demet iletkenlerle elde edilenlerden daha yüksektir. Bütün konfigürasyonlar için negatif gerilimde korona akımları pozitifte olanlara göre daha yüksek olmaktadır. Ölçeklemenin korona akımı üzerine etkisine bakıldığında ise daha küçük ölçeklemede (1/10 GMR) korona akımları daha büyük olmaktadır.

Her konfigürasyon için deneysel sonuçlara göre hesaplanmış km başına korona kayıpları karşılaştırıldığında negatif gerilimde kayıpların -korona akım değerlerinin daha yüksek olması sebebiyle- daha yüksek olduğu görülmektedir. Korona kayıpları 4'lü demet iletken yapısında diğerlerinden daha büyük olmaktadır. Bunun yanında aynı ölçeklemede 954 MCM modelinde kayıp değerleri 1272 MCM modeline göre daha büyük olmaktadır. Aynı iletken konfigürasyonu için küçük olan ölçekte hesaplanan kayıplar büyük ölçeğe göre daha büyük olmaktadır.

Büyük kafes kullanılarak yapılan deneysel çalışmada elde edilen RIV sonuçlarına bakıldığında pozitif doğru gerilimde elde edilen değerlerin negatifte elde edilenlerden daha büyük olduğu görülmektedir. Ölçekleme karşılaştırmalarına bakıldığında her iki polarite için de daha küçük ölçekte RIV değerleri daha büyük olmaktadır. Demet iletken yapısı radyo girişimini doğrudan etkilemektedir. Yapılan hesaplamalara göre 4'lü demet iletken yapıda daha yüksek RIV değerleri elde edilmektedir. 3'lü yapı kendi

içerisinde karşılaştırıldığında ise demet açıklığı daha küçük olan modellerde diğerine göre daha yüksek RIV değerleri hesaplanmaktadır.

Duyulabilir gürültü kaynaktan radyal olarak uzaklaştıkça azalarak değişmekle birlikte incelenen konfigürasyonlar arasında 4'lü demet iletkende diğerlerinden daha yüksek çıkmaktadır. RIV değerleri ile tutarlı olarak 3'lü demet yapıları arasında demet açıklığı daha küçük olanda yüksek, uzaklığı büyük olanda ise daha düşük olmaktadır. Aynı konfigürasyon ve gerilim değeri için daha küçük ölçekte duyulabilir gürültü daha büyük olmaktadır.

İki ayrı kafeste (büyük ve küçük boyutlu), farklı yapıdaki (tekil ve çok telli) ve farklı konfigürasyonlardaki (tekli ve demet yapı) yapılan bütün deneysel çalışmalara bakıldığında polarite etkisi, demet yapı etkisi, ölçekleme etkisi gibi durumların benzer sonuçlar ortaya koyduğu ve kendi içlerinde tutarlı oldukları görülmektedir. Bazı sonuçlarda meydana gelen farklılıkların tam olarak kontrol edilemeyen etmenler (ortam koşulları, iletken yüzey pürüzlülüğü, ölçüm sistemi belirsizliği gibi) tarafından oluştuğu düşünülmektedir.

Bütün bu korona karakteristikleri ve hesaplamalar, ileride Türkiye için yapılacak olan olası bir HVDC iletim hattı tasarımında göz önüne alınması gerekir. Yük eğrisine uygun olarak hesaplanmış hat kayıplarının ve korona kayıplarının toplamı bir tasarım kriteri olarak kullanılabilir. Gerilim düzeyi, iletken tipi/çapı ve demet konfigürasyonu ile ilgili son karar verilirken bu ve bunun gibi kriterlere (gerilim düşümü, iletim maliyetleri gibi) bakılabilir. Hatlar arasındaki kritik uzaklıklar belirlenirken bunlar dışında RIV ve AN değerlerine de bakılmalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Jaiswal, V., & Joy, T.** (2003). Finite element modelling of ionized field quantities around a monopolar HVDC transmission line, *Journal of Physics, Applied Physics, 36* (23), 3089-3094.

[2] **Al-Hamouz, Z.M.** (2002). Corona power loss, electric field, and current density profiles in bundled horizontal and vertical bipolar conductors, *IEEE Transactions on Industry Applications,38* (5), 1182-1189.

[3] **Takuma, T., Ikeda, T., & Kawamoto, T.** (1981). Calculation of Ion Flow Fields of HVDC Transmission Lines By the Finite Element Method, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 100* (12), 4802-4810.

[4] **Liu, J., Zou, J., Tian, J., & Yuan, J.** (2009). Analysis of Electric Field, Ion Flow Density, and Corona Loss of Same-Tower Double-Circuit HVDC Lines Using Improved FEM, *IEEE Transactions on Power Delivery, 24* (1), 482-483.

[5] **Al-Hamouz, Z.** (1998). Finite element computation of corona around monopolar transmission lines, *Electric Power Systems Research, 48* (1), 57-63.

[6] **Abdel-Salam, M., & Abdel-Sattar, S.** (1989). Calculation of corona V-I characteristics of monopolar bundles using the charge simulation method, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 24* (4), 669-679.

[7] **Al-Hamouz, Z.M.** (1999). Corona power loss on bundled conductors: experimental and computational results, *IEEE Transactions on Industry Applications, 35* (6), 1277-1283.

[8] **Maruvada, P.S.** (2012). Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines: Comparison of Calculations and Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery, 27* (1), 401-410.

[9] **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.

[10] **Li, Z. X., Li, G. F., Fan, J. B., Su, Z. Y., & Gu, C.** (2009). Numerical Calculations of Monopolar Corona From the Bare Bundle Conductors of HVDC Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery, 24* (3), 1579-1585.

[11] **Yang, Y., Lu, J., & Lei, Y.** (2008). A Calculation Method for the Electric Field Under Double-Circuit HVDC Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery, 23* (4), 1736-1742.

[12] **Knudsen, N., & Iliceto, F.** (1974). Contribution to the electrical design of HVDC overhead lines, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 93* (1), 233-239.

[13] **Corbellini, U., & Pelacchi, P.** (1996). Corona losses in HVDC bipolar lines, *IEEE Transactions on Power Delivery, 11* (3), 1475-1481.

[14] **Ilhan, S., Font, A., Ozdemir, A., & Espino-Cortes, F.** (2018). Determination of Corona Inception Voltages of Rod-Plane Electrode Systems, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, ATHENS, Greece, pp. 1-4.

[15] **Marčiulionis, P.** (2017) Analysis of Space Charge Distribution in dc Corona Discharge Field Computed With Finite-Element Method, *IEEE Transactions on Plasma Science, 45* (7), 1698-1703.

[16] **Yamazaki, K., & Olsen, R. G.** (2004). Application of a corona onset criterion to calculation of corona onset voltage of stranded conductors, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 11* (4), pp. 674-680.

[17] **Wang, J., Yue, B., Deng, X., Liu, T., & Peng, Z.** (2018). Electric field evaluation and optimization of shielding electrodes for high voltage apparatus in ±1100 kV indoor DC yard, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25* (1), 321-329.

[18] **Yi, Y., Wang, Y., & Wang, L.** (2016). Conductor Surface Conditions Effects on Audible Noise Spectrum Characteristics of Positive Corona Discharge, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 23* (3), 1872-1878.

[19] **Liu, Y, Zhou, L., Liu, Y., Yuan, H., Ji, L., & Wang, Q.** (2016). Analysis on the spectrum characteristic of corona Current and its relationship with Radio Interference on UHVDC transmission line, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 23* (6), 3336-3345.

[20] **Hirsch, F. W., & Schafer, E.** (1969). Progress Report on the HVDC Test Line of the 400 kV- Forschungsgemeinschaft: Corona Losses and Radio Interference, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 88* (7), 1061 -1069.

[21] **Liu, Y., Liu, Y., Yuan, H., & Ji, L.** (2018). Research on the correlation between the frequency-domain characteristics of corona current and A-weighted sound level of audible noise for UHV DC transmission line, *IET Generation, Transmission & Distribution, 12* (11), 2549-2556.

[22] **Zhao, L., Lu, J., Cui, X., Xie, L., Ju, Y., & He, K.** (2017). The Altitude Effect and Correction of Audible Noise for HVDC Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery, 32* (4), 1954-1963.

[23] **Yi, Y., Zhang, C., & Wang, L.** (2016). Time-domain performance of audible noise for positive dc corona: Numerical simulations and measurements, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 23* (6), 3275-3282.

[24] **Xie, L., Zhao, L., Lu, J., Cui, X., & Ju, Y.** (2017). Altitude Correction of Radio Interference of HVDC Transmission Lines Part I: Converting Method of Measured Data, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *59* (1), pp. 275-283.

[25] **Li, X., Cui, X., Lu, T., Wang, J., & Hiziroglu, H. R.** (2018). Experimental Study on Spectral Characteristics of Corona-Generated Audible Noise From a DC Conductor, *IEEE Transactions on Plasma Science*, *46* (10), 3690-3699.

[26] **He, G., *et al*.,** (2019). Impact of Icing Severity on Positive Corona Generated Audible Noise Characteristic of Rime Ice-Covered Conductor, *IEEE Transactions on Industry Applications*, *55* (5), 5269-5276.

[27] **Hedtke, S., Xu, P., Pfeiffer, M., Zhang, B., He, J., & Franck, C. M.** (2019). HVDC Corona Current Characteristics and Audible Noise during Wet Weather Transitions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, (early access).

[28] **Ijumba, N. M., & Britten, A. C.** (2002). Studies of DC conductor corona in a small corona cage, *International Conference on Power System Technology*, 4, 2202-2207.

[29] **Maruvada, P. S., Trinh, N. G., Dallaire, R. D., & Rivest, N.** (1981). Corona Studies for Biploar 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.

[30] **Dallaire, R. D., Maruvada, P. S., & Rivest, N.** (1984). HVDC Monopolar and Bipolar Cage Studies on the Corona Performance of Conductor Bundles, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, *103* (1), 84-91.

[31] **Lekganyane, M., Ijumba, N. M., & Britten, A. C.** (2006). Corona Audible Noise Measurements in a Small Indoor Corona Cage under HVDC Voltages, *International Conference on Power System Technology*, 1, 1-5.

[32] **Otto, A. J., & Reader, H. C.** (2010). Wideband and Narrowband HVDC Conductor Corona Test Methods for Radio Noise Prediction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *25* (4), 2950-2957.

[33] **Nakano, Y., & Sunaga, Y.** (1989). Availability of corona cage for prediction audible noise generated from HVDC transmission line, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *4* (2), 1422-1431.

[34] **Djeumen, J. S., Walker, J. J., &West, N. J.,** (2018). Measurement of Space Charge Distribution in a Corona Cage under Influence of different Atmospheric Conditions, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, ATHENS, Greece, pp. 1-4.

[35] **Yi, Y., Chen, Z. & Wang, L.** (2018). Time-domain virtual EMI receiver model algorithm for corona-originated electromagnetic interference of dc transmission line, *IET Science, Measurement & Technology*, *12* (5), 603-608.

[36] **Maruvada, P. S.** (2017). On the Generation Functions of DC Corona Performance, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *32* (4), 2122-2129.

[37] **Bousiou, E. I., Mikropoulos, P. N., & Zagkanas, V. N.** (2017). Experimental investigation of negative DC corona on conductor bundles: A comparison with positive corona, *52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Heraklion, pp. 1-5.

[38] **Zhao, L., Lu, J., Xie, L., Cui, X., & Ju, Y.** (2018). Study on the Effect of Altitude on the Corona Inception Field and the Ground-Level Total Electric Field Under HVDC Lines Using Bipolar Test Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *33* (6), 3187-3195.

[39] **Mosca, W., Ostano, P., & Rumi, G.** (1971). HVDC visual corona and RIV testing on Insulators and conductor samples, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, *90* (1), 138-145.

[40] **Maruvada, P. S., Trinh, N. G., Dallaire, D., & Rivest, N.** (1977). Corona performance of a conductor bundle for bipolar HDVC transmission at ± 750 kV, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, *96* (6), 1872-1881.

[41] **Zhang, Z., Zeng, R., & Yu, Z.** (2009). Measurement of corona characteristics and Electromagnetc environment of ±800 kV HVDC transmission lines under high altitude condition, *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, 1, 61-65.

[42] **Nakano, Y., & Fukushima, M.** (1990). Statistical audible noise performance of Shiobara HVDC test line, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *5* (1), 290-296.

[43] **Corbellini, U., & Pelacchi, P.** (1996). Corona losses in HVDC bipolar lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *11* (3), 1475-1481.

[44] **Liu, Y., Zhou, L., Liu, Y., Yuan, H., & Ji, L.** (2017). Method for calculating corona inception voltage of ultra-high-voltage direct current transmission lines with frequency-domain characteristics of corona current, *IET Generation, Transmission & Distribution*, *11* (15), 3783-3790.

[45] **Mikropoulos, P. N. & Zagkanas V. N.** (2016). Negative DC corona inception in coaxial cylinders under variable atmospheric conditions: A comparison with positive corona, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *23* (3), 1322-1330.

[46] **Xuebao, L., Xiang, C., Luxing, Z., Tiebing, L., Jiayu, L. & Zhenguo, W.**, (2014). Analysis of positive DC corona inception voltage of stranded conductor at different altitudes, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Des Moines, IA, 2014, pp. 538-541.

[47] **Bian, X., Wang, L., Liu, Y., Yang Y., & Guan, Z.** (2013). High Altitude Effect on Corona Inception Voltages of DC Power Transmission Conductors Based on the Mobile Corona Cage, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *28* (3), 1971-1973.

[48] **Wenger, P., Madhar, S. A., & Beltle, M.** (2019). Simultaneous Electrical, UHF, Current and Optical PD Measurements on Floating Potential under DC Stress, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Richland, WA, USA, pp. 287-290.

[49] **LI, Y., LI, X., Zhang, Q., & LU, T.** (2018). Experimental Investigation on the Influence of AC Voltage on Positive Corona Current Pulses from DC Conductor Parallel with AC Conductor, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Cancun, pp. 457-460.

[50] **Suganuma, R., Kawasaki, S., & Yasuoka, K.** (2019). Disinfection by HO2 Radicals Generated by Negative Corona Discharge on Acidic Solution, *IEEE Transactions on Plasma Science*, *47* (1), 346-349.

[51] **Dezenzo, T., Betz, T., & Schwarzbacher, A.** (2017). An equivalent circuit for corona discharges caused by a point to plane arrangement at ac, dc and combined voltages, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon (CEIDP)*, Fort Worth, TX, pp. 315-318.

[52] **Liu, Y., Liu, Y., Cui, Y., Yuan, H. & Lv**, **J.** (2019). Analysis of the relationship between DC component and spectral components of corona current on HVDC transmission lines, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13 (10), 1952-1959.

[53] **Lühring, U., Wienold, D., & Jenau, F.** (2018). Investigation on the pulse shape of DC corona discharges in air under varying test voltage level, *IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*, Budapest, pp. 1-6.

[54] **Lühring, U., Wienold, D., & Jenau, F.** (2017). Influence of humidity on pulse shape parameters of positive corona discharges in air at DC voltage, *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Milan, pp. 1-5.

[55] **Moronis, A. X., Simou, N., Kiousis, K. N. & Fylladitakis, E. D.** (2014). A model for determining the unipolar ionic saturation current in parallel wire-cylinder electrodes during corona discharge, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *21* (3), 1035-1043.

[56] **Fang, C., Cui, X., Zhou, X., Lu, T., Zhen, Y., & Li, X.** (2013). Impact Factors in Measurements of Ion-Current Density Produced by High-Voltage DC Wire's Corona, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *28* (3), 1414-1422.

[57] **Maruvada, P.S.** (2012). Electric Field and Ion Current Environment of HVDC Transmission Lines: Comparison of Calculations and Measurements, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *27* (1), 401-410.

[58] **Zhou, X., Cui, X., Lu, T., Liu, Y., Li, X., & Fang, C.** (2012). Measurement and Modeling of Low-Frequency Current From Hybrid AC/DC Corona, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *27* (3), 1678-1686

[59] **Liu, M., Tang, J., Yao, Q., & Miao, Y.** (2016). Development processes of positive and negative DC corona under needle-plate electrode in air, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Chengdu, pp. 1-4.

[60] **Wang, P., Song, J., Wang, X., Fangcheng F. L., & Geng, J.** (2020). Relaxation characteristics of ion jet formed across the short air gap in the cone–sphere electrode under positive polarity DC voltage, *IET Science, Measurement & Technology*, *14* (1), 122-127.

[61] **J. Schiessling, A. Mikiver and Y. V. Serdyuk,** (2018) Dynamics of Ion Concentration in Air Affected by Applied DC Electric Field and Humidity, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Cancun, pp. 207-210.

[62] **Pfeiffer, M., Hedtke, S., & Franck, C. M.** (2018). Corona Current Coupling in Bipolar HVDC and Hybrid HVAC/HVDC Overhead Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *33* (1), 393-402.

[63] **Zhang, B., Wang, W., & He, J.** (2017). Theoretical Study on Radio Interference of HVDC Transmission Line Based on Cage Tests, *IEEE Transactions on Power Delivery*, *32* (4), 1891-1898.

[64] **Dezenzo, T., Betz, T. & Schwarzbacher, A.** (2017). The different stages of PRPD pattern for negative point to plane corona driven by a DC voltage containing a ripple, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *24* (1), 47-53.

[65] **Dezenzo, T., Betz, T., & Schwarzbacher, A.** (2018). The different stages of PRPD pattern for positive point to plane corona driven by a DC voltage containing ripple, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *25* (1), 30-37.

[66] **Mallem, H., Ziari, Z., & Sahli, S.** (2018). Temperature effect on electrical characteristics of negative DC corona charged polyimide films, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *25* (2), 421-427.

[67] **Sarathi, R., Mishra, P., Gautam, R. &Vinu, R.** (2017). Understanding the influence of water droplet-initiated discharges on damage caused to corona-aged silicone rubber, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *24* (4), 2421-2431.

[68] **Bao, W., Liang, X., Liu, Y., Gao, Y., & Wang, J.** (2017). Effects of AC and DC corona on the surface properties of silicone rubber: Characterization by contact angle measurements and XPS high resolution scan, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *24* (5), 2911-2919.

[69] **Vas, J. V., & Thomas, M. J.** (2014). Surface degradation of silicone rubber nanocomposites due to DC corona discharge, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *21* (3), 1175-1182.

[70] **Swati, K., Yadav, K. S., Sarathi, R., Vinu, R., & Danikas, M. G.** (2017). Understanding Corona discharge activity in titania nanoparticles dispersed in transformer oil under AC and DC voltages, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *24* (4), 2325-2336.

[71] **Luo, X., Tang, J., Pan, C., Yao, Q., & Miao, Y.** (2018). Influence of Pulse Bursts on PD Magnitude Distributions in SF6 Gas under Positive DC Voltage, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, ATHENS, Greece, pp. 1-4.

[72] **Li, X., Cui, X., Lu, T., Wang, D., Ma, W., & Bian, X.** (2015). Comparison between the audible noises generated from single corona source under DC and AC corona discharge, *CSEE Journal of Power and Energy Systems, 1* (3), 23-30.

[73] **Li, X., Cui, X., Lu, T., Liu, Y., Zhang, D., & Wang, Z.** (2015). The correlation between audible noise and corona current in time domain caused by single positive corona source on the conductor, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 22* (2), 1314-1320.

[74] **Li, X., Cui, X., Lu, T., Wang, Z., Zhang, D., & Ma, W.** (2015). Statistical characteristics and stochastic model of DC corona-generated sound pressure pulses from single corona source, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 22* (5), 2898-2906.

[75] **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.

[76] **Mikropoulos, P. N., & Zagkanas, V. N.** (2015). Threshold inception conditions for positive DC corona in the coaxial cylindrical electrode arrangement under variable atmospheric conditions, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 22* (1), 278-286.

[77] **Xin Qi *et al.*,** (2015). The features of positive dc corona discharge on the surface of the conductor with different contaminations, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Ann Arbor, MI, 2015, pp. 346-349.

[78] **Maruvada, P. S.** (2014) Influence of Ambient Electric Field on the Corona Performance of HVDC Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery, 29* (2), 691-698.

[79] **Xu, M., Tan, Z., & Li, K.** (2012) "Modified peek formula for calculating positive DC Corona inception electric field under variable humidity," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 19* (4), 1377-1382.

[80] **Feifei W., *et al.*,** (2012) Numerical simulation of DC positive corona discharge under atmospheric environment, *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, 2012, pp. 523-527.

[81] **X. Bian, L. Wang, Z. Guan, J. Cao, Y. Yang and X. Wu**. (2010) "Experimental investigation on altitude correction factor of positive dc corona inception voltages of transmission lines based on the mobile corona cage," *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application*, New Orleans, LA, pp. 548-551.

[82] **Meng, X., Bian, X., Chen, F., Yang, Y., Wang, L. & Guan, Z.** (2010) Influence of air pressure on positive DC corona inception voltage of stranded conductors in the corona cage, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectic Phenomena*, West Lafayette, IN, 2010, pp. 1-4.

[83] **Wang, W., *et al*.,** (2008) The Effect of Temperature and Humidity on Audible Noise Generated from UHV DC Transmission Lines, *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Quebec, QC, pp. 287-289.

[84] **Chen, S., Li, K., Wang, F., Sun, Q., & Zhong, L.** (2019). Effect of humidity and air pressure on the discharge modes transition characteristics of negative DC corona, *IET Science, Measurement & Technology*, *13* (8), 1212-1218.

[85] **He, B., Zhao, H., Chen, C., Liu, S., & Peng, Z.** (2017). Influence of wind speed and dust particle size on the corona characteristics of ± 1100 kV fitting models, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, *24* (4), pp. 2432-2439.

[86] **Wang, D., & Du, L.** (2018). Statistical Study of Needle-plate Partial Discharge Stage Characteristics under DC Voltage, *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, ATHENS, Greece, pp. 1-4.

[87] **Morgan, V.T.** (1968) The current-carrying capacity of bare overhead conductors, *Institution of Engineers, Electrical Engineering Trans*, *4* (2), pp. 63-72.

[88] **Ewan, A.W.** (1930) A set of curves for skin effect in isolated tubular conductors, *General Electric Review*, *33* (1), pp.249-251.

[89] **Abramowitz, M. & Stegun, L.A.** (1964) *Handbook of Mathematical Functions*. New York.: Dover.

[90] **CIGRE,** (2008). *Alternating current resistance of helically stranded conductors* (Technical Brochure 345). Paris: CIGRE

[91] **CIGRE,** (2006). *Guide for the selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings* (Technical Brochure 299). Paris: CIGRE

[92] <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/>, erişim tarihi 19.08.2016

[93] <https://www.tureb.com.tr/files/bilgi_bankasi/turkiye_res_durumu/2016_turkiye_ruzgar enerji_istatistik_raporu_ocak_2016.pdf>, erişim tarihi 19.08.2016

[94] **Jian G., Jiayu, L. & Wenliang, Z.** (2010). Design of the UHVDC corona cage of China, *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Beijing, pp. 711-715.

[95] **You, S., Lü, F., Liu, Y., Zeng, Y. & Wu, X.** (2011). Discussion on problems of single conductor small corona cage's design, International Conference on Electrical and Control Engineering, Yichang, pp. 2187-2190.

[96] **Grainger, J., J. & Stevenson, W., D.** (1994). Power System Analysis. New York.: McGraw Hill

[97] **Maruvada, P., S.** (2000). Corona Performance of High-Voltage Transmissiopn Lines. England.:Research Studies Press

EKLER

EK A: 2.7 m, 60 cm Çaplı Küçük Korona Kafesi Deney Sonuçları
EK B: 2.7 m, 60 cm Çaplı Küçük Korona Kafesi Elektrik Alan Analizi Sonuçları
EK C: 6 m, 2m Çaplı Büyük Korona Kafesi Deney Sonuçları
EK D: 6 m, 2m Çaplı Büyük Korona Kafesi Elektrik Alan Analizi Sonuçları

EK A: 2.7 M, 60 Cm Çaplı Küçük Korona Kafesi Deney Sonuçları

EK A1: Korona Akımı Sonuçları

Çizelge A1.1: 7.14 mm tekil çok telli iletken (swallow) için korona akımı ölçüm sonuçları.

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
55	42	-	-	-
60	112	6000	-	-
65	185	8000	4.7	-
70	235	9000	81	2500
75	356	17000	195	6000
80	463	26000	321	10000
85	608	30000	453	12000
90	763	33000	578	14000
95	921	51000	710	17000
100	1112	54000	889	22000

Çizelge A1.2: 4 mm tekil iletken için korona akımı ölçüm sonuçları.

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
45	7	4000	-	-
50	22	6700	-	-
55	51	14000	35	1000
60	132	19000	103	3000
65	220	22000	180	5000
70	340	31000	268	9000
75	455	37000	379	11000
80	597	48000	504	13500
85	756	54000	647	15000
90	928	55000	792	17000
95	1147	56000	978	24000
100	1369	57000	1162	34000

Çizelge A1.3: 4 mm 2'li demet iletken korona akımı ölçüm sonuçları (2 cm açıklık).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
65	2	-	-	-
70	30	11000	37	1800
75	150	19000	127	5000
80	285	29000	220	10000
85	445	43000	363	12000
90	620	57000	525	19000
95	790	62000	661	23000
100	1012	64000	840	27000

Çizelge A1.4: 4 mm 2'li demet iletken korona akımı ölçüm sonuçları (4 cm açıklık).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
55	3	-	-	-
60	34	-	-	-
65	73	12000	-	-
70	127	17000	50	2000
75	220	24000	168	7000
80	350	33000	284	11000
85	525	52000	423	15000
90	708	62000	570	19000
95	932	54000	743	27000
100	1172	56000	955	37000

Çizelge A1.5: 4 mm 2'li demet iletken korona akımı ölçüm sonuçları (6 cm açıklık).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
40	8.6	-	-	-
45	22	-	-	-
50	64	-	-	-
55	100	-	-	-
60	143	9000	-	-
65	211	13000	24	2000
70	291	21000	134	7000
75	420	36000	285	12000
80	568	45000	415	15000
85	757	59000	614	24000
90	975	69000	770	29000
95	1212	70000	969	37000
100	1500	73000	1233	40000

Çizelge A1.6: 4 mm 3'lü demet iletken korona akımı ölçüm sonuçları (2 cm açıklık).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
70	7	-	-	-
75	31	-	-	-
80	85	28000	-	-
85	165	37000	57	2400
90	284	54000	180	6500
95	462	63000	331	10000
100	652	74000	526	13000

Çizelge A1.7: 4 mm 3'lü demet iletken korona akımı ölçüm sonuçları (4 cm açıklık).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
70	9	-	-	-
75	36	-	-	-
80	88	20000	16	2000
85	170	25000	145	8000
90	320	47000	305	15000
95	535	59000	497	19000
100	742	70000	720	23000

Çizelge A1.8: 4 mm 3'lü demet iletken korona akımı ölçüm sonuçları (6 cm açıklık).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
60	4	-	-	-
65	21	-	-	-
70	50	-	-	-
75	103	15000	-	-
80	194	18000	92	2500
85	378	37000	261	8000
90	594	45000	440	12000
95	822	50000	657	18000
100	1138	56000	887	25000

Çizelge A1.9: 4 mm 4'lü demet iletken durumu için korona akımı ölçüm sonuçları (2 cm iletken açıklığı).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
90	14	-	-	-
95	93	40000	81	16000
100	254	55000	210	22000

Çizelge A1.10: 4 mm 4'lü demet iletken durumu için korona akımı ölçüm sonuçları (4 cm iletken açıklığı).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
85	30	4000	-	-
90	114	28000	87	5000
95	284	42000	252	15000
100	572	47000	489	19000

Çizelge A1.11: 4 mm 4'lü demet iletken durumu için korona akımı ölçüm sonuçları (6 cm iletken açıklığı).

	- DC		+ DC	
Test gerilimi [kV]	I_{korona} [µA]	Akım darbesi	I_{korona} [µA]	Akım darbesi
80	5	-	-	-
85	62	-	16	500
90	262	25000	191	4500
95	485	37000	407	11000
100	801	54000	683	16000

EK A2: Demet İletkenler İçin Korona Kayıpları

Çizelge A2.1: 2'li demet iletken yapısında hesaplanmış korona kayıpları

	P_{korona} [kW/km]					
	Negatif DC			Pozitif DC		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm	2 cm	4 cm	6 cm
40	-	-	0.1	-	-	-
45	-	-	0.3	-	-	-
50	-	-	1.1	-	-	-
55	-	0.1	1.8	-	-	-
60	-	0.7	2.9	-	-	-
65	0	1.6	4.6	-	-	0.5
70	0.7	3	6.8	0.9	1.2	3.1
75	3.8	5.5	10.5	3.2	4.2	7.1
80	7.6	9.3	15.1	5.9	7.6	11.1
85	12.6	14.9	21.4	10.3	12	17.4
90	18.6	21.2	29.3	15.8	17.1	23.1
95	25	29.5	38.4	20.9	23.5	30.7
100	33.7	39.1	50	28	31.8	41.1

Çizelge A2.2: 3'lü demet iletken yapısında hesaplanmış korona kayıpları

	P_{korona} [kW/km]					
	Negatif DC			Pozitif DC		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm	2 cm	4 cm	6 cm
60	-	-	0.1	-	-	-
65	-	-	0.5	-	-	-
70	0.2	0.2	1.2	-	-	-
75	0.8	0.9	2.6	-	-	-
80	2.3	2.3	5.2	-	0.4	2.5
85	4.7	4.8	10.7	1.6	4.1	7.4
90	8.5	9.6	17.8	5.4	9.2	13.2
95	14.6	16.9	26	10.5	15.7	20.8
100	21.7	24.7	37.9	17.5	24	29.6

Çizelge A2.3: 3'lü demet iletken yapısında hesaplanmış korona kayıpları

	P_{korona} [kW/km]					
	Negatif DC			Pozitif DC		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm	2 cm	4 cm	6 cm
80	-	-	0.1	-	-	0.1
85	-	0.9	1.8	-	-	0.5
90	0.4	3.4	7.9	-	2.6	5.7
95	2.9	9	15.4	2.6	8	12.9
100	8.5	19.1	26.7	7	16.3	22.8

EK A3: Demet İletkenler için RIV Hesapları

Çizelge A3.1: 2'li demet iletken yapısında hesaplanmış RIV değerleri.

	RIV [dB]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
70	8,46	10,24	12,96
80	21,3	23,34	26,45
90	34,14	36,44	39,94
100	46,98	49,54	53,42

Çizelge A3.2: 3'lü demet iletken yapısında hesaplanmış RIV değerleri.

	RIV [dB]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
80	3.81	5.37	9.29
90	14.47	16.23	20.63
100	25.12	27.08	31.97

Çizelge A3.3: 4'lü demet iletken yapısında hesaplanmış RIV değerleri.

	RIV [dB]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
90	1.57	3.68	9.22
100	10.79	13.14	19.3

EK A4: AN Hesapları

Çizelge A4.1: 2'li demet iletken yapısında hesaplanmış AN değerleri.

	AN [dB]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
30	4.25	4.99	6.08
40	15	15.73	16.82
50	23.33	24.07	25.16
60	30.14	30.88	31.97
70	35.9	36.63	37.72
80	40.88	41.62	42.71
90	45.28	46.02	47.11
100	49.22	49.95	51.05

Çizelge A4.2: 3'lü demet iletken yapısında hesaplanmış AN değerleri.

	AN [dB]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
30	2.28	2.95	4.6
40	13.02	13.7	15.35
50	21.35	22.03	23.68
60	28.16	28.84	30.49
70	33.92	34.6	36.25
80	38.91	39.59	41.23
90	43.31	43.99	45.63
100	47.24	47.92	49.57

Çizelge A4.3: 4'lü demet iletken yapısında hesaplanmış AN değerleri.

	AN [dB]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
30	0.08	1.02	3.38
40	10.82	11.76	14.12
50	19.16	20.1	22.45
60	25.97	26.91	29.26
70	31.73	32.67	35.02
80	36.71	37.65	40.01
90	41.11	42.05	44.41
100	45.05	45.99	48.34

EK B: Elektrik Alan Analiz Sonuçları

Çizelge B.1: 2'li demet iletken yapısında iletken yüzeyindeki elektrik alan şiddetleri.

	E [kV/cm]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
10	7.64	7.8	8.03
20	15.29	15.59	16.06
30	22.93	23.39	24.08
40	30.58	31.19	32.11
50	38.22	38.98	40.14
60	45.87	46.78	48.17
70	53.51	54.58	56.19
80	61.16	62.37	64.22
90	68.8	70.17	72.25
100	76.44	77.97	80.28

Çizelge B.2: 3'lü demet iletken yapısında iletken yüzeyindeki elektrik alan şiddetleri.

	E [kV/cm]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
10	6.34	6.46	6.75
20	12.69	12.92	13.5
30	19.03	19.38	20.25
40	25.37	25.84	27
50	31.72	32.3	33.75
60	38.06	38.76	40.5
70	44.4	45.22	47.25
80	50.75	51.68	54.01
90	57.09	58.14	60.76
100	63.43	64.6	67.51

Çizelge B.3: 4'lü demet iletken yapısında iletken yüzeyindeki elektrik alan şiddetleri.

	E [kV/cm]		
Test gerilimi [kV]	2 cm	4 cm	6 cm
10	5.49	5.63	6
20	10.98	11.26	11.99
30	16.47	16.89	17.99
40	21.96	22.52	23.99
50	27.45	28.15	29.98
60	32.94	33.78	35.98
70	38.43	39.41	41.98
80	43.92	45.04	47.97
90	49.41	50.67	53.97
100	54.9	56.3	59.97

EK C: 6 m, 2 m Çaplı Büyük Korona Kafesi Deney Sonuçları

EK C1: Korona Akımı Sonuçları

Çizelge C1.1: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için korona akımı ölçüm sonuçları.

Sıcaklık: 25.5 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %61.5
	Korona akımı [µA]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	29.06	50.76
%110 Uk	41.13	66.05
%115 Uk	53.71	75.84
%120 Uk	85.41	97.85
%125 Uk	133.33	135.77
%130 Uk	185.9	185.9

Çizelge C1.2: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için korona akımı ölçüm sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
	Korona akımı [µA]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	11	19.57
%110 Uk	17.12	34.86
%115 Uk	23.24	47.7
%120 Uk	34.86	69.72
%125 Uk	53.82	74
%130 Uk	69.72	96.63

Çizelge C1.3: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için korona akımı ölçüm sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
	Korona akımı [µA]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	8.80	15.66
%110 Uk	13.70	25.89
%115 Uk	18.59	33.16
%120 Uk	22.89	51.78
%125 Uk	33.06	62.20
%130 Uk	41.78	79.30

Çizelge C1.4: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için korona akımı ölçüm sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
	Korona akımı [µA]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	11.88	21.14
%110 Uk	18.49	37.65
%115 Uk	25.10	51.52
%120 Uk	37.65	75.30
%125 Uk	58.13	79.92
%130 Uk	75.30	104.36

Çizelge C1.5: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için korona akımı ölçüm sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
	Korona akımı [µA]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	10.56	18.79
%110 Uk	16.44	31.07
%115 Uk	22.31	39.79
%120 Uk	27.47	62.13
%125 Uk	39.67	74.64
%130 Uk	50.13	95.16

EK C2: Korona Kayıpları Hesapları

Çizelge C2.1: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için korona kaybı sonuçları.

Sıcaklık: 25.5 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %61.5
Korona kaybı [kW/km]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	1.36	2.13
%110 Uk	2.01	2.91
%115 Uk	2.75	3.49
%120 Uk	4.56	5.08
%125 Uk	7.42	7.44
%130 Uk	10.75	10.62

Çizelge C2.2: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için korona kaybı sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
Korona kaybı [kW/km]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	0.38	0.59
%110 Uk	0.61	1.10
%115 Uk	0.87	1.58
%120 Uk	1.36	2.41
%125 Uk	2.19	2.66
%130 Uk	2.95	3.61

Çizelge C2.3: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için korona kaybı sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
Korona kaybı [kW/km]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	0.25	0.37
%110 Uk	0.41	0.64
%115 Uk	0.59	0.86
%120 Uk	0.76	1.40
%125 Uk	1.14	1.75
%130 Uk	1.49	2.32

Çizelge C2.4: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için korona kaybı sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
Korona kaybı [kW/km]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	0.34	0.50
%110 Uk	0.56	0.93
%115 Uk	0.79	1.33
%120 Uk	1.24	2.03
%125 Uk	2.00	2.25
%130 Uk	2.69	3.05

Çizelge C2.5: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için korona kaybı sonuçları.

Sıcaklık: 17.3 ºC	Basınç: 768 mmHg	Nem: %48.6
Korona kaybı [kW/km]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	0.30	0.44
%110 Uk	0.50	0.77
%115 Uk	0.71	1.03
%120 Uk	0.91	1.68
%125 Uk	1.36	2.10
%130 Uk	1.79	2.78

EK C3: RIV Hesapları

Çizelge C3.1: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için RIV sonuçları.

	RIV [dB]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	53	42
%110 Uk	58	47
%115 Uk	63	51
%120 Uk	68	56
%125 Uk	73	60
%130 Uk	78	65

Çizelge C3.2: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için RIV sonuçları.

	RIV [dB]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	44	31
%110 Uk	39	28
%115 Uk	43	32
%120 Uk	48	35
%125 Uk	52	39
%130 Uk	56	43

Çizelge C3.3: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için RIV sonuçları.

	RIV [dB]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	29	12
%110 Uk	26	10
%115 Uk	29	14
%120 Uk	33	17
%125 Uk	37	20
%130 Uk	41	23

Çizelge C3.4: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için RIV sonuçları.

RIV [dB]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	42	30
%110 Uk	47	34
%115 Uk	51	38
%120 Uk	56	42
%125 Uk	61	47
%130 Uk	66	51

Çizelge C3.5: 4x954 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için RIV sonuçları.

RIV [dB]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	27	16
%110 Uk	31	19
%115 Uk	35	22
%120 Uk	39	26
%125 Uk	43	29
%130 Uk	47	33

EK C4: AN Hesapları (1 m radyal uzaklık için)

Çizelge C4.1: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için AN sonuçları.

	AN [dB]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	38	33
%110 Uk	41	35
%115 Uk	43	37
%120 Uk	39	33
%125 Uk	48	42
%130 Uk	51	44

Çizelge C4.2: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için AN sonuçları.

	AN [dB]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	29	24
%110 Uk	32	26
%115 Uk	34	28
%120 Uk	36	30
%125 Uk	38	32
%130 Uk	40	34

Çizelge C4.3: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için AN sonuçları.

	AN [dB]	
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	23	16
%110 Uk	25	17
%115 Uk	27	19
%120 Uk	29	20
%125 Uk	31	22
%130 Uk	32	24

Çizelge C4.4: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için AN sonuçları.

AN [dB]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	33	27
%110 Uk	35	29
%115 Uk	38	31
%120 Uk	40	33
%125 Uk	43	35
%130 Uk	45	37

Çizelge C4.5: 4x954 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için AN sonuçları.

AN [dB]		
Gerilim [kV]	Pozitif DC	Negatif DC
%105 Uk	26	20
%110 Uk	28	22
%115 Uk	30	23
%120 Uk	32	25
%125 Uk	34	27
%130 Uk	36	29

EK D: 6 m, 2m Çaplı Büyük Korona Kafesi Elektrik Alan Analizi Sonuçları

Çizelge D.1: 4x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için elektrik alan sonuçları.

	Pozitif DC		Negatif DC	
	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]
Uk	178	60.52	160	54.40
%105 Uk	186.9	63.55	168	57.12
%110 Uk	195.8	66.57	176	59.84
%115 Uk	204.7	69.60	184	62.56
%120 Uk	213.6	72.62	192	65.28
%125 Uk	222.5	75.65	200	68.00
%130 Uk	231.4	78.68	208	70.72

Çizelge D.2: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için elektrik alan sonuçları.

	Pozitif DC		Negatif DC	
	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]
Uk	130	52.13	115	46.12
%105 Uk	136.5	54.74	120.75	48.42
%110 Uk	143	57.34	126.5	50.73
%115 Uk	149.5	59.95	132.25	53.03
%120 Uk	156	62.56	138	55.34
%125 Uk	162.5	65.16	143.75	57.64
%130 Uk	169	67.77	149.5	59.95

Çizelge D.3: 3x1272 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için elektrik alan sonuçları.

	Pozitif DC		Negatif DC	
	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]
Uk	110	44.99	90	36.81
%105 Uk	115.5	47.24	94.5	38.65
%110 Uk	121	49.49	99	40.49
%115 Uk	126.5	51.74	103.5	42.33
%120 Uk	132	53.99	108	44.17
%125 Uk	137.5	56.24	112.5	46.01
%130 Uk	143	58.49	117	47.85

Çizelge D.4: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/10 GMR ölçeklemesi için elektrik alan sonuçları.

	Pozitif DC		Negatif DC	
	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]
Uk	140	56.42	123	49.57
%105 Uk	147	59.24	129.15	52.05
%110 Uk	154	62.06	135.3	54.53
%115 Uk	161	64.88	141.45	57.00
%120 Uk	168	67.70	147.6	59.48
%125 Uk	175	70.53	153.75	61.96
%130 Uk	182	73.35	159.9	64.44

Çizelge D.5: 3x954 MCM'in swallow iletken ile 1/5 GMR ölçeklemesi için elektrik alan sonuçları.

	Pozitif DC		Negatif DC	
	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]	Gerilim [kV]	Max. elektrik alanı [kV/cm]
Uk	118	47.91	102	41.41
%105 Uk	123.9	50.30	107.1	43.48
%110 Uk	129.8	52.70	112.2	45.55
%115 Uk	135.7	55.09	117.3	47.62
%120 Uk	141.6	57.49	122.4	49.69
%125 Uk	147.5	59.89	127.5	51.77
%130 Uk	153.4	62.28	132.6	53.84

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **:** Aytuğ FONT
Doğum Tarihi ve Yeri **:** 1986, İstanbul
E-posta **:** font@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2009 İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2012 İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2018'den bu yana Sönmez Trafo Sanayi firmasında Ar-Ge müdürü olarak çalışmakta.
- 2010-2018 yılları arasında, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Dergi Yayını:

A. Font, Y. T. Solak, S. Ilhan, A. Ozdemir, H. Ismailoglu and F. E. Cortes, "DC corona characteristics derived from corona cage tests and simulations," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6, pp. 1867-1875, Dec. 2019. doi: 10.1109/TDEI.2019.008197

Konferans Yayınları:

A. Font, S. Ilhan, H. Ismailoglu, F. E. Cortes and A. Özdemir, "Design and technical analysis of 500–600 kV HVDC transmission system for Turkey," *2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, 2017, pp. 201-205.

A. Font, M.S. Ersoy, S. Ilhan, A. Ozdemir, F.E. Cortes, "AC/DC Corona Characteristics of the Conductors in an Indoor Corona Cage", *20th Int. Symp. H.V. Eng. (ISH)*, 2017.

Ilhan, S., **Font, A.**, C., Espino-Cortes, Ozdemir, A., "Determination of Corona Inception Voltages of Rod-Plane Electrode Systems", 2018 International Conference on High Voltage Engineering and Application, ICHVE 2018, Athens, GREECE,