

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RİJİT KATENER SİSTEMİNİN MODELLENEREK YOLCU ÜZERİNDEKİ
ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Salih SARISAKAL

Elektik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RİJİT KATENER SİSTEMİNİN MODELLENEREK YOLCU ÜZERİNDEKİ
ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Salih SARISAKAL
(504121063)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **504121063** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Salih SARISAKAL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“RİJİT KATENER SİSTEMİNİN MODELLENEREK YOLCU ÜZERİNDEKİ ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2015**

Bana her türlü desteği veren ve her zaman yanımda olan aileme,

ÖNSÖZ

Raylı ulaşım sistemleri günümüz yük ve yolcu taşımada çok önemli bir yere sahiptir. Teknolojinin her alanda gelişmesiyle beraber raylı sistemlerde, kendine düşen payı almıştır. Günümüzde ekonomikliği, çevre dostu oluşu, hızı ve güvenilirliği sebebiyle raylı ulaşım şekli çok tercih edilen bir noktaya gelmiştir. Raylı ulaşım sistemlerinin her yönden geliştirilmesi için teknik ve akademik çalışmalar tüm dünyada devam etmektedir. Ülkemizde de bu çalışmalar yapılmakta olup son 20 yılda demiryollarına yapılan yatırımlar artmıştır. Raylı ulaşım alanında yetişmiş teknik personele duyulan ihtiyaç çok açıktır. Bu tezde raylı sistemlerin elektrikleştirilmesinde kullanılan bir yöntemin, modellemesi yapılarak insan sağlığına etkisi incelenmiştir. Büyüyen teknoloji, elektromanyetik kirliliği de beraberinde getirmiştir. Artan ulaşım kolaylığının, insan sağlığını etkileyebilecek olası zararları derinlemesine araştırılarak önlenmelidir. Tezin, raylı sistemlerin yaydığı elektrik ve manyetik alanlar konusunda yapılacak tüm çalışmalar için faydalı olmasını, teknolojinin insan sağlığına etkisi konularına katkıda bulunmasını dilerim.

Tezin ortaya çıkmasında bana yol gösterip, yardımcı olan danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, bilgileriyle ışık tutan hocam Prof. Dr. Mehmet Turan SÖYLEMEZ'e, Dr. Süleyman AÇIKBAŞ'a, Elektrik Yük. Müh. Mustafa BELLEK'e ve son olarak hayatım boyunca bana güvenen ve beni destekleyen aileme çok teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Salih SARISAKAL
Elektrik-Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması	1
1.3 Raylı Sistemlerde Elektrifikasyonun Tarihi.....	2
2. DEMİRYOLU ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİ	5
2.1 AC ve DC Besleme	5
2.2 DC Besleme	5
2.2.1 DC besleme sisteminin yapısı	6
2.2.2 Güç Geri Kazanımı.....	7
2.3 AC Besleme	8
2.4 Elektriksel Besleme Sınıflandırması	9
2.5 AC Enerji Sağlanması	10
2.6 AC Sistem Besleme Noktaları	10
2.7 Havai Katener Hattı Bileşenleri	11
2.8 Havai Katener Hattında Kullanılan Kablolar.....	12
2.8.1 Besleme kabloları.....	12
2.8.2 Fider teli.....	13
2.8.3 Katener teli.....	13
2.8.4 Kontak teli.....	13
2.8.5 Jumper teli.....	13
2.8.6 Askı teli.....	13
2.8.7 Geri dönüş kabloları	14
3. PANTOGRAF	15
3.1 Pantografin Parçaları	17
3.1.1 Pantograf arşesi	17
3.1.2 Pantograf sergelesi.....	17
3.1.3 Dengeleme çubuğu	17
3.1.4 İttirme kolu.....	17
3.1.5 Ana gövde	18
3.1.6 Sustalar	18
3.1.7 Pantograf motoru tanımı ve görevi.....	18
3.1.8 Pantograf motoru yapısı.....	18
3.2 Tramvay Kolu	18

4. ÜÇÜNCÜ RAY	21
5. RİJİT KATENER SİSTEMİ.....	25
5.1 Bazı Tanımlar	25
5.2 Rijit Katener Sisteminin Klasik Telli Sisteme Göre Üstünlükleri.....	26
5.3 Kullanımda Olan Bir Rijit Katener Sistemine İlişkin Bilgiler	27
5.3.1 Topraklama anahtarı.....	27
5.3.2 Havai iletken ray profili	28
5.3.3 Bakır alüminyum korozyonu ve korunma yolları.....	28
5.3.4 Kilit bağlantısı.....	29
5.3.5 Isı genleşmesi için paralel bağlantı.....	30
5.3.6 Elektrik bağlantısı	30
5.3.7 Topraklama	31
6. RİJİT KATENER SİSTEMİNİN FEMM PROGRAMI YARDIMIYLA MODELLENMESİ.....	33
6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	33
6.2 Femm Sonlu Elemanlar Yöntemi Programı	34
6.3 Modellenecek Rijit Katener Sisteminin Özellikleri ve Boyutları.....	37
6.3.1 Alüminyum profilin özellikleri.....	38
6.3.2 Alüminyum profilin boyutları.....	38
6.3.3 Kontak telinin özellikleri.....	39
6.3.4 Kontak telinin boyutları.....	39
6.3.5 Ara kilit bağlantısının özellikleri	39
6.4 Havai İletken Rayın Modellenmesi ve Manyetik Alan Analizi.....	40
6.5 Havai İletken Rayın Modellenmesi ve Elektrostatik Alan Analizi.....	44
6.5.1 750 V DC Gerilim için elektrostatik alan analizi	44
6.5.2 1500 V DC Gerilim için elektrostatik alan analizi.....	47
6.5.3 3000 V DC Gerilim için elektrostatik alan analizi.....	52
6.6 Tren Yokken Yolcunun Maruz Kaldığı Manyetik Alanın İncelenmesi.....	54
6.7 Tren Varken Yolcunun Maruz Kaldığı Manyetik Alanın İncelenmesi.....	60
6.8 Tren Yokken Yolcunun Maruz Kaldığı Elektrik Alanın İncelenmesi	64
6.9 Tren Varken Yolcunun Maruz Kaldığı Elektrik Alanın İncelenmesi	69
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	75
7.1 Statik Alanlar	75
7.2 İyonlaştırıcı Olmayan Elektromanyetik Alanlar.....	76
7.3 Değerlendirme	76
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83

KISALTMALAR

A	: Amper
AB	: Avrupa Birliği
AC	: Alternatif Akım
Al	: Alüminyum
BS	: British Standart
C	: Coulomb
cm	: Santimetre
dm³	: Desimetre küp
°C	: Celsius derece
DC	: Doğru Akım
EC	: European Commission
EN	: European Standart
f	: Frekans
Femm	: Finite Element Method Magnetics
GRP	: Glass fiber Reinforced Plastic
Hz	: Hertz
IACS	: International Annealed Copper Standard
ICNIRP	: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEC	: International Electrotechnical Commission
kA	: Kiloamper
kV	: Kilovolt
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
m	: Metre
mph	: Mil bölü saat
m²	: Metre kare
mm	: Milimetre
mm²	: Milimetre kare
mT	: Militesla
MA	: Megaamper
MEGEP	: Mesleki Eğitim ve Öğretimin Güçlendirilmesi Projesi
μT	: MikroTesla
N	: Newton
PVC	: Polivinil Klorür
RMS	: Root Mean Square
sa	: Saat
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SNCF	: Société nationale des chemins de fer français
TGV	: Train Grande Vitesse
T	: Tesla
UIC	: International Union of Railway
V	: Volt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Standartlara göre izin verilen gerilimler	9
Çizelge 6.1 : İletken rayın mekanik özellikleri	38
Çizelge 6.2 : EN AW-6101 alaşımının kimyasal bileşimi.....	38
Çizelge 6.3 : Kontak telinin mekanik özellikleri	39
Çizelge 6.4 : Ara kilit bağlantısının mekanik özellikleri	39
Çizelge 6.5 : Farklı dokulara ilişkin bağıl manyetik geçirgenlik değerleri	54
Çizelge 6.6 : Kadıköy-Kartal hattı durak yerleri.....	55
Çizelge 6.7 : Duraklarda ulaşılan anlık maksimum akımlar.....	57
Çizelge 6.8 : Tren yokken anlık maksimum akımlara göre ortaya çıkan sonuçlar	58
Çizelge 6.9 : Tren yokken rms değerlerine göre ortaya çıkan sonuçlar	59
Çizelge 6.10 : Tren varken anlık maksimum akımlara göre ortaya çıkan sonuçlar ...	61
Çizelge 6.11 : Tren varken rms değerlerine göre ortaya çıkan sonuçlar	62
Çizelge 6.12 : Tren yokken vücuda etki eden elektrik alan şiddetleri	69
Çizelge 6.13 : Tren varken vücuda etki eden elektrik alan şiddetleri	73
Çizelge 7.1 : Yapay kaynaklı örnek statik elektrik alan değeri	75
Çizelge 7.2 : Bazı statik manyetik alan değerleri.....	75
Çizelge 7.3 : Frekansa göre ICNIRP'nin kabul ettiği referans değerler.....	76
Çizelge 7.4 : Statik alanlar için AB Konsey tavsiyesi (1999/519/EC).....	77
Çizelge 7.5 : Manyetik büyüklüklerin karşılaştırılması.....	78
Çizelge 7.6 : Elektriksel büyüklüklerin karşılaştırılması.....	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : ABD’de 1895 yılında açılan elektrikli lokomotif hattı	2
Şekil 1.2 : (1898-1902) Valtellinada AC lokomotif	3
Şekil 2.1 : Havai hatla beslenen bir hafif raylı sistem aracı.	6
Şekil 2.2 : DC besleme sistemi.	7
Şekil 2.3 : Güç kazanımı devresi.....	8
Şekil 2.4 : Avrupa’da elektriksel besleme sınıflandırması	9
Şekil 2.5 : Örnek 25 kV’lık besleme düzenlemesi.....	10
Şekil 2.6 : Birleşik Krallıkta kullanılan 1500 V DC kullanan Tyne-Wear metrosu ..	11
Şekil 2.7 : Havai katener hattında kullanılan kablolar	14
Şekil 3.1 : 1911 yılında yapılmış elmas biçimli bir pantograf.....	15
Şekil 3.2 : Z biçimli(asimetrik) modern bir pantograf	15
Şekil 3.3 : Tramvay kolları	16
Şekil 3.4 : Pantografin parçaları.....	16
Şekil 4.1 : Akım pabucu	21
Şekil 4.2 : Temas yönlerine göre akım pabuçları.....	22
Şekil 4.3 : Rampa ve taşıyıcı raylar.....	23
Şekil 4.4 : Londra metrosunda kullanılan üçüncü ray ve izolatör kesitleri	23
Şekil 4.5 : Üçüncü ray kapakları	24
Şekil 5.1 : İzolatörler ve askı çubuklarıyla birlikte rijit katener sistemi	27
Şekil 5.2 : Topraklama anahtarı	27
Şekil 5.3 : İletken rayın görünüşü	28
Şekil 5.4 : Plastik koruyucu giydirilmiş alüminyum profil	29
Şekil 5.5 : Ara kilitte kullanılan bağlantı çifti.....	29
Şekil 5.6 : Isı genleşmesi için paralel bağlantı.....	30
Şekil 5.7 : Uç kıskacı.....	31
Şekil 5.8 : Topraklama seti	31
Şekil 6.1 : Kesitlere bölünmüş örnek bir problem	33
Şekil 6.2 : Femm programı açılış arayüzü	36
Şekil 6.3 : Femm programında açılan yeni sayfa.....	36
Şekil 6.4 : Problem tanımlama kısmı	37
Şekil 6.5 : Rijit katener sistemi	37
Şekil 6.6 : İletken profilin boyutları	38
Şekil 6.7 : Kontak telinin boyutları	39
Şekil 6.8 : İletken rayın Femm programındaki modeli.....	40
Şekil 6.9 : Modelin sonlu eleman bölgelerine bölünmesi.....	41
Şekil 6.10 : Manyetik akı yoğunluğu	42
Şekil 6.11 : Manyetik akı yoğunluğu (büyütülmüş).....	42
Şekil 6.12 : Akım yoğunluğu	43
Şekil 6.13 : Potansiyel dağılımı	44

Şekil 6.14 : Elektriksel akı yoğunluğu dağılımı	45
Şekil 6.15 : Elektriksel akı yoğunluğu dağılımı grafiği	45
Şekil 6.16 : Elektriksel alan dağılımı	46
Şekil 6.17 : Elektriksel alan dağılımı grafiği.....	46
Şekil 6.18 : 1500 V DC potansiyel dağılımı.....	47
Şekil 6.19 : 1500 V DC için mesafeye göre potansiyel dağılımı.....	48
Şekil 6.20 : 1500 V DC için eş potansiyel eğrileri	48
Şekil 6.21 : İletken profilin çevresindeki potansiyel dağılımı.....	49
Şekil 6.22 : 1500 V DC için elektriksel akı yoğunluğu dağılımı.....	49
Şekil 6.23 : 1500 V DC için elektriksel akı yoğunluğu dağılımı grafiği	50
Şekil 6.24 : 1500 V DC için elektrik alan şiddeti dağılımı	50
Şekil 6.25 : 1500 V DC için profil çevresindeki elektrik alan dağılımı.....	51
Şekil 6.26 : 1500 V DC için elektrik alan şiddeti dağılımı grafiği	51
Şekil 6.27 : 3000 V DC için potansiyel dağılımı	52
Şekil 6.28 : Potansiyelin uzaklığa bağlı değişim grafiği.....	52
Şekil 6.29 : 3000 V DC elektriksel akı yoğunluğu dağılımı grafiği	53
Şekil 6.30 : 3000 V DC elektriksel alan şiddeti dağılımı grafiği.....	53
Şekil 6.31 : Durakta tren bekleyen yolcu modeli.....	56
Şekil 6.32 : 8’li tren için 2 dakika işletme aralığında hattan çekilen akım grafiği	56
Şekil 6.33 : Manyetik akı yoğunluğu dağılımı	57
Şekil 6.34 : Hat boyunca 1 dakika için akımın rms değerleri	58
Şekil 6.35 : Tren varken manyetik model	61
Şekil 6.36 : 1200 A için tren var ve yok durumunda akı yoğunluğu dağılımı	62
Şekil 6.37 : Tren yokken vücutta manyetik akı yoğunluğu dağılımı	63
Şekil 6.38 : Tren varken vücutta manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	63
Şekil 6.39 : 1500 V için potansiyel dağılımı	64
Şekil 6.40 : 1500 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı	65
Şekil 6.41 : 1500 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı	65
Şekil 6.42 : 1800 V için potansiyel dağılımı	66
Şekil 6.43 : 1800 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı	66
Şekil 6.44 : 1800 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı	67
Şekil 6.45 : 1000 V için eş potansiyel eğrileriyle birlikte potansiyel dağılımı	67
Şekil 6.46 : 1000 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı	68
Şekil 6.47 : 1000 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı	68
Şekil 6.48 : 1500 V için tren olduğu durumda potansiyel dağılımı.....	69
Şekil 6.49 : Tren var 1500 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı	70
Şekil 6.50 : Tren var 1500 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı	70
Şekil 6.51 : 1800 V için tren olduğu durumda potansiyel dağılımı	71
Şekil 6.52 : Tren var 1800 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı	71
Şekil 6.53 : Tren var 1800 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı	72
Şekil 6.54 : 1000 V için tren olduğu durumda potansiyel dağılımı	72
Şekil 6.55 : Tren var 1000 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı	73
Şekil 6.56 : Tren var 1000 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı	73

RİJİT KATENER SİSTEMİNİN MODELLENEREK YOLCU ÜZERİNDEKİ ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Gelişen teknolojiyle beraber raylı sistemlere gösterilen ilgi de artmıştır. Şehirlerin havasını değiştiren geliştiren raylı sistem çözümleri ulaşımı kolaylaştırmış, çevreye dost bir ulaşım şeklini almıştır. Bu tezde raylı sistemlerin elektrikleştirilmesinde kullanılan yöntemler tanıtılmış ve bunlardan birisi olan rijit katener sistemi modellenerek, sonlu elemanlar yöntemiyle manyetik ve elektriksel alan analizleri yapılmıştır. Birinci bölümde demiryolu elektrifikasyonun tarihçesi anlatılmıştır. İkinci bölümde elektrikleştirmede kullanılan iki temel yaklaşım olan AC ve DC besleme tanıtılmış, bu yaklaşımların ayırım ve benzerliklerinden faydalanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Örnek olarak kullanımda olan bazı sistemlerin özellikleri verilmiştir. DC ve AC besleme sistemlerinin yapıları hakkında bilgi verilmiştir. Avrupada kullanılan elektrifikasyon sistemleri tablo halinde verilmiştir. Geri kazanımlı frenleme tanıtılmış kısaca yapısı verilmiştir. İkinci bölümün sonlarında havai hatlarda kullanılan kablolardan söz edilmiş bunların görevleri tanıtılmıştır. Üçüncü kısımda elektriğin araca alınmasında kullanılan pantografin tarihçesi anlatılmış ve pantografi oluşturan parçaların isimleri ve görevlerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümün sonunda elektrikli otobüslerde elektriğin alınmasını sağlayan tramvay kolundan söz edilmiş yapısı, tarihçesi ve işleyişiyle ilgili bilgi verilmiştir. Dördüncü kısımda, özellikle metro sistemlerinin beslemesinde kullanılan üçüncü ray teknolojisi tanıtılmış; bu sistemin kurulması, bakımı ve işletilmesine ilişkin bilgiler verilmiştir. Beşinci kısımda rijit katener sistemi ve onu oluşturan yapılar tanıtılmış, rijit katener sisteminin diğer besleme sistemlerinden farklılıkları, üstünlükleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kullanımda olan bir sistemin yapısına ilişkin bilgiler verilmiştir. Altıncı bölümün ilk kısmında örnek olarak kullanımda olan bir sistemin modellenmesine ilişkin kullanılacak bilgiler verilmiş. Öncelikle modellemenin yapılacağı program ve onun özellikleri tanıtılmıştır. Öncelikle profil çevresindeki elektriksel ve manyetik büyüklükler incelenmiştir. Daha sonraysa geniş çerçevede, rijit katener sisteminin kullanıldığı 750V, 1500V, 3000V DC gerilimler için örnek analizler yapılmış ve elektriksel ve manyetik büyüklüklerin değişimi ifade edilmiştir. Daha sonra ise tezin asıl konusunu oluşturan metro istasyonunda tren bekleyen bir yolcunun, tren peronda yokken ve tren geldiği zaman maruz kalabileceği akımlar, simux programında oluşturulan Kadıköy-Kartal hattında iki dakika işletme aralığında çalışan bir trene ilişkin, trenin hat boyunca çektiği maksimum akımlar ve bu akımların bir dakikalık ortalamalar için rms değerleri belirlenmiş ve bu değerler kullanılarak elektrostatik ve manyetik analizler yapılmış. Yolcunun vücudunun maruz kalacağı elektrik alan şiddeti, manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu değerleri belirlenmiştir. Son bölüm olan yedinci kısımda ise statik alanlar için belirlenmiş referans değerlere göre, benzetim sonucunda ortaya çıkan değerlerin etkisi değerlendirilmiş ve insan sağlığına etkisi tartışılmıştır.

MODELLING OF THE RIGID CATENARY SYSTEM AND ELECTRICAL AND MAGNETICS FIELD EFFECTS ON PASSENGERS

SUMMARY

In our country, the increase in the investments and interest in rail transit systems comes with a developing technology. Railway system solutions are friendship to environment and makes transportation easier for years. In this thesis, electrification systems for railways were examined and one of them rigid catenary system was modeled and made electrostatic and magneto static analysis with finite element method.

At first chapter, the history of railway electrification was explained. This term occurred at the late of 19th century. The first electrical locomotive was made in 1837. Many countries of Europe have been met with electrification from 1923 to 1960.

At second chapter, Alternative and direct current feeding systems were explained. Feeding systems based alternative current are used commonly for long way transportation. DC feeding systems are used for short distance transportation. An example dc feeding systems' structure was given and explained how to work and then was mentioned power regeneration how to work. Electrification classification in Europe as a table was given. Towards late of this chapter, was expressed to be used cables properties and their roles on an overhead catenary line.

In third chapter pantographs' structure, components and specifications were explained. The pantograph is a device used in order to collect current from overhead lines. Nowadays the most common type of pantograph is named Z shaped (half pantograph). Pantograph easily can be adapted for various heights.

In the final section of third chapter trolley pole and its working were mentioned. Especially modern trolley poles are used on the roof of electrical trolleybus and nowadays have still been used.

In fourth chapter, third rail electrification method was introduced. Third rail provides electrical energy to a railway train through a continuous rigid conductor. Mostly third rail systems supply direct current electricity. Trains have equipments to provide energy named shoes that make contact with conductor rail. The structure of these shoes was shown and explained.

In fifth chapter, overhead rigid conductor system was introduced. An overhead rigid conductor is formed by an aluminum alloy profile and copper wire attached it. Firstly, some terms interested in rigid catenary system were explained. Then components of this structure and advantages comparing the others electrification methods are introduced. An example used system was explained with structural specifications.

In sixth chapter, firstly finite element method and its basic approaching were explained and then femm programme used in this thesis for analysis was introduced. Theoretical basics of the finite element method with formulas were expressed.

How to use Femm programme was introduced. Firstly, an example magnetic problem was modeled on the programme.

Aluminum alloy and copper wire were modeled with their width length and then its electrical conductivity described measure in Megasiemens over meter. The model was scratched measure in millimeter. The cross sectional area of copper wire is 150 square millimeters. Nominal current goes from wire is 1200 amperes. Frequency 0 Hz was taken seeing that DC feeding was applied. Depth of the problem is 11 meters. Outside and inside of aluminum alloy includes air. Aluminum alloy and copper wire were described as a series circuit. Together with these values, magnetic analysis was made and found results from the points of current density, magnetic flux density and field intensity.

On the next section of this chapter was taken width is 3 meters, length is 4,7 meters. Ground level was described as zero voltage. For electrostatic analysis, the boundary conditions were described with voltage information. Respectively for 750 V, 1000 V, 1500 V and 3000 V DC voltages, analyses were made and found distribution of voltage, electrical flux density and field intensity. The results of analyses were given with the graphics. In the next section, a passenger has been waited on the platform in the height of 1 meter from level of rails at the underground stations.

The height of passenger is 1,86 meters. In this section, two different conditions were examined. First of them, when train has been not come to the station yet. Secondly when train came to the station. Due to simux railway simulation program, Kadıköy-Kartal line was modeled and given some information about drawn maximum and rms currents for a minute from this line. Train which includes eight rolling stocks, works at two minutes operating range.

For different parts of body, the magnetic permeability of human body was taken between 0,99999096 and 0,99999221 being too close to 1. Then along the all line, the locations of stations were determined. In the light of this information, the moment that train takes passengers, maximum currents drawn from line were determined. By use of this information that a passenger is exposed to how much magnetic flux density and field intensity were determined. All line is 21 kilometers and there are 16 stations on the line. As return conductor, a third rail in parallel with other two carrier rails was drawn. The passenger has been waited on the concrete platform. The carrier rails were made of steel. Third rail was made of copper and ceramic isolator was founded at its below. It was supposed that were at same values but reverses direction of drawn currents from overhead rigid conductor and return conductor. The carrier rails' gauge is 1,3 meters.

The biggest value of the maximum currents was measured in Cevizli station. For each station, repeatedly analyses were made and found magnetic flux density and field intensity values at head and foot regions. Currents drawn by trains change depending on geometry of the line. The reason of current drawn at values less is giving back current to mutual dc bus bar system. Also in these systems, regenerative power acquired during the breaking is transferred to line. Others trains near in the related region can use transferred back currents. For a better consideration in next section, using rms values of currents, analyses had been repeated. Firstly, for this purpose, rms values of currents in the region at a minute had been determined by the aid of simux programme. The biggest value of rms currents is in Cevizli station and then second biggest value had been seen in Ayrılıkcesme station. According to currents, exposed magnetic flux density's gap is between 100 and 250 μT values.

In the next section, according to second situation: when train came to the station, using the same current values. Analyses have been repeated. It has been researched whether was dangerous of results for human health. The properties of this model are same such as previous one. Differently this model includes a train which its made of pure iron and was modeled such as a cage which its inside was air.

Trains' height is 3,5 meters and its weight is 1,5 meters. Aluminum alloy and copper wire are as a series circuit and current of this circuit changes in accordance with stations. Firstly for maximum currents and then for rms values of currents in a minute period analyses had been made. Results had given as a table.

When we evaluated these results, at the head region was the nearest part of the body to catenary line, magnetic flux density and field intensity have increased further by comparison with previous condition (no train). At foot region was the longest part of the body to rigid line, magnetic flux density and field intensity have decreased by comparison with previous condition (no train). The reason is that train makes a shielding. Iron is a powerful ferromagnetic material and because of this reason, it has been increased flux density and field intensity values for the upper part of body in the region near to catenary line.

In the next section, electrostatics analyses were made for different situations (there is train in the station and no train in the station). According to standards, for 1500 Volts nominal voltage, lowest permanent voltage is 1000 Volts, highest permanent voltage is 1800 Volts. Respectively, it was supposed to these values were on the bus bar and the return conductors' voltages were 60 Volts for 1500 Volts on the rigid bus, 100 Volts for 1800 Volts on the rigid bus, 40 Volts for 1000 Volts on the rigid bus. In this model the return conductors' below exists porcelain isolator. The carrier rails and waiting platform were grounded. After analyses, it was determined between head and foot, distribution of voltage, electrical flux density and field intensity values. These results were given as graphics and tables. When we have evaluated these results, if voltage increase, electrical field intensity increase, too. For 1800 Volts on the rigid bus, the highest field intensity value is near to 562,2 V/m.

In the next section, there is a train in the station and others modeling features are same as previous one. The biggest value of field intensity is 47 V/m for 1800 Volts highest permanent voltage.

In seventh section, static fields had described and its properties mentioned. Natural origin and artificial fields and non-ionizing fields had mentioned. ICNIRP has published some standards about static fields. If there is a train in the station, magnetic flux density on the body is near 497 μT , if there is no train, flux density on the body is near 362 μT . These values are below of standards published by ICNIRP and Council of European Union. However, these values can be dangerous for humans who are wearing implanted ferromagnetic and electronic medical devices sensitive to magnetic fields.

Especially for a better assessment of the effects of DC railway systems to human health must be done more studies. Technical personals work in railway sector should be well trained. Magnetic fields measurement and controls should be done effectively. In our world developing in same speed with technology, we should protect the public health.

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun zamanla artan ihtiyaçları ulaşımın önemini de arttırmıştır. Daha hızlı daha konforlu ulaşım, insanların beklentileriyle orantılı olarak gelişme göstermiştir. Demiryolu ulaşımının tarihi çok eskilere dayanmaktadır. Demiryolu sistemleri genel olarak raylar, enerji besleme sistemleri, sinyalizasyon ve haberleşme sistemleri ile mekanik yapılar ve taşımacılıkta kullanılan araçlardan oluşur. Türkiye'nin bir çok ilinde kent içi ulaşımında hafif raylı sistemler ve metro sistemleri kullanılmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tezde raylı sistem türleri tanıtılmış ve bunların elektrifikasyonunda kullanılan yöntemler incelenmiş yöntemlerin üstünlükleri ve eksiklikleri belirtilmiştir. Raylı sistem elektrifikasyonunda kullanılan çözümlerden biri olan rijit katener sistemi araştırılmıştır. Femm programı yardımıyla modellenen iletken profilin çevresinde ve yakınlarında meydana gelen elektrik alan, manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti yönünden incelemeler yapılmıştır. Peronda tren bekleyen bir yolcunun maruz kalacağı elektriksel ve manyetik büyüklüklerin insan sağlığına etkisi incelenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Raylı sistemlerin elektrikleştirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalar genellikle bu besleme sistemlerinin geliştirilmesi ve daha ekonomik hale getirilmesiyle ilgili araştırmalardır. Ülkemizde son yıllarda demiryolu yolcu taşımacılığı, hizmete giren hızlı tren hattı ile daha da önemli hale gelmiştir. Bu konuda ülkemizde yapılan çalışmaların sayısı da hızla artmaktadır. Tezin hazırlanmasında MEGEP'in raylı sistemlerle ilgili çeşitli dokümanlarından, ICNIRP'nin statik alanlarla ilgili yayınladığı çeşitli raporlardan, Sheilah Frey'in "Railway Electrification Systems& Engineering" adlı kitabından, elektrifikasyon ve statik alanlarla ilgili makalelerden ve raporlardan yararlanılmıştır.

1.3 Raylı Sistemlerde Elektrifikasyonun Tarihi

Bu bölümün hazırlanmasında Sheilah Frey'in "Railway Electrification Systems & Engineering" adlı kitabından faydalanılmıştır. Demiryolu elektrifikasyonu kavramı 19.yüzyılın sonlarında ortaya çıkmıştır. Thomas Davenport 1834'te batarya gücüyle çalışan ya da bataryadan beslenen raylarda giden lokomotifler için ring demiryolu inşa etti. Bilinen ilk elektrikli lokomotif Robert Davidson ve Scotsman tarafından 1837 yılında yapılmıştı ve galvanik hücrelerden güç alıyordu. Robert Davidson'un 1839'da yaptığı elektrikli lokomotif, saatte 4 mil hızla, Edinburgh-Glasgow arasında çalıştırılmıştır. Elektrikli lokomotiflerin ilk örneklerinin batarya gücüyle çalıştırılması planlanmıştır. İlk elektrikli yolcu treni 1839 yılında Berlin'de Siemens tarafından tanıtılmıştı. Lokomotif 2,2 kW'lık motor tarafından çekiliyordu ve üç vagona sahipti. 13km/sa'lık maksimum hıza sahipti. Dört ay boyunca tren 90.000 yolcu taşıdı. Elektrik diğer iki raydan izole olmuş üçüncü raydan taşınyordu.

1880 yılında Thomas Edison, motor olarak bir dinamo, akım taşıyıcı olarakta rayları kullanan küçük bir elektrikli demiryolu inşa etti. Elektrikli çekişin birçok faydası vardı ve buda buhar gücüne karşı galip geldi. Elektrikli çekişin, ağır trenlerin istediği gücü karşılaması ve çabuk hızlanmayı sağlaması onu özellikle önemli kıldı.

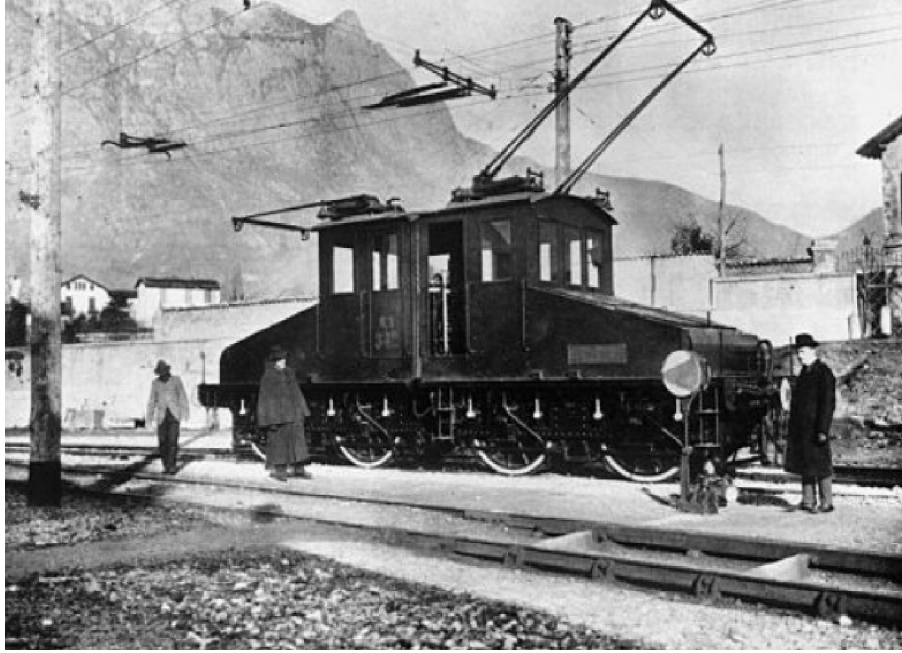
20. yüzyılın ilk yirmi yılında birçok model ortaya çıktı. Dünyanın ilk elektrikli tramvay hattı 1881 yılında Berlin yakınında Lichterfelde bölgesinde açılmıştı [1]. Şekil 1.1'de ABD'de açılan elektrikli lokomotif hattı gösterilmiştir.



Şekil 1.1: ABD'de 1895 yılında açılan elektrikli lokomotif hattı [1].

İlk pratik AC elektrikli lokomotif Charles Brown tarafından tasarlandı. Elektrifikasyonun kullanıldığı ilk hat, 1895 yılında açılmış olan, elektrikli lokomotifin kullanıldığı 4 millik Baltimore-Belt hattıydı (Şekil 1.1). Havai iletken, hattın geçtiği tüneldeki en yüksek noktada bulunuyordu ve esnekti.

Şekil 1.2’de görülen İtalya’nın kuzeyinde Valtellina hattında çalışan AC lokomotif, 3000 V, 3-fazlı, 15 Hz’lik bir güçle besleniyordu. 106 km’lik Valtellina hattı 4 Eylül 1902’de açılmıştı [1].



Şekil 1.2 : (1898-1902) Valtellina hattında AC lokomotif [1].

1923’ten 1960’lara kadar Avrupa’nın çoğu ülkesi elektrifikasyonla tanıştı ve bu sistemlerin gelişimi sürekli olarak devam etti. 1980’lerde elektrifikasyonun gelişmesi son derece önemli olayların önünü açtı. Japon Shinkansen ve Fransız TGV sıfırdan başlayarak ilk yüksek hızlı tren hatlarını inşa ettiler. 2 Eylül 2006’da Siemens’in Eurospinter ES-64-U4 model elektrikli lokomotifi 357 km/sa’lık bir hıza ulaştı.

TGV şu anda dünya hız rekorunu konvansiyonel, tekerlekli ve raylı trenler arasında elde tutuyor. 1990’da 515,3 km/sa (320,2 mph) olan dünya rekorunu kırdı [2]. Bu günümüzde bir trenin ulaştığı en yüksek hız olarak kaydedilmiştir.

2. DEMİRYOLU ELEKTRİFİKASYON SİSTEMLERİ

2.1 AC ve DC Besleme

Ana hat demiryollarında (uzak mesafelerde) yaygın olan elektrik besleme sistemi, 50 Hz şebeke frekanslı, tek fazlı, 25 kV AC sistemidir. Daha kısa mesafeler için ise (şehir içi ulaşım) DC besleme sistemi kullanılmaktadır. Şehir içi ulaşımında yaygın olarak kullanılan metro ve hafif raylı sistemlerde genellikle 750 V DC besleme kullanılmaktadır. 750 V DC besleme daha çok eski sistemlerde kullanılmaktadır. Bu besleme değeri sistemdeki artan araç talebi ve daha sık sefer sayısı ile birlikte daha yüksek besleme gerilimine ihtiyaç duymaktadır. Böylelikle eski sistemlerde daha yüksek besleme gerilimlerine uyarlanabilmektedir. AC ve DC sistemler birbirinden farklı görünebilir ama pek çok ortak yönü de vardır. Bunun nedeni yakın zamanlara kadar elektrikli trenlerin genelde 750 V DC motorlarla çalıştırılmasıdır [5].

2.2 DC Besleme

DC sistemlerde elektrik enerjisi 33 kV veya 11 kV olarak şebekeden alınıp taşımacılık güzergahı boyunca yerleştirilmiş indirici trafo merkezlerinde daha küçük bir gerilime dönüştürülür. Bu indirici merkezler, sistemin besleme ihtiyacına göre 3-7 km aralıklarla güzergah boyunca kurulur. Bunlar sistemde gerilim düşmelerini engeller. İndiriciler tarafından değeri düşürülen gerilim, doğrultularak besleme sistemine katenere ya da raya verilir. Önceleri elektrikleendirme sistemleri, DC besleme kullanıyordu. Elektrik motorları doğrudan seri ya da paralel bağlı motorlar, direnç ve rölelerin oluşturduğu devre elemanlarıyla kontrol ediliyordu. En yaygın DC gerilimler metro ve tramvaylar için 600 V ve 750 V'dir. Düşük gerilimlerde sıklıkla 3. ya da 4. ray teknolojileri kullanılır. 1 kV ve üstü gerilimlerde güvenlik sebeplerinden dolayı havai hat kullanımı tercih edilir. Hamburgtaki banliyo tren hatları (S-Bahn) 1200 V'lik üçüncü ray kullanılarak işletilmektedir. 1976'ya dek Fransız SCNF şirketi Culoz-Modane hattında 3.ray teknolojisi ile 1500 V'de işletiyordu [1].

Londra'nın güneyinde 750 V'lik 3. ray kullanırken, Londra metrosu 650 V'lik 4.rayla işletiliyordu. 20. yüzyılın ortaları boyunca, şebekedeki AC gerilimi besleme istasyonlarında ihtiyaç duyulan gerilime çevirmek için döner çeviriciler ve civalı ark doğrultucular kullanılıyordu.

Bugünse bu işlem, şebeke gerilimi düşürüldükten sonra yarıiletken doğrultucular yardımıyla yapılmaktadır. DC sistem oldukça basittir ama yüksek akımlardan dolayı istasyonlar arasında kısa mesafeli kalın kablolarla ihtiyaç duyar. Dirençten dolayı oluşan kayıplar da önemlidir. İngiltere'de 750 V DC gerilimde bir trenin çektiği akım 6800 A seviyesindedir. Besleme istasyonları anlık izlenmeye ihtiyaç duyar ve çoğu sistemde izin verilen bir kısımda bir tren veya lokomotif bulunabilir. 750 V'de 3.ray beslemeli bir sistemde iki besleme noktası arası mesafe yaklaşık 2,5 km'dir.

3 kV'de ise iki besleme noktası arası yaklaşık 25 km'dir. Direk  ekiş gücünden beslenen havalandırma ve kompresör gibi elemanlar varsa, daha yüksek bir gerilime duyulan ihtiyaç arttıkça bu yalıtım ihtiyacını da arttırır. 1500 V DC Hollanda, Japonya, Hongkok, İrlanda'da; 3 kV DC ise Belçika, İtalya, İspanya gibi ülkelerin metro sistemlerinde kullanılmaktadır [1]. şekil 2.1'de bir hafif raylı sistem aracı gösterilmiştir.

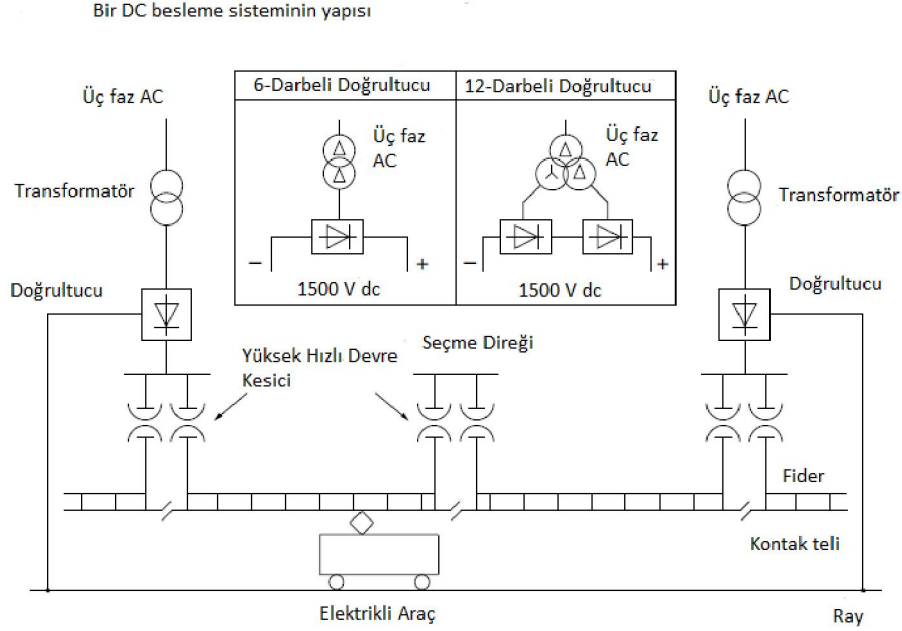


şekil 2.1: Havai hatla beslenen bir hafif raylı sistem aracı [3].

2.2.1 DC Besleme sisteminin yapısı

Bir DC sistem, akımı çevirmek için üç fazlı yarıiletken köprü doğrultucu barındırır. Üç fazlı doğrultucular 6 darbeli bir sistem kullandığından bu durum AC tarafta düşük harmoniklere ve dalga formunda bozulmalara yol açar ve güç kalitesini azaltır.

Harmonikleri azaltmak için seri ya da paralel bağlı 30° faz farklı AC giriş gerilimli, iki takım 6 darbeli doğrultucu devresi bulunduran, 12 darbeli daha modern bir doğrultucu tasarımı kullanılır. Şekil 2.2’de en yakın alt istasyona bağlı bir doğru akım besleme devresinin yapısı görülmektedir.



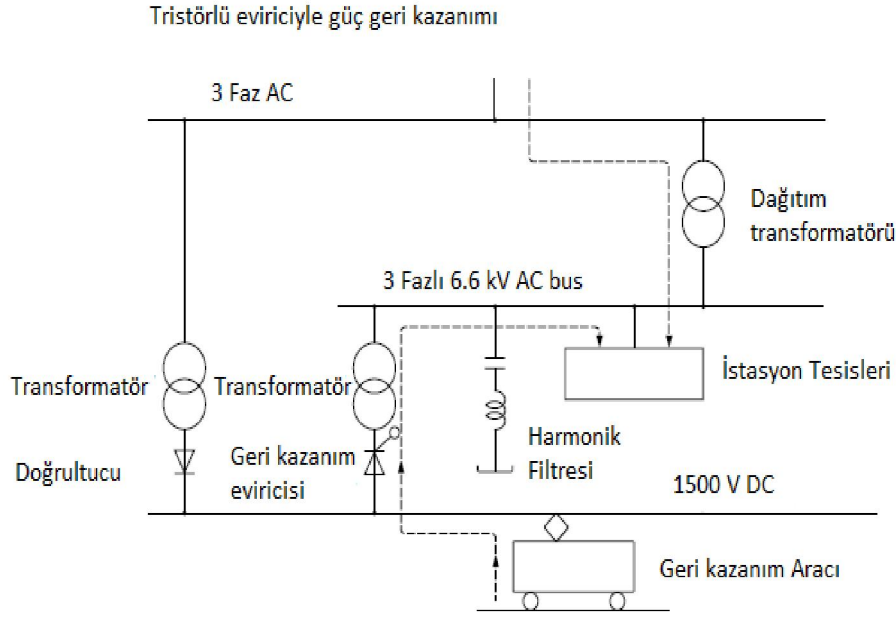
Şekil 2.2 : DC besleme sistemi [4].

Bazen seçme ve gergi direkleri gerilim düşmelerini engellemek için alt istasyonlardaki raylarda ayrı olarak konumlanmıştır. Bu durumda yukarıdaki ve aşağıdaki raylar birbirinden yüksek hızlı devre kesiciyle ayrılmıştır. Alt istasyonlar arasındaki uzaklık yaklaşık 5 km’dir [4].

2.2.2 Güç geri kazanımı

DC beslemeli taşıma sistemlerinde güç geri kazanımı, ağırlığı azaltmak ve enerji tasarrufunu sağlamaya yöneliktir. Bu amaçla yavaşlama sırasındaki hareket enerjisinin elektrik enerjisine çevrilmesi ve havai hatta enerjinin verilmesi tasarlanır. Fakat geri kazanılmış güç o anda hattın ilgili kısmında bir araç yoksa boşa gitmiş olur. Bu kayıplar tristörlü eviriciler, tristörlü doğrultucular, tristörlü kıyıcı dirençler, eş zamanlı beslenen yukarı aşağı raylar sayesinde engellenebilir. Bu gibi araçlar hattın bazı bölümlerinde kullanılırlar. Şekil 2.3’te tristörlü evirici devresi gösterilmiştir. Bu sistemde tahrik gücü bir doğrultucudan desteklenir ve geri

kazanılabilecek güç tahrik gücü için gereken en az seviyeye geldiğinde istasyona güç vermek için evirici otomatik olarak devreye girer [4].

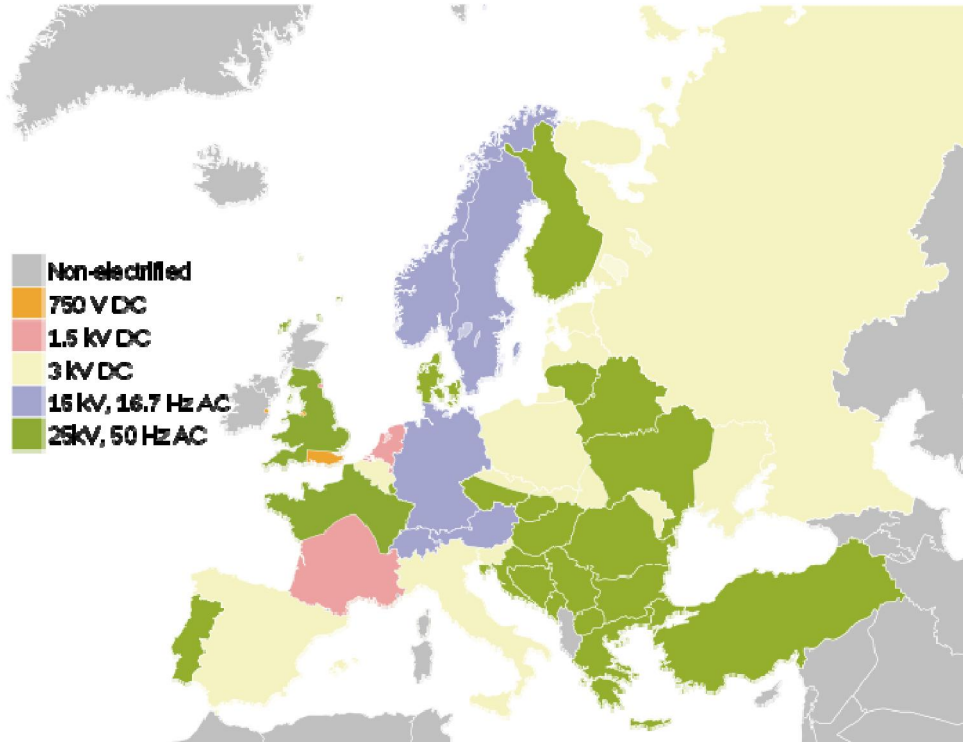


Şekil 2.3 : Güç kazanımı devresi [4].

2.3 AC Besleme

AC sistemlerde şebekeden alınan gerilim (132 kV ya da daha üstü) indirici trafo merkezlerine gelir. Burada 25 kV'ye indirilen gerilim enerji besleme hattına verilir. Besleme merkezlerinin arası 40-60 km mesafede olabilir. Katener sistemi yardımıyla enerji beslemesi sağlanır. Tren üzerinde bulunan pantograf isimli kayar bir iletken tarafından hatta temas edilerek enerji alınır. Bu enerji trenin içerisinde bulunan transformatörler aracılığıyla uygun değere indirilip doğrultularak DC çekiş motorlarına uygulanır. AC ve DC elektrikleştirme arasındaki temel fark, DC sistemde şebekeden alınan elektrik, yol boyunca konumlandırılan transformatörler aracılığıyla indirilip doğrultularak hatta verilirken; AC sistemde indirici ve doğrultucular tren üzerinde bulunur. Yüksek kapasite ve yoğunlukta daha düşük hızda trenler dakika aralığıyla çalışıyorsa DC sistem; yüksek hızlı ve güçlü şehirlerarası çalışan, sıklığı daha az olan trenler için AC besleme daha ekonomik olur [5].

2.4 Elektriksel Besleme Sınıflandırması



Şekil 2.4: Avrupa’da elektriksel besleme sınıflandırması [1].

Yüksek hızlı trenler Fransa, İspanya, İtalya, İngiltere, Hollanda, Belçika ve Türkiye’de 25 kV AC güçle işletilmektedir. İzin verilen işletme gerilimleri BS EN 50163 ve IEC 60850 standartlarıyla belirlenmiştir.

Çizelge 2.1 : Standartlara göre izin verilen gerilimler [1].

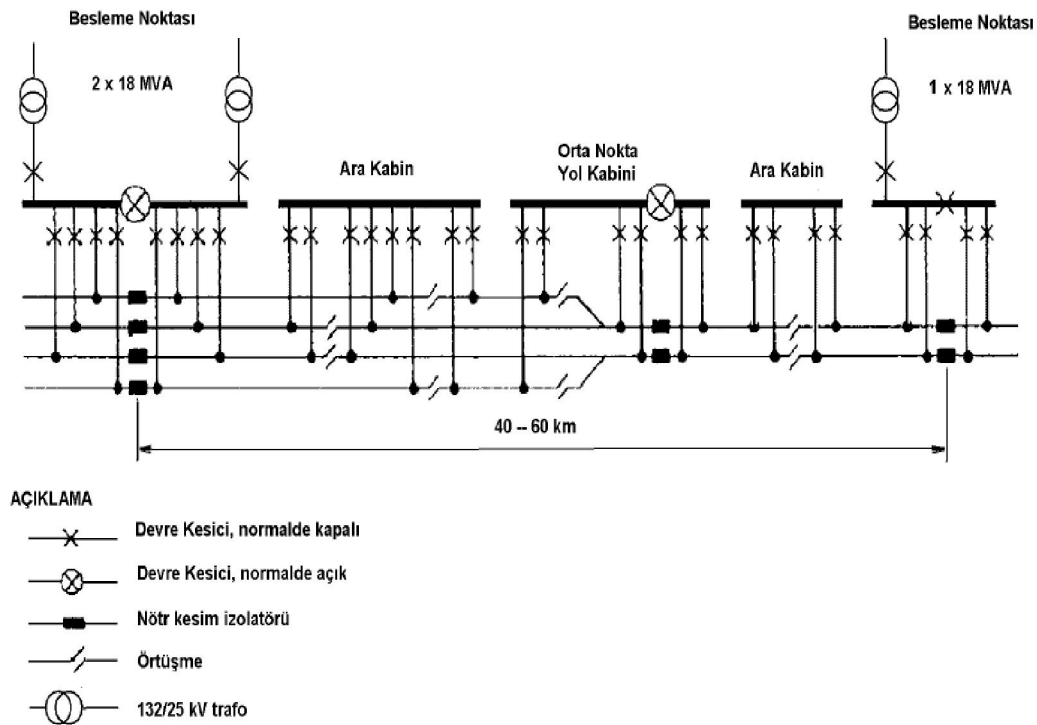
Besleme Gerilimleri	En düşük sürekli olmayan gerilim	En düşük sürekli gerilim	Nominal gerilim	En yüksek sürekli gerilim	En yüksek sürekli olmayan gerilim
600 V DC	400 V	400 V	600 V	720 V	800 V
750 V DC	500 V	500 V	750 V	900 V	1 kV
1500 V DC	1000 V	1000 V	1500 V	1800 V	1,95 kV
3 kV DC	2 kV	2 kV	3 kV	3 kV	3 kV
15 kV AC (16,7 Hz)	11 kV	12 kV	15 kV	17,25 kV	18 kV
25 kV AC (50 Hz)	17,5 kV	19 kV	25 kV	27,5 kV	29 kV

2.5 AC Enerji Sağlanması

AC enerji beslemesinde 40-60 km aralıklarla besleme merkezleri bulunur. Bu mesafeler hat boyunca gerilim düşümünün istenen değerler arasında tutulmasında rol oynar. Elektrik enerjisini besleme noktalarına 33 kV ve 400 kV arasında bir gerilimle taşımak mümkünse de DC sistemde oluşacak geçici olayların, katener sistemine yansımalarını önlemek için bu değer 132 kV ya da daha üstü bir gerilim olması istenir. Katener hattına verilen gerilim tek fazlıdır. İndirici trafo girişi yüksek gerilimli üç fazlı hattın iki fazına bağlanmıştır. Bu bağlantı dengesiz yüklenmeyi azaltır. Hat boyunca besleme noktalarında indiriciye bağlanan hatlar dönüşümlü bağlanmalıdır. Böylece bir trafo servis dışı olduğunda o hat kesiminin iki tarafındaki hatların aynı faz çiftine bağlanmış olması önlenmiş olur [5].

2.6 AC Sistem Besleme Noktaları

Normal şartlarda her bir besleme noktası, iki besleme noktasının ortasına yerleştirilecek orta nokta kabinlerine kadar hattın iki tarafını da besler. Orta nokta kabinlerinde devre kesiciler bulunur. Bu kabinler hatları ayırma ve paralelleme işlevi de yapar. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi havai katener hattının başka kesimlere ayrılması ve paralellenmesi ara kabinlerde gerçekleşir.



Şekil 2.5 : Örnek 25 kV’lik besleme düzenlemesi [5].

2.7 Havai Kataner Hattı Bileşenleri

Elektrik gücü, 25 kV anma gerilimi olan bir havai kataner hattı ile trene aktarılır. Normal kataner sistemi, zig-zaklı giden kontak teli ve akım ihtiyacına göre seçilen bir veya iki adet taşıyıcı kataner telinden oluşur. Bu iletkenler akım ihtiyacını karşılamazsa ilave fider iletkeni çekilebilir. Seyir teli pandül denilen sarkıtlarla kataner hattına tutturulur. Kataner hattında aralarındaki mesafenin en fazla 73 m olduğu direklerde, çubuklar üzerine veya çerçevelere tutturulurlar. Şekil 2.6'da İngiltere'de kullanılan bir metro sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.6 : İngiltere'de 1500 V DC kullanan Tyne –Wear metrosu [1].

Trenin üzerinde tele temas eden pantograf adlı parça, seyir telinde tek noktada aşınmaya yol açmaması için zig zak çizerek hareket ettirilir. Taşıyıcı kataner tellerinin akım taşıma dışındaki görevi kontak telini taşımaktır. Kontak teli dropper veya pandül denilen esnek, örgülü bakır iletken teller ile taşıyıcı durumunda olan kataner tellerine asılmaktadır. Akım alma işleminin iyi olması için doğru esneklik sağlanmalıdır. Pantografin kontak teline teması mümkün olduğunca esnek ve hat boyunca kesintisiz olmalıdır. Kontak teli pantografin itmesiyle esnekliği oranında yükselir. İki askı noktası arasındaki yükselme miktarı, askı noktalarındakine göre daha fazladır. Bu durum doğrudan işletme hızını etkileyen faktördür.

Taşıyıcı kataner telleri örgülü bakırdan, kontak teli ise katı oluklu ve sert çekilmiş bakırdan üretilmektedir. Tellerin anma kesiti çoğunlukla 107, 120 mm² veya 150 mm² dir [6]. Termal ve gergi kapasitesini arttırmak için gümüş (Ag) veya mangan

(Mn) katkılı kontak telleri de kullanılmaktadır. Normal şartlarda kontak teli uzun yıllar sorunsuz çalışabilir. Çevresel koşullar, iklim şartları ve işletme şartları nedeniyle pantograf teması ile birlikte kontak telinde aşınma meydana gelir. UIC standartlarında kontak telinin nominal kesitinin %20 si aşıldığı zaman değiştirilmesi tavsiye edilmektedir. İşletme hızının düşük olduğu nostaljik veya cadde tramvaylarında, depo ve garaj sahalarında sabit gergili basit katener sistemi kullanılır.

Böyle bir sistemde katener etapları doğrudan askı noktalarında sonlandırılır. 100 km/sa'ya kadar olan hızların yapıldığı tramvay, hafif metro, metro sistemlerinde otomatik gergili, basit katener sistemi kullanılır. Her bir etap, iki ucundan denge ağırlık gergi düzeneği ile gerilir. Otomatik gergi sistemi, iletken gerginliğinin hava sıcaklık değişimlerinden etkilenmesini engeller. Katener teller ve kontak telleri birlikte gerilebileceği gibi ayrı ayrıda gerilebilir. Sistem yüksekliğinin (askı noktalarında katener ve kontak teller arasındaki mesafe) 1,4 m ve daha fazla olduğu bazı sistemlerde de katener teller sabit tutulurken kontak teli gerilebilir. Katener iletkenleri direk ve konsol düzenekleri ile taşınır. Sistem yüksekliği 1 m olan katener sisteminde, iki direk arasındaki mesafe düz yolda maksimum 60 metredir. Havai hat katener tesisleri belirli bölgelerde besleme bölümlerine ayrılırlar. Enerji bakımından birbirinden ayrılmış katener bölgelerine bölümlü bölge adı verilir. Enerjinin hat üzerinde bölgelere ayrılacağı noktalara, bölge izolatörleri konulur. Bu izolatörler paralel olarak çalışan, yalıtılmış fosfor-bronz kızaklardan oluşur ve her iki yönde kesintisiz akım sağlarlar. Enerji bakımından birbirinden ayrılmış katener bölgeleri gerektiğinde bir ayırıcı vasıtasıyla by-pass edilerek birleştirilebilir [6].

2.8 Katener Sistemlerinde Kullanılan Kablolar

Bir katener sisteminde trafo merkezinden ayırıcı direklerine kadar kablolar kullanılmaktadır. Teller bölümün sonunda bölüm başlıklarındaki numaralara uygun olarak bir resimde gösterilmiştir. Bu bölümün hazırlanmasında Mustafa BELLEK'in ilgili makalesinden yararlanılmıştır [6].

2.8.1 Besleme kabloları

Trafo merkezlerinden ayırıcı direklerine kadar enerji iletimi çeşitli şekilli kablolarla yapılmaktadır. Genellikle PVC yalıtkanlı $3 \times (1 \times 500 \text{ mm}^2)$ kesitli kablolar yeraltından çekilmektedir.

Bu kablolar genellikle elik zırlı, alüminyumdan imal edilirler. Trafo merkezinde dönüştürülen gerilimi katener hattına aktarmak için kullanılır.

2.8.2 Fider teli

Her bir yol için ayrı olarak katener direklerine tünellerde ise duvarlara monte edilen mesnet izolatörleri ile taşınırlar. Katener telinin akım taşıma konusunda yetersiz kaldığı durumlarda, akım taşımaya yardımcı olması için fider telleri kullanılır. Katener telleri ile benzer özelliklere sahiptirler.

2.8.3 Katener teli (Taşıyıcı teli)

Katener teli 19 adet 2,8 mm çapında sert çekilmiş bakır iletkenin örölerek birleştirilmesiyle yapılır. Maksimum hızı 100 km/sa olan bir sistem için anma kesiti 120 mm² çapı 14 mm, akım taşıma kapasitesi her bir katener teli için 400 A'dır. Bazı durumlarda akım kapasitesini arttırmak için bu telden iki adet kullanılır. Buna ikiz katener denir.

2.8.4 Kontak teli (Seyir teli)

Sert bakırdan çekilmiş, pantografin darbesiz teması için alt yüzeyi yuvarlatılmış ve uzunlamasına iki kanalı olan bir iletken teldir.

2.8.5 Jumper teli

Katener hattının belirli bölümlere ayrılmış olmasıyla, bölümler arasında sistemde enerji akışının devam etmesi amacıyla sona eren hat ile başlayan hat arasına, atlama kabloları (jumperlar) bağlanmıştır. Aynı amaçla kontak teliyle katener teli arasında da bulunmaktadır.

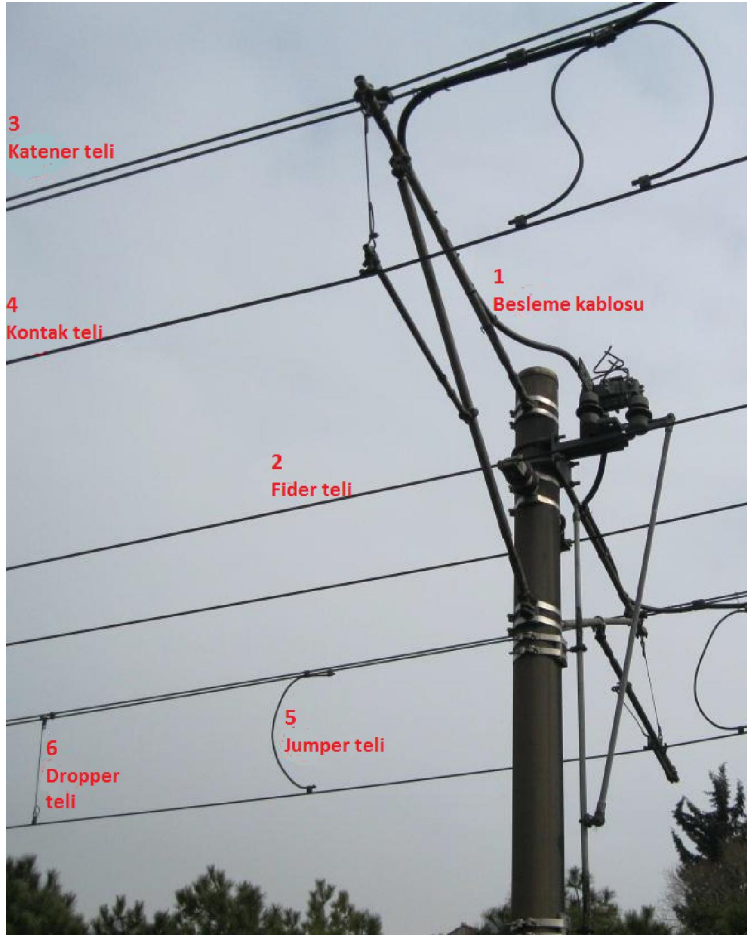
Bu görevi yapan teller yalıtımsız bakır iletken olup katener sistemi sıcaklığa bağlı olarak uzama ya da kısalma yaptığından jumperlarda fazlalıklar bırakılmıştır.

2.8.6 Askı teli (Dropper, Pandöl)

Askı telleri hem kontak telini taşır hem de katener teli ile kontak teli arasında enerji aktarma görevini yapar. 16 mm² kesitli esnek ve örgülü bronz iletkenlerden yapılmışlardır. Belirli bir mesafede, ikiz katener ile kontak teli arasına eşit aralıklarla tutturulmuştur.

2.8.7 Geri dönüş kabloları

Cer motorlu araçlar, akım devresini ray üzerinden tamamlamaktadır. Trafo merkezinde üretilen DC gerilimin (-) negatif kutbu, 500 mm² kesitli, PVC izoleli, alüminyum ve çelik zırlıklı/ekranlı kablolarla trafo merkezlerinin bulunduğu bölgelerde, yol kenarındaki yer altı boşluklarının içinde bulunan negatif dönüş baralarına taşınmaktadır. Bu baralardan da, 8 adet 120 mm² kesitli, PVC yalıtkanlı, bakır iletkenli kablo ile her iki yola ait raylara ulaşırlar. Şekil 2.7’de havai katenerde kullanılan kablolar gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Havai katener hattında kullanılan teller [6].

3. PANTOGRAF

Elektrik enerjisiyle çalışan tren ve tramvaylar için havai hattın akımı toplayan birimdir. İlk olarak 1895 yılında Baltimore & Ohio demiryolu elektrikli lokomotif hattında düz pantograf kullanıldı. Hatla temas $\cap$ şeklindeki kısımda gerçekleşiyordu. Benzer döner elmas pantograf John Q. Brown tarafından yapıldı [1]. Şekil 3.1’de elmas biçimli bir pantograf, Şekil 3.2’de ise z biçimli pantograf gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : 1911 yılında yapılmış elmas biçimli bir pantograf [1].



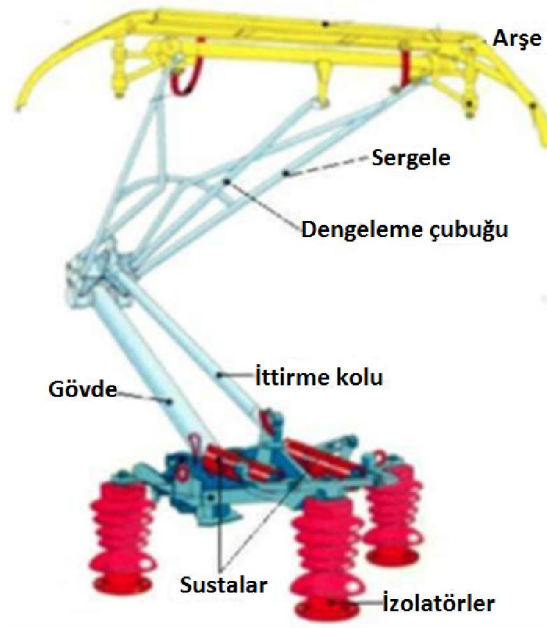
Şekil 3.2 : Z biçimli (asimetrik) modern bir pantograf [1].

Günümüzde en çok kullanılan tasarım z biçimli (yarım) pantograftır. Çok yüksek hızlı trenlerden düşük hızlı banliyö trenlerine dek kullanılmaktadır. Yüksek ve düşük hızların ikisi içinde uygundur. Pantograflar tramvay kollarının bir ileri teknolojisidir. Şekil 3.3'te tramvay kolu gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Tramvay kolları [1].

Tramvay kolları trolleybüslerde hala kullanılmaktadır. İki kablolu devreler pantograflara göre çok daha pratiktir. Pantograflar ayrıca üçüncü raydan çok daha pahalı ve kırılgan olmalarına karşın daha çok akım taşımaya elverişli olduklarından yoğun olarak tercih edilirler. Pantografların hareketi trenin fren sistemindeki sıkıştırılmış hava kullanılarak kontrol edilir. Şekil 3.4'te pantografin parçaları gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Pantografin parçaları [7].

Pantograf araçların çatısında bulunur. Şaseden izolatörler yardımıyla yalıtılmıştır. Hattın genişliğine göre büyük ya da küçük pantograf kullanılır. Karbon grafit kömürler arşe üzerine kurulmuştur. Bu yapıların pantografin her yerinde aynı yükseklikte olması gerekir. Bu koşula dikkat edilmezse kömürlerde dengesiz aşınma meydana gelir. Pantograf aldığı enerjiyi mafsal bağlantı noktalarında kamçı diye adlandırılan örgülü iletkenlerle kesiciye aktarır. Pantografin mekanik gövdesi de enerjiyi aktarmada iletken olarak kullanılmıştır. Ülkemizde kullanılan bazı elektrikli lokomotiflere ait pantografların özellikleri belirtilmiştir [7].

- ✓ Boynuzlar arası mesafe: Büyük 1950 mm, küçük 1600 mm
- ✓ Maksimum açılma mesafesi: 2,6 m
- ✓ 0,5 m-2,25 m kalkış süresi: 8-10 saniye
- ✓ 2,25 m-0,5 m iniş süresi: 6-8 saniye
- ✓ Ortalama katener teline baskı kuvveti: 7 kg

3.1 Pantografin Parçaları

3.1.1 Pantograf arşesi

Pantograf arşesi genellikle karbon grafit malzemeden yapılmış arşe kömürü, arşe bağlantı parçası ve izole boynuzdan oluşur. İzole boynuz, cam elyaf üzeri polyester dolgu malzemesinden yapılmıştır. Pantograf kömürü katener teline sustalar tarafından ortalama 7 kg temas basıncı ile tutunmaktadır. Pantograf baskı kuvveti ayarının düşük olması kömür ile katener teli arasında ark oluşmasına neden olur.

3.1.2 Pantograf sergelesi

Ana gövde ile arşe arasında bağlantı elemanıdır ve elektrik akımını iletir.

3.1.3 Dengeleme çubuğu

Arşe kömürünün katener teline göre her yükseklikte yatay durumda olmasını sağlar. Arşenin ayar vidası yardımıyla kömürlerin yatay durumda olması ayarlanır.

3.1.4 İttirme kolu

Ana gövdeye bağlı olarak arşenin dengeli biçimde yükselmesini sağlar.

3.1.5 Ana gövde

Temel ve alt kol olarak iki parçadan oluşur. Pantografların izolatörler üzerine bağlanmasını sağlar. Üç adet pantograf mesnet izolatörü üzerine bağlanmıştır.

3.1.6 Sustalar

Sustalar pantograf hava motoru tarafından serbest hale geçtiğinde arşe kömürünün katener teline ortalama 7 kg kontak basıncı ile temas etmesini sağlar. Üzerinde bulunan ayar civatalarıyla istenen basınç kuvveti ayarlanır.

3.1.7 Pantograf motoru tanımı ve görevi

Pantografin indirilmesi ve yukarı doğru ilk hareketin verilmesini sağlar. Elektrovalf ile kumanda edilen basınçlı hava piston gönderildiğinde basınçlı hava susta basıncını yenerek pantograf indirme kolunu yukarı doğru iter ve pantograf serbest kalır. Böylece iki adet ana yayın çekme kuvvetiyle pantograf yukarı doğru harekete zorlanır. Pantograf indirilmek istenildiğinde elektrovalfin enerjisi kesilerek piston içindeki basınçlı hava tahliye edilir. Bu durumda hava motoru içindeki indirme yayı iki adet arşe kaldırma yayının kuvvetini yenerek arşenin aşağıya hareket etmesini sağlar. Piston ile pantograf arasında yalıtımı sağlayan tahrik yalıtkanı bulunur. Tahrik yalıtkanı üzerindeki ayar kolu pantografin maksimum açılma mesafesini ve pantograf arşesinin tam olarak inmesini sağlar [7].

3.1.8 Pantograf motoru yapısı

Basınçlı hava ile çalışan piston ve indirme yayından oluşur. Pantografin yukarı aşağı hareket süresi ayar valfi üzerinden yapılır. Piston içerisinde sızdırmazlık sağlayan piston manşet lastiği zamanla aşınarak hava kayıpları meydana gelir ve pantografin yükseltilmesinde arıza meydana gelir. Körük lastiği piston pininin dış ortamla temasını önleyerek paslanma ve korozyona karşı korur.

3.2 Tramvay Kolu

Tramvay kolu, ucuna doğru incelen tahtadan ya da metalden yapılan, tramvayın ya da trolleybüsün çekiş gücünü aldığı, havai hattın elektriği transfer etmek için kullanılan birimdir. Akım toplarken elektriği havadaki bir kablodan almak 1880'lerde Frank J. Spark'ın icadı olarak biliniyor. Tramvay kollarının yükselmesi ve alçalması elle kumanda edilen, aracın arkasındaki bir sopa yardımıyla mümkün

olmaktadır. Sopa, tramvay yakalayıcı adı verilen raylı bobin sisteminden oluşur. Tramvay yakalayıcısı otomatik emniyet kemeri gibi bir mandala sahiptir.

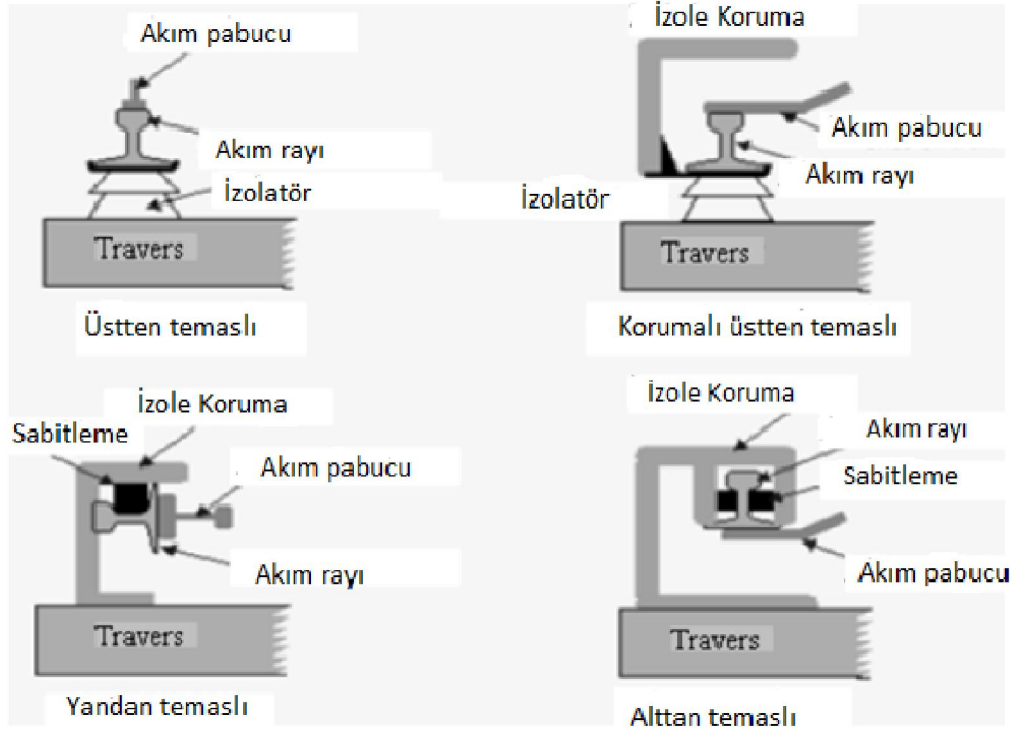
Kol kablodan ayrılırsa, sopa kolun yukarı doğru savrulmasını önler. Ek olarak kol kablodan ayrılırsa onu tüm kablolardan ve bağlantı parçalarından ayırarak aşağıya doğru çeken yaylı mekanizma bulunur. Yakalayıcılar genellikle şehir içi düşük hızla işletilen tramvaylarda kullanılır. Bazı eski sistemlerde kollar metal bir kanca yardımıyla yükseltilir ve alçaltılır. Trolleybüslerde kullanılan kollar ray gibi sabit bir düzlemde değil de caddelerde kullanıldıklarından tramvaylardaki kollardan daha uzundur ve bu otobüslerde olduğu gibi yolcuları, kaldırıma yanaşarak almada fayda sağlar. Tramvay veya farklı bir demiryolu aracı tek kol kullandığında bu kol havadan akımı alır ve dönüş iletkeni olarak çelik ray kullanılır. Trolleybüsler ise iki kol ve iki havai kablo kullanır. Bu kollardan biri akımı toplar diğer kol ise dönüş iletkeni olarak görev yapar [1].

4. ÜÇÜNCÜ RAY

Demiryolu araçlarına elektrik enerjisi sağlamak için kullanılan raylı aracın üzerinde hareket ettiği iki ray haricinde bulunan raya verilen addır. Bu yöntemde taşıyıcı rayların birinin dış tarafında diğer yaylara paralel olarak bulunan üçüncü ray hat boyunca devam eder. Nadiren üçüncü ray, diğer iki rayın ortasında bulunabilmektedir. Elektrik, araçların yan tarafında bulunan akım pabuçları aracılığıyla raydan trene aktarılır. Bu pabuçlar aracın her iki tarafında bulunur. Aracın hareket edebilmesi için pabuçlardan en az birinin rayla temas halinde olması gerekir. Üçüncü rayların üzeri genellikle yalıtkanla kapatılır. Böylece yağmur gibi hava koşullarından sistemin etkilenmesi önlenir ve de yolcu ve bakım çalışanlarının güvenliği sağlanmış olur. Pabuçlar yalıtkan kapağın yapısına göre çeşitlilik gösterir. Şekil 4.2’de temas yönüne göre akım pabucu gösterilmiştir. Yalıtkan kapağın konumuna göre pabuçlar üçüncü rayın üst kısmından, alt kısmından temas edebilir. Şekil 4.1’de akım pabucunun trendeki konumu gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Akım pabucu [8].



Şekil 4.2 : Temas yönlerine göre akım pabuçları [8].

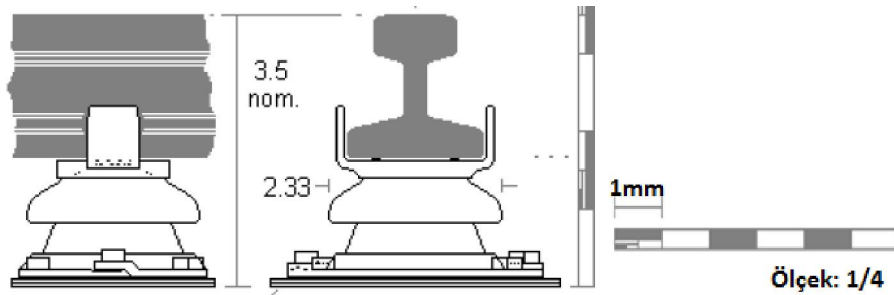
Elektrik enerjisinin kullanılabilmesi için akımın pabuç ile alınması ve devreyi tamamlanması gerekir. Bu amaçla taşıyıcı raylardan faydalanır. Taşıyıcı raylar sayesinde negatif akım trafo merkezine aktarılır ve devre tamamlanmış olur. Üçüncü ray çelikten üretilir. Üçüncü rayın elektrik iletkenliğinin yüksek olması ve kolay bükülebilmesi istenir. Üçüncü ray çeliğinde karbon miktarı bu sebeple düşüktür. Üçüncü rayın kurulum maliyeti havai katener hatlarına göre daha düşüktür. Olumsuz hava şartlarından etkilenmemesi bakımından tünel ve köprüler için uygun bir çözümdür. Ray hatları estetik yönden de havai hatlara göre daha uygundur. Singapur’da açık alanlarda havai hatların kullanılması görüntü kirliliği sebebiyle yasaklanmıştır. Akım pabuçları, iletken raya mekanik basınç uygulayarak temasın kopmasını engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Havai katener hatlarının bakımı ve onarımı üçüncü ray teknolojisine göre daha zordur. Güvenlik açısından bakılırsa iletken raylara temas eden, karşıdan karşıya geçmeye çalışırken degen insanlar hayatlarını kaybetmişlerdir. Ülkemizde ve dünyada üçüncü ray kullanan hatlar insanların erişimine kapatılmıştır. İstasyonlarda iletken raylar yolcuların biniş seviyesinden bir ve ya bir buçuk metre aşağıda bırakılmıştır. Üçüncü rayda taşınan gerilim daha düşüktür. Bunun sebebi yüksek gerilimde elektriğin taşıyıcı raylara ve toprağa atlama olasılığıdır [8].

Diğer taraftan iletim hattından geçen akım, belirli bir mesafeden sonra zayıflamaya başlar ve gerilim düşümü azalır. Bunu engellemek için hat boyunca belirli aralıklarla (14-18 km) arası besleme trafo merkezleri kurulmaktadır. Hızlı tren taşımacılığı daha yüksek güç gerektirir ve üçüncü ray kullanımı bu gücü karşılamada yetersiz kalır. Bu nedenle üçüncü ray kullanan toplu taşıma sistemlerinde maksimum hız 150 km/sa seviyelerinde kalır. Üçüncü raylar taşıyıcı raylara göre daha yüksektedir. Bunun sebebi üçüncü rayın izolatör adı verilen yalıtkanların üzerine kurulmuş olmasıdır. Üçüncü rayın başlangıç noktalarında eğim vardır. Bu eğim rampa olarak adlandırılmıştır. Rampalar kolektör pabucunun iletken rayın bir kesiminden diğerine yumuşak bir şekilde geçmesine yarar. Her bir iletken ray kesimi bir rampa ile başlar bir rampa ile son bulur [8]. Şekil 4.3'te rampa ve taşıyıcı raylar gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Rampa ve taşıyıcı raylar [8].

Üçüncü rayları taşımakta kullanılan izolatörlerin başlıca görevi elektrik enerjisinin toprağa ve taşıyıcı raylara atlamasını önlemektir. Şekil 4.4'te Londra metrosunda bu amaçla kullanılan örnek bir sistemin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Londra metrosunda kullanılan üçüncü ray ve izolatör kesitleri [8].

Üçüncü ray baştan sona kadar kapak adı verilen yalıtkanlarla kapatılır. Böylece canlıların raya temas edip hayatlarını kaybetmelerinin önlenmesi amaçlanır. Şekil 4.5'te üçüncü ray kapakları gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Üçüncü ray kapakları [8].

Genellikle iki tip kapak kullanılır. Bunlardan birincisi PVC kapaklar açık mekanlarda kullanılır. PVC kapaklar yangın geciktirici özelliğe sahiptir. İkinci tip olan GRP kapaklar ise kapalı mekanlarda kullanılır. Bu kapaklar iletken rayın yalnızca üst kısmını örter. GRP kapaklarda yangın geciktirici malzemeden yapılmıştır. Zararlı yanma gazları ve duman çıkarmaz.

5. RİJİT KATENER SİSTEMİ

Rijit katener sistemi özellikle metrolarda ve tünellerde giden raylı araçlarda araçlara enerji sağlayan bir elektrifikasyon sistemidir. Alüminyum bara, barayı sabit tutan ve destekleyen konsol ve droptube sistemleri, alüminyum profil içinden geçirilerek pantograf birimiyle teması sağlayan bakır iletkenli kontak seyir teli, sistemi enerji aralıklarına ayıran bölüm izolatörleri, genleşmelere karşı orta nokta donanımı ve alt donanımlardan oluşur.

5.1 Bazı Tanımlar

Etap: Raylı sistemlerde, katener hattını istenildiği kadar uzatmak mümkün değildir. İşletme ve arıza bakım problemleri sebebiyle hat tasarlaması bölümler oluşturacak şekilde yapılır. Katener bölümlerine etap denilmektedir. Etaplar donanım bölümleriyle hat boyunca devam eder.

Donanım ve donanım bölgesi: Bir etabın bitip, diğerinin başladığı çakışma noktalarında elektrik beslemesinin sürekliliğinin devam ettirilmesi amacıyla yapılan tertibata donanım, bu tertibatın bulunduğu bölgelere de donanım bölgesi denir.

Bölme ve bölünmüş bölge: Koruma ve işletme kolaylığı sağlamak için bir trafo merkezinin beslediği etap ile diğer trafo merkezinin beslediği etap, elektriksel olarak birbirinden yalıtılır. Bu ayırma işlemine bölme, ayırma işlemi için kullanılan donanıma bölücü, bu donanımların bulunduğu bölgeye de bölünmüş bölge adı verilir.

Orta nokta: Katenere ait bir etap bölgesinin orta noktasına verilen addır.

İletken ray profili: İletken ray diğer adıyla rijit katener bir bakır kontak telinin alüminyum rayın içine yerleştirilmesiyle oluşturulur. İletken ray, izolatörlü kaydırma desteklerinden asılır. Sıcaklık değişimleriyle meydana gelecek genleşmelere karşı iletken ray paralel olarak bölünmüştür.

Bölme izolatörü: Bu donanım temel olarak fiberglas yalıtım çubuğu ve pantograf için dört yan dağıtıcıdan oluşur. Tren topraklı bölgeye girdiğinde oluşabilecek kısa devre arklarını daha iyi söndürebilmek için dağıtıcıların ucunda ark boynuzları

vardır. Bu donanım mümkün olduğunca düz bir bara kesimine konumlandırılmalıdır. Bölme izolatörü hat üzerinde gezinme sıfır cm olduğu bölgeye yerleştirilmelidir.

Gezinme (Stagger): Gezinme katener kontak seyir teli ile tren pantografı arayüzünde oluşan karbon şeridin, tek noktadan aşınarak kırılmasını önlemek için rijit katener hattı boyunca zig-zaklı hareket etmesidir. Bölme izolatörlerinin kurulacağı bölgelerde bu değer tam olarak sıfır noktasına getirilmelidir.

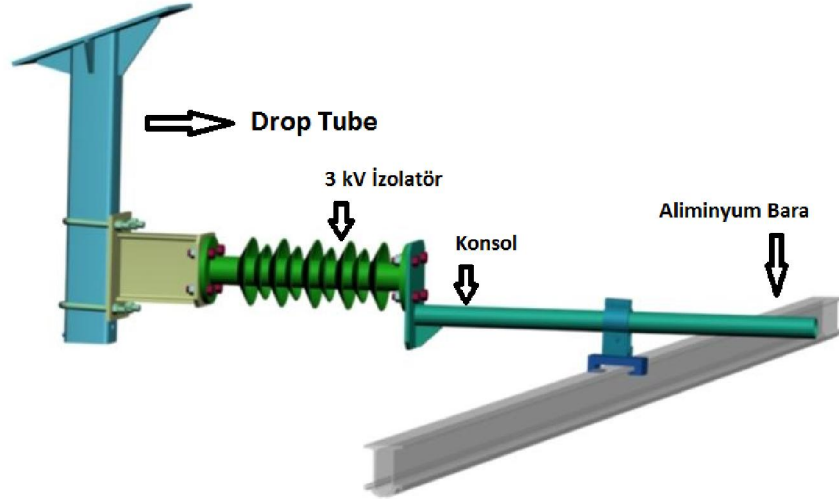
Katener ayırıcısı: Katener sisteminde enerji manevralarının gerçekleştirilmesini sağlayan, motorlu olanları kumanda merkezinden Scada üzerinden görüntülenip kontrol edilebilen, manuel olanları ise kumanda kolları sayesinde eğitimli personel tarafından enerji kesip verme ve manevra yapmayı sağlayan donanıma denir. Ayırıcılar tek ve çift kutuplu ve manuel veya motorlu olarak ayrılır.

5.2 Rijit Katener Sisteminin Klasik Telli Sisteme Göre Üstünlükleri

- ✓ Sistem yüksekliği klasik sisteme göre daha düşük seviyede tutulabilir. Böylece tünel içinde kısıtlı olan yerden tasarruf edilir.
- ✓ İstenildiğinde geçiş elemanları aracılığıyla klasik 3 ya da 4 telli sistemlere kolaylıkla geçilebilir.
- ✓ Kontak teline çekiş ve baskı kuvvetleri etki etmez. Böylece kontak teli kopması gibi sorunların oluşması çok zordur.
- ✓ Kontak teli zarar görerek yansa ve kopsa bile alüminyum bara sistemi sistem emniyete alınana dek beslemeye devam edebilir.
- ✓ Rijit katener sisteminde kontak teline etki eden gergi kuvveti bulunmadığından gergi düzeneğine gerek yoktur. Bu da donanım tasarrufu sağlar.
- ✓ Rijit katener sistemi yüksek akım taşımaya elverişlidir.
- ✓ Bu iş için üretilmiş olan kontak seyir telinin çekilmesi, çekim aparatı sayesinde daha kolay ve hızlıdır.
- ✓ Rijit katener sistemi, klasik sistemlere göre daha az bakım gerektirir. Gerektiğinde kontak seyir teli kolaylıkla değiştirilebilir [9].

5.3 Kullanımda Olan Örnek Bir Rijit Katener Sistemi Hattına ilişkin Bilgiler

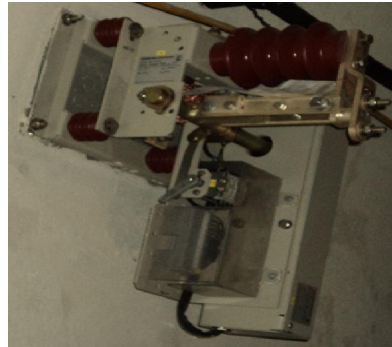
İBB'ye bağlı İstanbul Ulaşım A.Ş'nin işlettiği Kadıköy-Kartal metro hattında rijit katener sistemi kullanılmaktadır. Bu hatta 46,5 km'lik rijit bara bulunmaktadır. Hat boyunca 16 adet metro istasyonu bulunmaktadır. Bu istasyonlardan 13 tanesinden rijit baraya enerji sağlanmaktadır. İletken ray profili 3 kV izoleli, tünele tutturma donanımlarıyla bağlanmış süspansiyonlarla sabitlenmiştir. Hat genelinde gezinme +/- 20 cm olarak sabitlenmiştir. Kontak telinin uzunluğu sabittir ve yüksekliği 4,15 metredir. Şekil 5.1'de bir rijit katener sisteminin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : İzolatörler ve askı çubuklarıyla birlikte rijit katener sistemi [9].

5.3.1 Topraklama anahtarı (Şönt ayırıcılar)

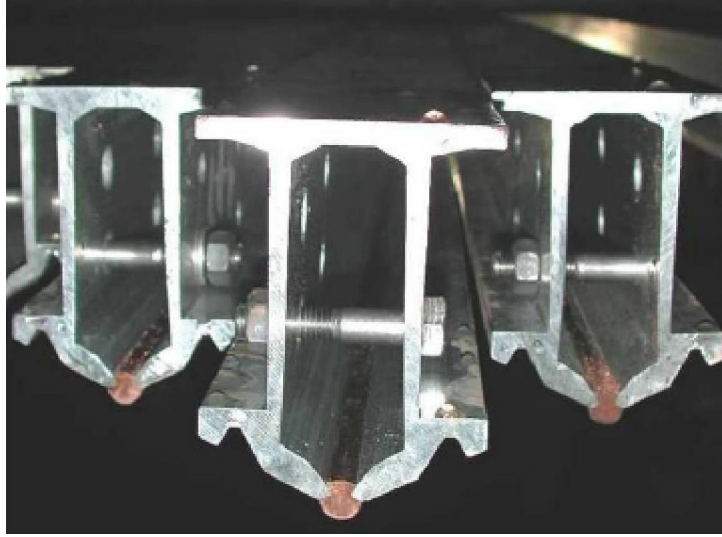
Katener besleme noktalarında bulunan motorlu şönt ayırıcılar sistem devre dışı iken ya da bakım amaçlı çalışma gerektiğinde katener ile rayı kısa devre ederek güvenli çalışmaya olanak sağlarlar. 110 V DC gerilimle kontrol edilirler. Makas bölgelerinde katenerleri ayırmak için de ayırıcılar bulunur. Şekil 5.2'de topraklama anahtarı gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : Topraklama Anahtarı [10].

5.3.2 Havai iletken ray profili

Profil alüminyum alaşımdan yapılmıştır ve 11,9 m'lik bölümler halinde sıkımlı kalıplama ile üretilmektedir. Kontak teli bakırdan yapılmıştır; belirli bir esnekliğe ve alt uçlarda, kısaç şekle sahip profilin yan taraflarıyla iletken raya kenetlenir. İletken profilin görünüşü Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



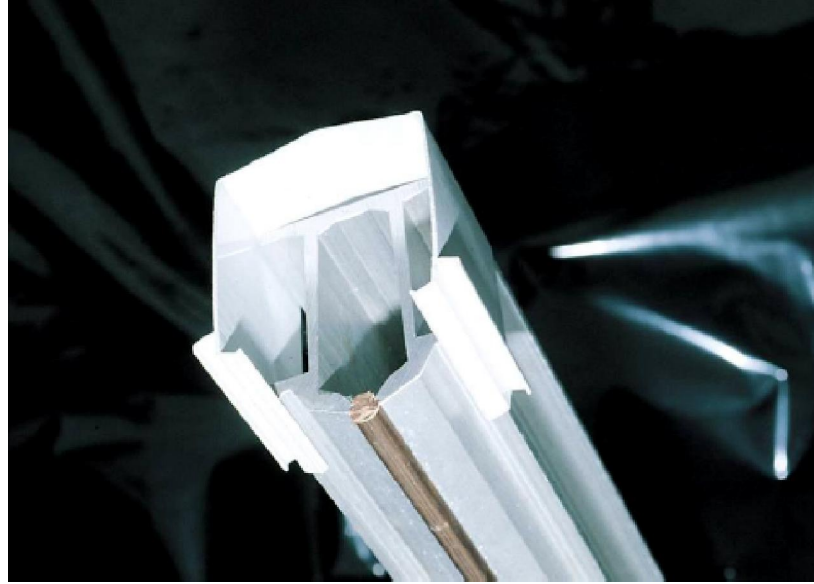
Şekil 5.3 : İletken rayın görünüşü [10].

5.3.3 Bakır/ Alüminyum korozyonu ve korunma yolları

Korozyonu önlemek için alüminyum ve bakır arasındaki iletken bağlantılar ortamda elektrolit madde olmadan yapılmalıdır. Çözülmemiş gazları içeren yoğunlaşmış su birikmesini önlemek için atık su boruları kullanılmalıdır.

Kontak teli, kurulum sırasında gres yağı pompasına bağlı manşon aracılığıyla yağlanır. Yağlama koruyucu bir etkiye sahiptir. Ancak yüksek dozda çinko içerdiğinden alüminyum ile bakır arasında akım akmasına neden olur [10].

Tünel ağızlarında ve nemli bölgelerde Şekil 5.4'te gösterilen biçimde koruyucu plastik örtü ile alüminyum profil korunmalıdır. Tünellerden köprülerden sürekli akan su damlamasına ve alüminyum profil üzerinde devam eden inşaat işlerine engel olunmalıdır. Bunlar alüminyum profile zarar vermektedirler.



Şekil 5.4 : Plastik koruyucu giydirilmiş alüminyum profil [10].

5.3.4 Ara kilit bağlantısı (Interlock bağlantı)

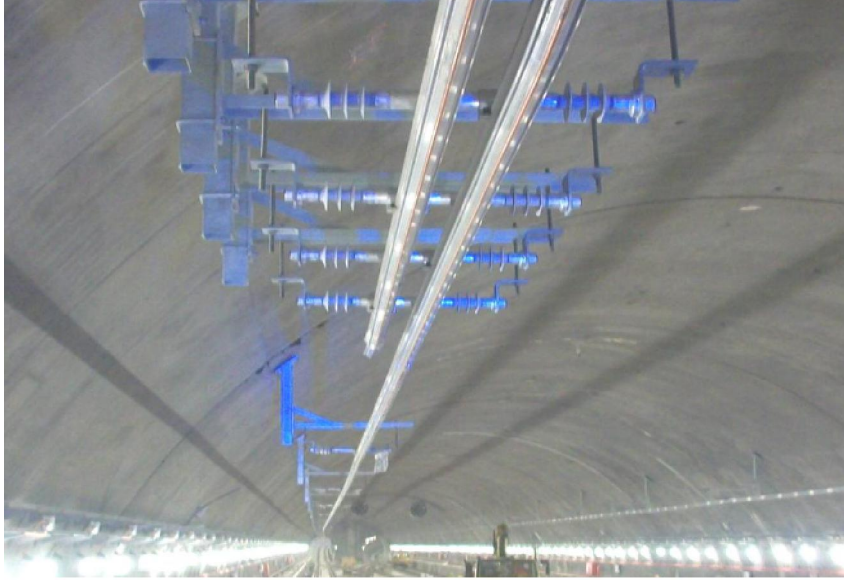
İletken ray profili için kullanılacak bağlantı çiftleri aşağıdaki resimde gösterilmektedir. Ara kilit bağlantılarının alaşımı, iletken ray profiliyle büyük oranda benzerdir ve tüm fiziksel özellikleri aynıdır. Uygulamada kontak yüzeyleri memnun etmeyen sonuçlar verebilir. Bu sebeple bağlantılar, iletken ray profilin yan tarafına karşı dayanan dört çubukla sağlanır. Şekil 5.5’te ara kilit bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Ara kilitte kullanılan bağlantı çifti [10].

5.3.5 Isı genleşmesi için paralel bağlantı

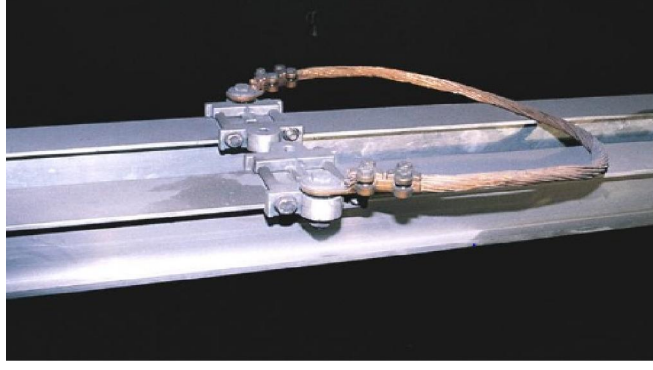
Düzgün bir pantograf geçişi için iletken ray profili destekleri, bindirme kısmında kesin bir yükseklik düzenine izin veren 1 m'lik mesafelerde yerleştirilirler. Elektrik devamlılığını sağlamak için paralel iletken ray profilleri, ilgili profil kısımlarının beklenen ısı hareketlerini telafi etmek için bakır kablolarla bağlanmaktadır. Şekil 5.6'da bu bağlantı gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Isı genleşmesi için paralel bağlantı [10].

5.3.6 Elektrik bağlantısı

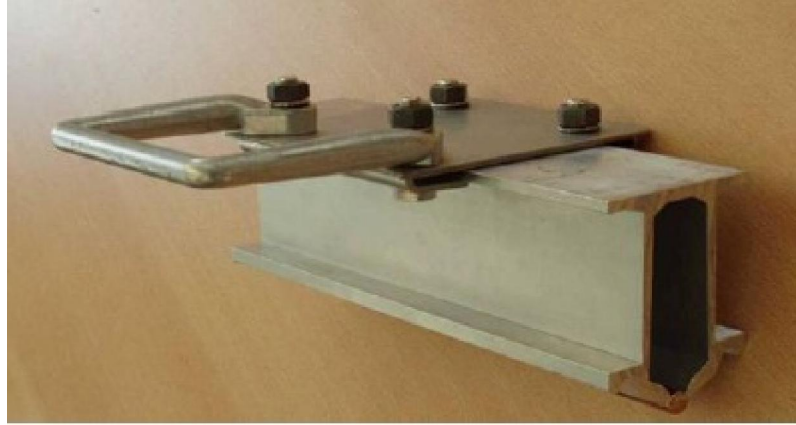
İletken profil ray kısımlarına ve arasına elektrik bağlantıları, (taşıyıcı kablodan iletken ray profili üzerine bağlantı, ayırıcılardan besleme, makaslarda paralel yönlendirilmiş ara bağlantısı gibi) besleme aparatı kullanılarak yapılmaktadır. Uç kıskacı özellikle iletken profilin üst kısmında sabitlenecek şekilde düzenlenir. Her birinin maksimum kesit alanı 150 mm^2 olan iki esnek bakır kablo birbirine bağlanabilir. İletken ray fider kıskacı alüminyum alaşımdan yapılmaktadır. Bu sebeple bakır kablo uçlar arasındaki bağlantı, kıskaç ile tedarik edilen iki metalik rondelanın üst üste binmesinden etkilenebilmektedir [10]. Uç kıskacı Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Uç kısılcı [10].

5.3.7 Topraklama

İletken ray profili üzerinde gerekli bakım çalışmalarının yapılması; emniyeti sağlamak ve yapıyı topraklamak için gereken topraklama seti vardır. Besleme kısımlarına ayırma anlayışına göre yardımcı fan ve boşaltma noktaları olarak, özel yerler üzerinde ya da bazı kısımlarda daha fazla topraklama setine gerek duyulur. Şekil 5.8’de topraklama seti gösterilmiştir.

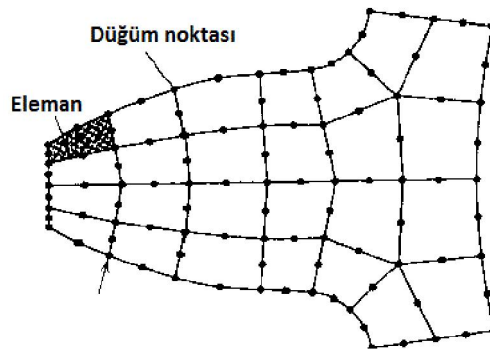


Şekil 5.8 : Topraklama seti [10].

6. RİJİT KATENER SİSTEMİNİN FEMM PROGRAMI YARDIMIYLA MODELLENMESİ

6.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

Femm programını tanıtmadan önce sonlu elemanlar yöntemini kısaca inceleyelim. Bu yöntem çeşitli mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan bir sayısal yöntemdir. Problem çözüm için alt bölgelere ayrıştırılır ve bu bölgelerin her biri için aranan fonksiyonun ifadesi polinom belirtecek şekilde seçilir. Belirli işlemler sonucunda her alt bölgedeki kabul edilen çözüm polinomunun katsayıları bulunmaya çalışılır. Bu yöntem geometrisi karışık problemlerin çözümünde fayda sağlar. SEY’le çözüm için problemin fiziksel modeli kurulmalıdır. Çözüm bölgesi için hesaplar yapılırken daha hızlı ve hassas incelemeler yapan bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Çözüm bölgesi sonlu elemanlar ağına bölünür. Her sonlu elemanda aranan fonksiyonun ifadesi polinom kabul edilir. Böylece sonlu elemanlar için verilen temel denklemler cebirsel denkleme dönüşür. Her sonlu eleman için ayrı ayrı bulunan denklemler uygun şekilde birleştirilerek bütün sisteme ait cebirsel denklemler elde edilir. Bu denklemlere sınır koşulları değerleri dahil edilerek indirgenmiş denklemler bulunur. İndirgenmiş denklem sisteminin çözümüyle her sonlu eleman bölgesindeki düğümlerin değerleri bulunur. Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık sınır koşullarına sahip sistemlere, düzgün olmayan geometriye sahip sistemlere, lineer ve lineer olmayan problemlere uygulanabilir [11]. Şekil 6.1’de örnek bir problemin sonlu elemanlara bölünmesi gösterilmiştir.



Şekil 6.1 : Sonlu elemanlara bölünmüş örnek bir problem [11].

- ✓ Yapı düğüm noktaları içeren elemanlara ayrılır.
- ✓ Her eleman için fiziksel büyüklükler tanımlanır.
- ✓ Elemanlar düğüm noktalarından bağlanarak bütün yapı için eşdeğer denklem sistemi oluşturulur.
- ✓ Denklemler düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerler için çözülür.
- ✓ Seçilen elemanların değerleri böylece hesaplanır.

6.2 Femm (Finite Element Method Magnetics) Programı

Bu program sonlu elemanlar yöntemini kullanarak statik elektrik ve manyetik alan, akım akışı ve ısı analizler yapmayı mümkün kılan, basit kullanışlı ve açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Elektromanyetikte sürekli, süreksiz, lineer ve lineer olmayan problemlerin yapısal analizinde kullanılır. Geometrik modelleme yapma uyumluluğuyla başka bir bilgisayar kodu yazmaya gerek kalmadan analiz yapabilir. Manyetik problemler açısından yer değiştirme akımlarının ihmal edildiği manyetostatik ya da düşük frekanslı problemlerde kullanılabilir. Programın elektrostatik çözücüsü manyetik alanı ihmal eder. Program iki boyutlu düzlemsel ve üç boyutlu asimetric lineer ve lineer olmayan harmonik manyetik ve manyetostatik ve elektrostatik problemleri modelleyebilir. Elektromanyetik alan, elektrik alan şiddeti V/m biriminden $\mathbf{E}$, manyetik akı yoğunluğu gauss ya da tesla biriminden $\mathbf{B}$, akım yoğunluğuysa A/m^2 biriminden $\mathbf{J}$ aracılığıyla açıklanır. Maxwell denklemlerinin kullanarak aşağıdaki denklemleri yazabiliriz [12].

$$\nabla \cdot \mathbf{E} - \frac{\rho}{\epsilon} = 0, \quad (6.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (6.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{d\mathbf{B}}{dt} = 0, \quad (6.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \mu(\mathbf{J} + \epsilon \frac{d\mathbf{E}}{dt}) = 0 \quad (6.4)$$

ρ yük yoğunluğu C/m^3 , ϵ dielektrik sabiti Farad/m cinsinden ve μ manyetik geçirgenlik H/m biriminden sırasıyla ortamın elektriksel ve manyetik geçirgenliğidir. $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{J}$ arasında ohm yasasına göre (6.5) ilişkisi vardır.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (6.5)$$

Ortamın iletkenliği σ 'dir. (6.3) ve (6.4) zamanla değişmeyen durumlar için basitleştirilirse (6.6) ve (6.7)'deki bağıntılar elde edilir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (6.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \mu \mathbf{J} = 0 \quad (6.7)$$

Femm, bir manyetostatik problemde alan sonucunu bulmak için denklem (6.2), (6.7)'yi manyetik vektör potansiyeli aracılığıyla doğrular. Manyetik akı yoğunluğu weber biriminden $\mathbf{B}$, vektör potansiyeli $\mathbf{A}$ aracılığıyla yazılırsa

$$\mathbf{B}_{tan} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6.8)$$

elde edilir ve denklem (6.7), aşağıdaki bağıntıya dönüşür.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (6.9)$$

Elektrostatik bir problemde ise Femm elektriksel scalar potansiyeli kullanır.

$$\mathbf{E}_{tan} = -\nabla V \quad (6.10)$$

Bu durumda diferansiyel denklem çözülür.

$$\nabla^2 V + \frac{\rho}{\epsilon} = 0 \quad (6.11)$$

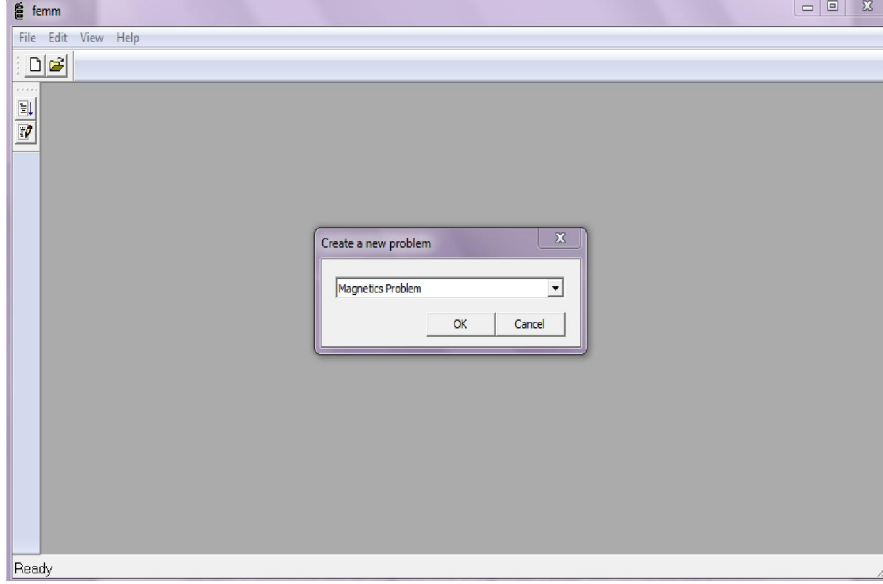
Düşük frekanslı, zaman harmonikli manyetik bir problem, alanın sabit bir w frekansı ile salınım yaptığı durumda Femm ile çözülebilir. Bu durumda çözülen denklem aşağıdaki gibidir.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_{et}(\mathbf{B})} \nabla \times \boldsymbol{\alpha} \right) + \sigma \nabla V - \hat{\mathbf{J}} + j\omega \sigma \boldsymbol{\alpha} = 0 \quad (6.12)$$

$\hat{\mathbf{J}}$, uygulanan akım kaynağının fazör dönüşümüdür. Etkin manyetik geçirgenlik $\mu_{et}(\mathbf{B})$ 'dir. $\mathbf{A}$ 'nın fazör dönüşümünün karmaşık genliği $\boldsymbol{\alpha}$ 'dır. Herhangi bir elektromanyetik problemdeki garanti edilen tek çözüm, sınır koşulları doğru belirlendiğinde ortaya çıkar. Femm tarafından kullanılan sınır koşulları Dirichlet, Neumann, Robin'dir. Birincisi sınırdaki potansiyel açıkça belirtilir. Bu, manyetik problemde sınırın öbür tarafına geçildiğinde manyetik akıyı korumak için; elektrostatik problemde ise problem bölgesindeki yüzeyin gerilimini sabitlemek için kullanılır. İkincisi yüksek geçirgenlikte bir metalin arayüzünün tutarlılığını ve sınır boyunca potansiyelin normalinin türevini açıkça belirler. Sonuncusu ise önceki ikisinin lineer bir birleşimidir ve sınırsız bir bölgenin davranışını taklit eden sınırlı

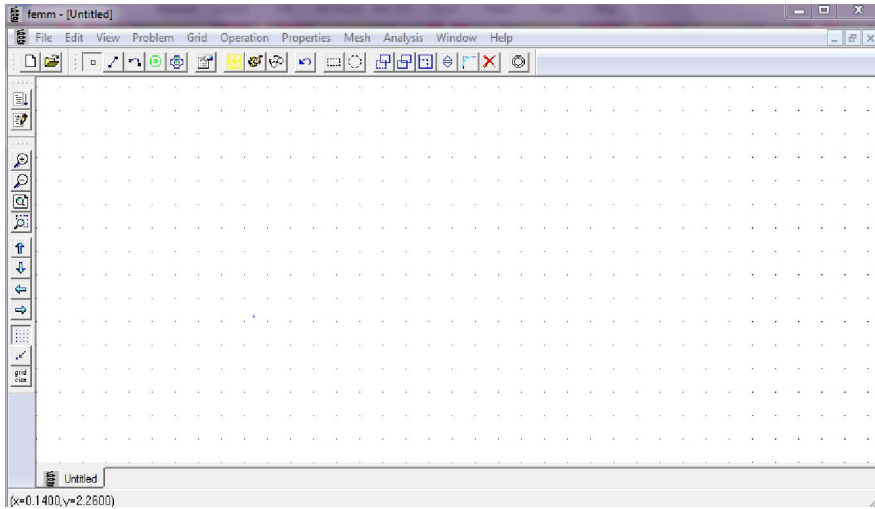
bir bölgeye, izin veren sınır koşullarını belirler. Yüzey derinliğinin çok küçük olduğu frekanslarda, eddy akımlarına maruz kalan bir malzemenin arayüzeyini belirtir [12].

Femm programı çalıştırıldığında file kısmının altındaki pencere tıklandığında öncelikle incelenmek istenen problemin türünü seçmemiz gereken pencere çıkar. Şekil 6.2’de bu pencere görülmektedir.



Şekil 6.2 : Femm programı açılış arayüzü.

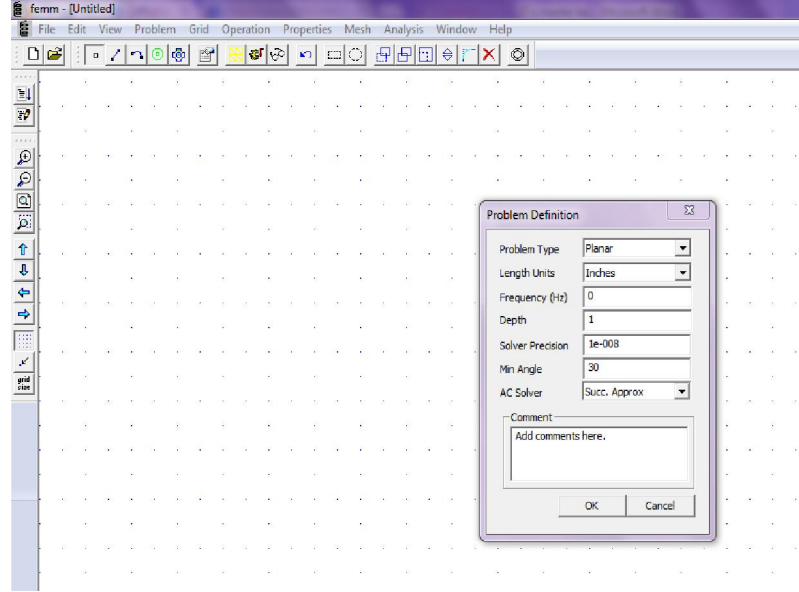
Buradan sol üst baştaki boş sayfa simgesine tıklandığında noktalara bölünmüş halde Şekil 6.3’de gösterilen koordinat sistemi ortaya çıkar.



Şekil 6.3 : Femm programında açılan yeni sayfa.

Üstteki menülerden problem kısmına tıklandığında problem tipi, düzlemsel veya eksenel simetrik olarak seçilebilir. Problem tanımlanırken kullanılacak uzunluk

birimi, problemin derinliği, frekansı, çözüm hassasiyeti buradan girilebilir. Şekil 6.4’de problem tanımlama kısmı gösterilmiştir.

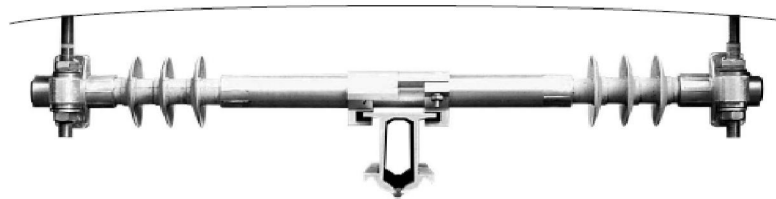


Şekil 6.4 : Problem tanımlama kısmı.

Femm programı yardımıyla malzeme tanımlayabilir ya da programın veri kütüphanesinde önceden oluşturulmuş malzemelerden yararlanarak model kurulabilir. Malzemeler tanımlandıktan sonra bölgeler ya da sınırlar belirlenerek bölge ya da sınırlara ilişkin analiz için gerek duyulan bilgiler (gerilim, akım yoğunluğu, bağıl manyetik geçirgenlik, yük yoğunluğu....) girilmelidir. Problemin çözümü için sonlu elemanlar ağı oluşturulduktan sonra problemin çözümü yapılır ve sonuçlar görüntülenir.

6.3 Modellenecek Rijit Katener Sisteminin Özellikleri ve Boyutları

Modelde kullanılacak yapı için İstanbul Ulaşım A.Ş. Kadıköy-Kartal hattında kullanılan katener iletken rayın özellikleri ve boyutları kullanılmıştır. Sistem, alüminyum alaşımdan yapılmış bir profil ve onun altına tutturulmuş bakır iletken ile Alüminyum profilin bağlı olduğu izolatörler ve destek çubuklarından oluşmaktadır. Rijit profilin görünüşü Şekil 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.5 : Rijit katener sistemi [9].

6.3.1 Alüminyum profilin özellikleri

Alüminyum alaşım çeşidi EN AW-6101 malzemesidir. Bu malzemenin fiziksel özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : İletken rayın mekanik özellikleri [10].

Kesit alanı	2214 mm ²
Dış çevre uzunluğu	694 mm
Yoğunluk	2,7 kg/dm ³
Ağırlık	59 N/m
Elastisite modülü	69000 N/mm ²
Boyca genleşme katsayısı	24× 10 ⁻⁶ 1/°C

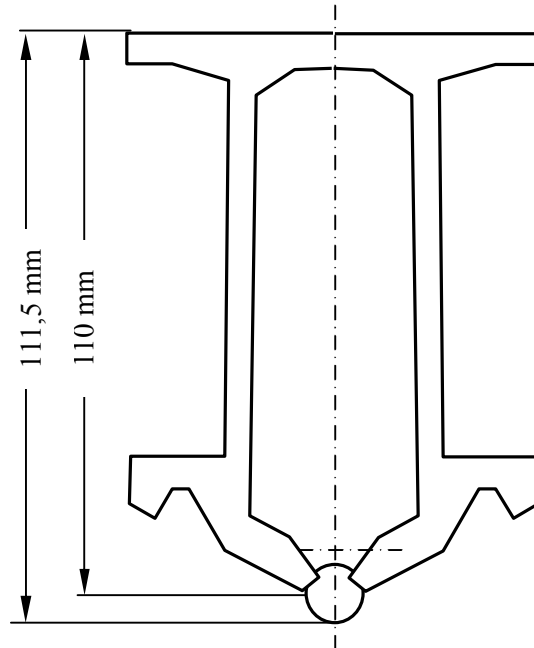
EN AW-6101’in kimyasal bileşimi ise % olarak Çizelge 6.2’deki gibidir.

Çizelge 6.2 : EN AW-6101 alaşımının kimyasal bileşimi [13].

Fe mak.	Si mak.	Cu mak.	Mn mak.	Mg	Cr mak.	Zn mak.	B mak.	Diğer (her biri) mak.	Diğer (Toplam) mak.	Al
0,5	0,3 - 0,7	0,1	0,03	0,35-0,38	0,03	0,1	0,06	0,03	0,1	Geri Kalan

6.3.2 Alüminyum profilin boyutları

Şekil 6.6’da iletken profilin boyutları gösterilmiştir.



Şekil 6.6 : İletken profilin boyutları [10].

6.3.3 Kontak telinin özellikleri

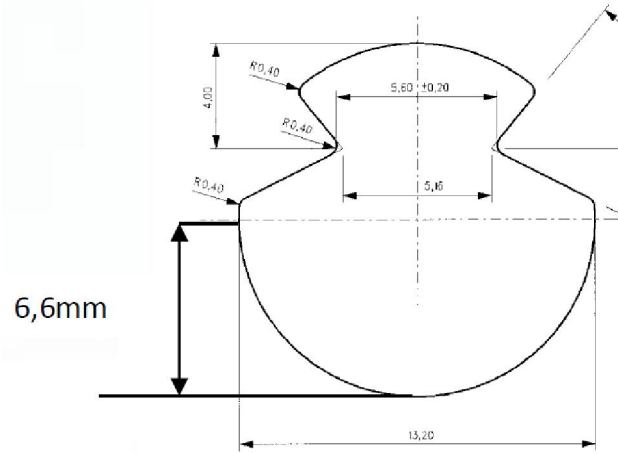
Kontak teli sert çekilmiş bakırdan meydana gelir. Bazı fiziksel özellikleri ise Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Kontak telinin mekanik özellikleri [10].

Kesit alanı	150 mm ²
Yoğunluk	8,9 kg/dm ³
Ağırlık	13,3 N/m
Elastisite Modülü	127'000 N/mm ²
Boyca genleşme katsayısı	17 × 10 ⁻⁶ 1/°C

6.3.4 Kontak telinin boyutları

Kontak telinin kesiti ve boyutları Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : Kontak telinin boyutları [10].

6.3.5 Ara kilit (Interlock) bağlantısının özellikleri

Alaşım çeşidi EN AW-6101 olan ara kilit bağlantısının mekanik özellikleri Çizelge 6.4'de gösterilmiştir.

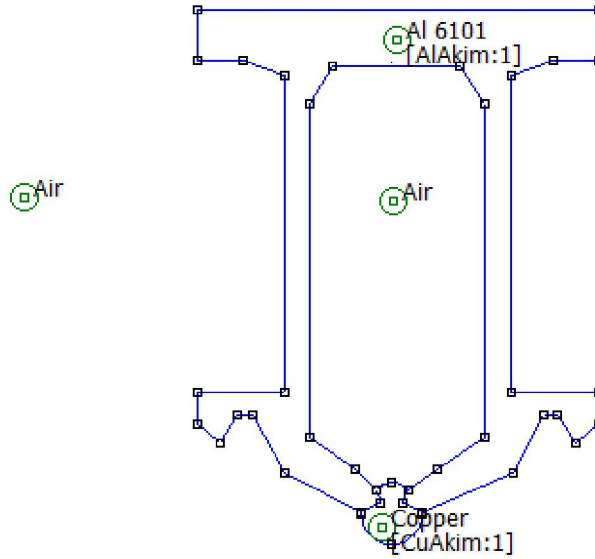
Çizelge 6.4 : Ara kilit bağlantısının mekanik özellikleri [10].

Kesit Alanı (mm ²)	1'170	2'340
Yoğunluk (kg/dm ³)	2,7	2,7
Ağırlık (N/m)	30,8	61,6
Elastisite modülü (N/mm ²)	69'000	69'000
Boyca Genleşme Katsayısı (1/°C)	24 × 10 ⁻⁶	24 × 10 ⁻⁶

6.4 Havai İletken Rayın Modellenmesi ve Manyetik Alan Analizi

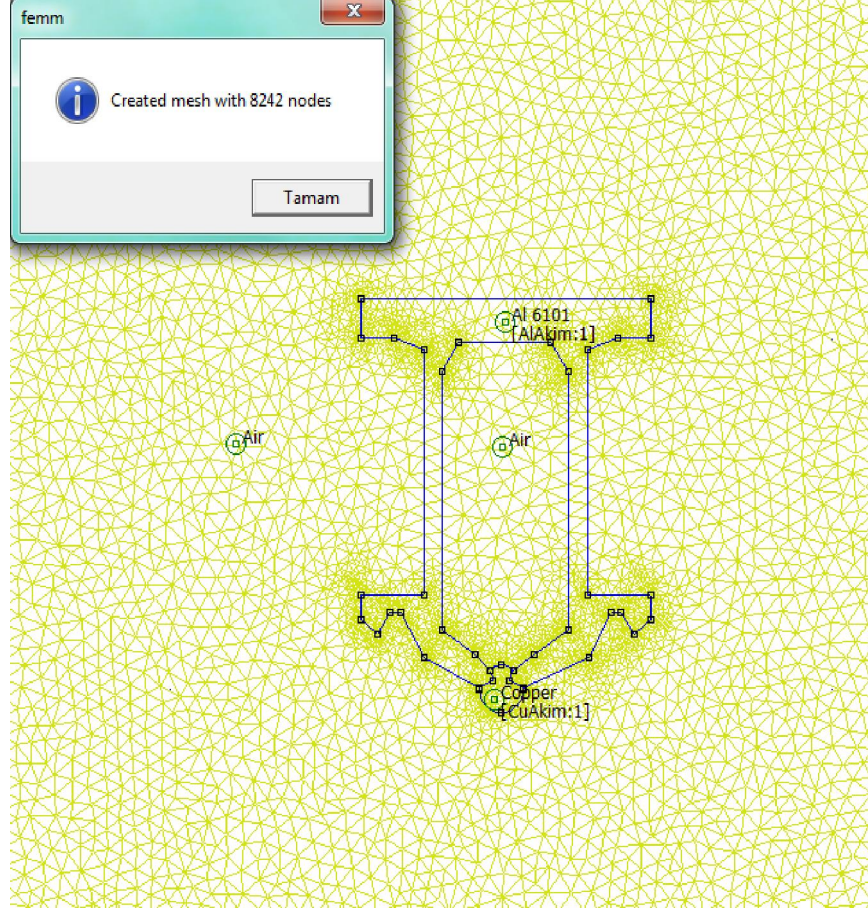
Modelde üç çeşit malzeme kullanılmıştır. Al 6101 alaşım malzemesi, bakır ve hava kullanılmıştır. Al 6101, bakır ve havanın bağıl manyetik geçirgenliği 1 olarak alınmıştır. Al 6101 alaşımın elektriksel iletkenliği %57 IACS olduğundan 33,12 Megasiemens/metre olarak; bakırın elektriksel iletkenliği %100 IACS olduğundan 58 Megasiemens/metre, bakır kablo kesit alanı 150 mm^2 , trenin kontak telinden çektiği nominal akım ise 1,2 kA olarak alınmıştır.

Bu bilgilerden hesapla bakırın akım yoğunluğu 8 Megaamper/m² olarak alınmıştır. Model mm olarak çizilmiş problem derinliği 11 m, frekansı 0 Hz olarak alınmıştır. Şekil 6.8’de Femm programında çizilen iletken rayın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.8 : İletken rayın Femm programındaki modeli.

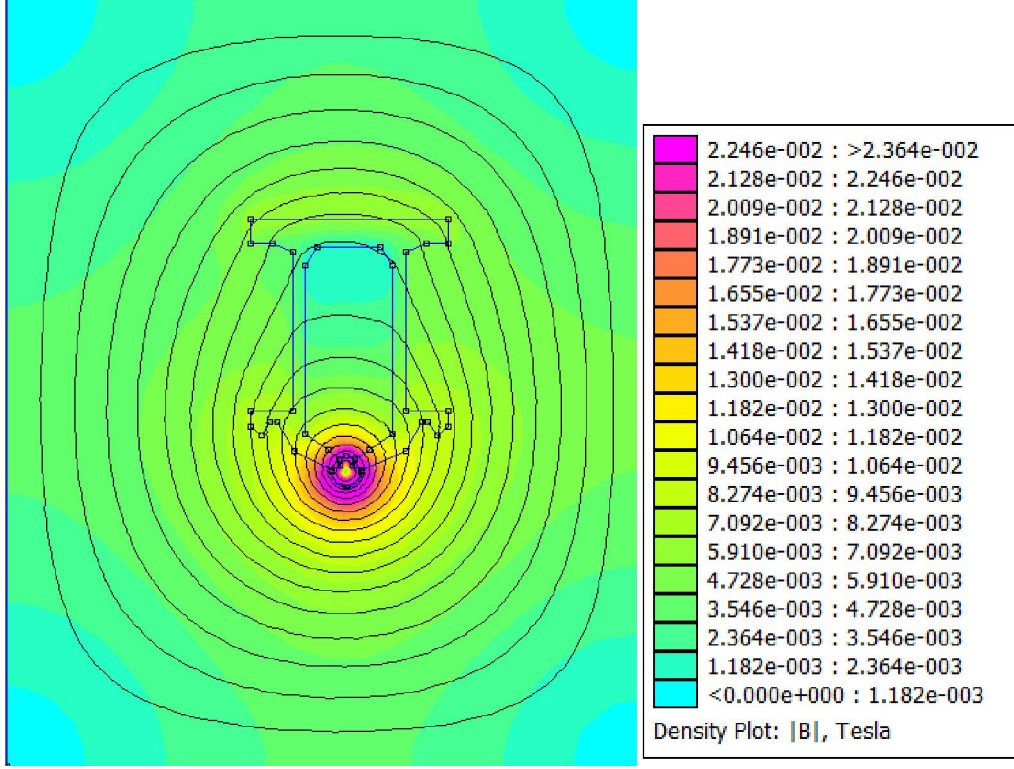
Programda sonlu elemanlar ağı oluşturulmuş problem, 8242 adet düğüm noktası bulunan 16.184 bileşeni bulunan üçgen elemana bölünmüştür. Şekil 6.9’da programın çalıştırılması sonucu problemin sonlu eleman bölgesine ayrıştırılmış hali görülmektedir.



Şekil 6.9 : Modelin sonlu eleman bölgelerine bölünmesi.

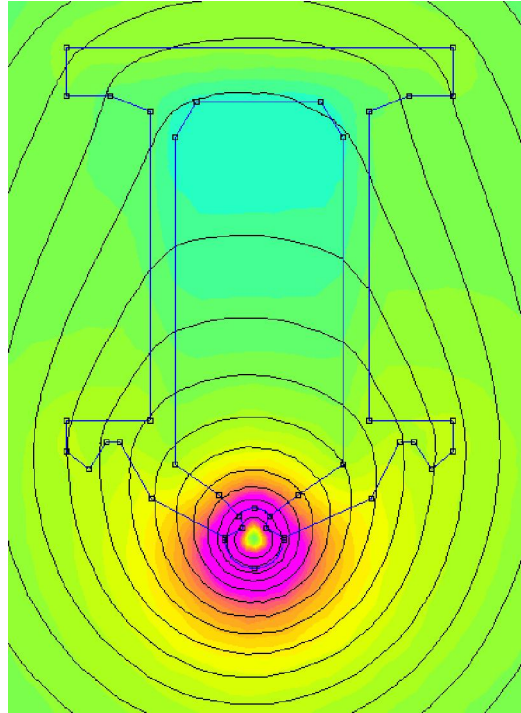
Al 6101 alaşımı ve kontak teli seri bağlı devre olarak tanımlanmıştır. Çözüm yapıldığında sistemdeki manyetik akı yoğunluğu bulunmuştur. Örnek problem için en yüksek manyetik akı yoğunluğu 0,0236 Tesla'dır. Bu değer yüksek bir değerdir ama dikkat edilirse problem için seçilen çerçeve de çok küçük boyutludur. Bu nedenle iletkene çok yakın bölgeler söz konusu olduğundan değerler yüksek çıkmıştır.

Manyetik alan şiddeti 33309,07A/m'dir. Akım yoğunluğu 10,15 MA/m²olarak bulunmuştur. Örnek problemde akım 1200 A frekans 0 Hz olarak alınmıştır. Şekil 6.10'da iletken profilin çevresindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



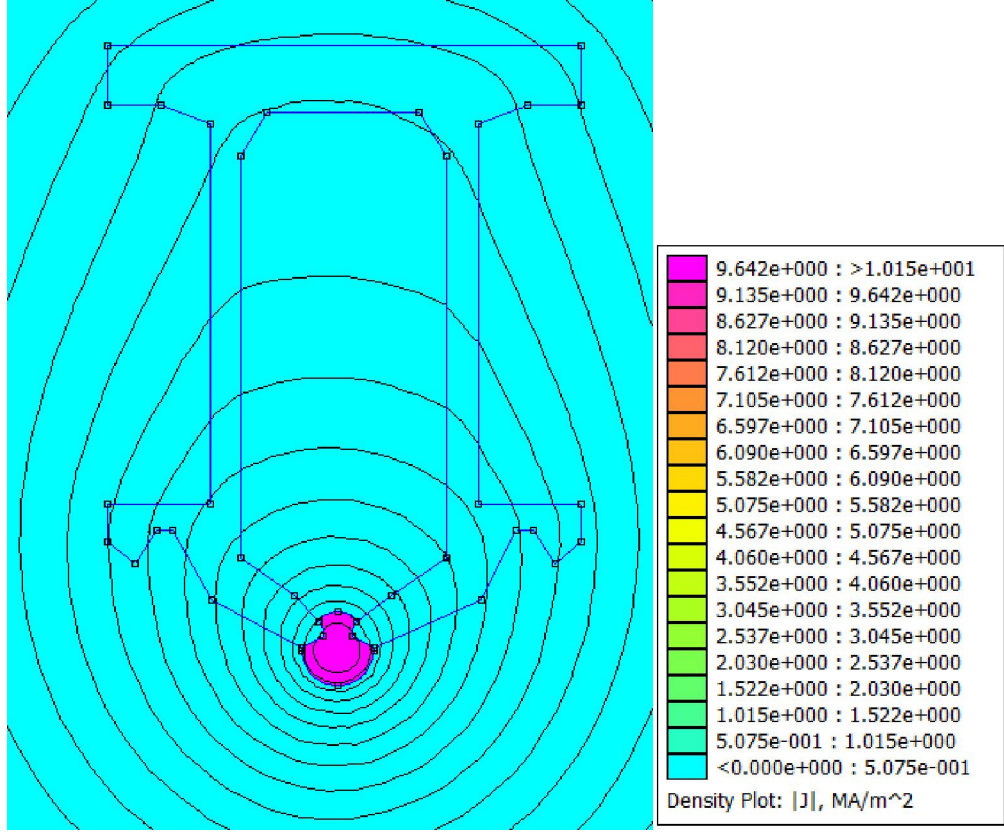
Şekil 6.10 : Manyetik akı yoğunluğu.

Akı yoğunluğu dağılımını daha net görebilmek için görüntünün yakınlaşmış hali Şekil 6.11’de gösterilmiştir.



Şekil 6.11 : Manyetik akı yoğunluğu (büyütülmüş).

Akım yoğunluğu bakımından model incelendiğinde iletken raydaki akım yoğunluğu Şekil 6.12'deki gibidir. Akım yoğunluğunun kontak telinde olduğu görülebilir.



Şekil 6.12 : Akım yoğunluğu.

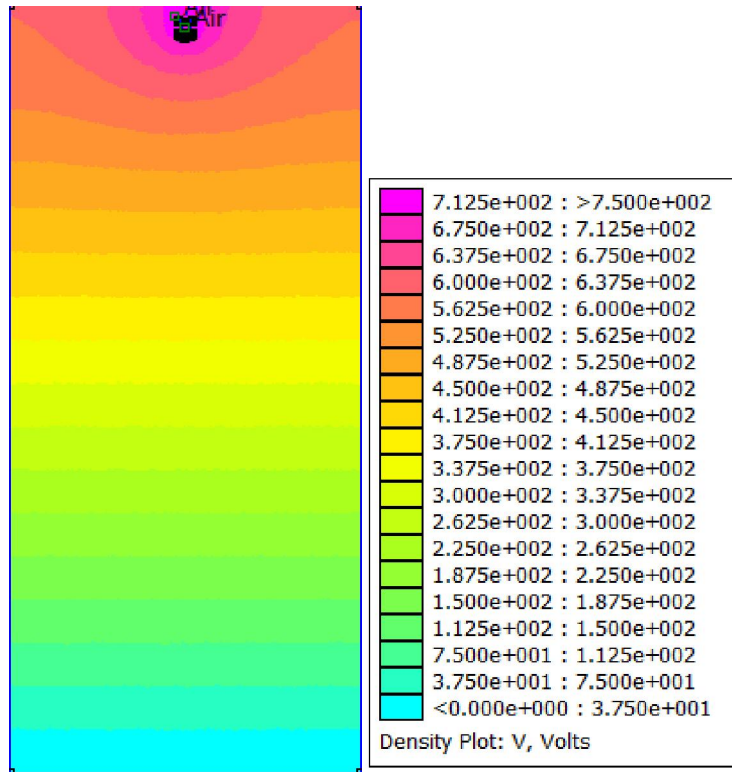
Modelimizdeki rijit katener sisteminin raylardan yüksekliği 4,5 m kadardır. Sonraki kısımda Femm programında bunu göz önünde bulundurarak yüksekliği 4,7 m, genişliği ise 3 m alarak elektrostatik analizler yapılmıştır. Burada önemli olan gerilim bilgilerinden faydalanarak sınır koşullarını doğru tanımlayabilmektir. Rijit katener sistemlerinde en çok kullanılan 750 V, 1500 V ve 3000 V DC gerilim değerleri için sırasıyla analizler yapılmıştır. Genişlik ve yükseklik belirlenirken kullanımda olan gerçek boyut belirlenmiştir. Trenin gittiği tüneldeki boşlukta sadece hava vardır. Bu alanda gerilimlerin oluşturduğu elektrik alan şiddeti, elektriksel akı yoğunluğu ve potansiyel dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır. Yer seviyesi toprak olarak tanımlanmıştır. Dönüş iletkeninin gerilimi, rijit baraya göre çok küçük değerde olduğundan buradaki analizlerde göz önünde bulundurulmamıştır.

6.5 Havai İletken Rayın Modellenmesi ve Elektrostatik Alan Analizi

Modelde üç çeşit malzeme kullanılmıştır. Al 6101 alaşım malzemesi, bakır ve hava kullanılmıştır. Al 6101, bakır ve havanın bağıl manyetik geçirgenliği 1 olarak alınmıştır. Al 6101 alaşımın gerilimi ön tanımlı olarak 750 V, 1500 V ve 3000 V DC gerilimleri için benzetimler tekrarlanmıştır. Çerçevenin alt kısmı toprak olarak seçilmiş, ray seviyesi olarak adlandırılmış ve gerilimi 0 V'dir. Model mm olarak çizilmiş problem derinliği 11 m olarak alınmıştır. İletken rayın yerden bulunduğu konumun yüksekliği 4,5 m; genişliği ise solunda ve sağında 1,5 m alınarak 3 m olarak belirlenmiştir. Problem bölgesi 5710 düğümlü küçük bölümlere ayrılmış ve analiz sonucunda aşağıdaki potansiyel dağılımı görülmüştür.

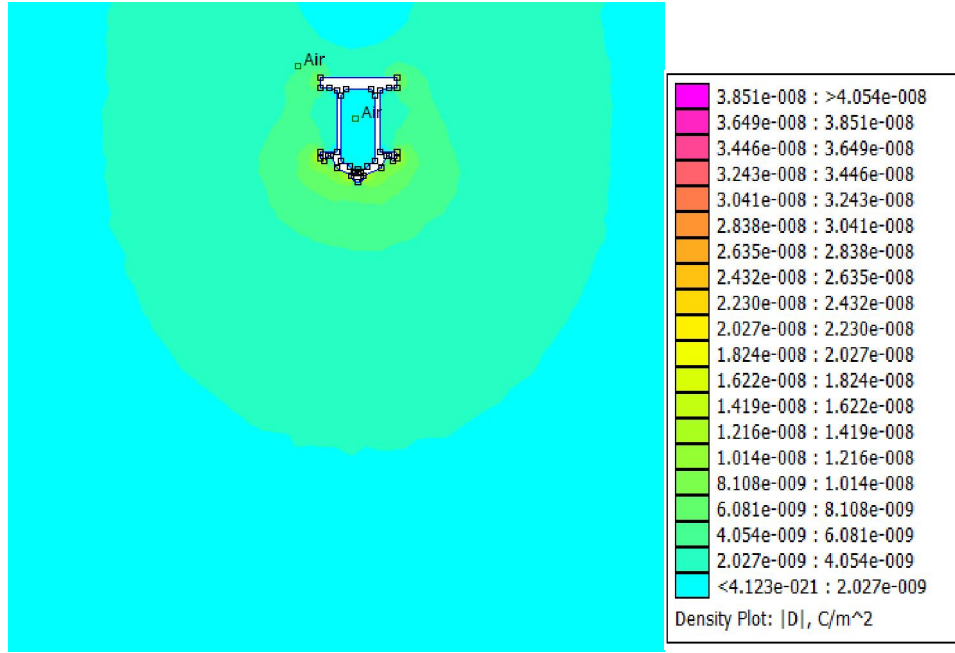
6.5.1 750 V DC Gerilim için Elektrostatik Alan Analizi

Benzetimde profilin yapıldığı Al 6101 alaşım malzemesi ve bakır kablo, çevresindeki dağılımın doğru belirlenebilmesi için ağ oluşturma işleminde problem bölgesinin dışında tutulmuştur. Geri kalan bölge ise program tarafından 26.705 düğümlü, 52.089 elemanlı sonlu eleman bölgesine ayrılmıştır. Şekil 6.13'de potansiyel dağılımı verilmiştir.

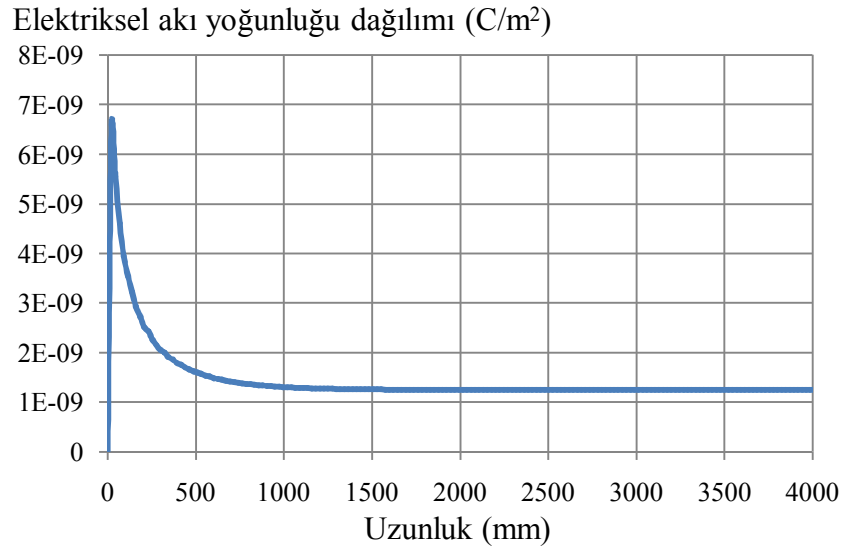


Şekil 6.13 : Potansiyel dağılımı.

Elektriksel akı yoğunluğu dağılımında; alt sınır $4,123 \times 10^{-21}$, üst sınır $4,054 \times 10^{-8}$ C/m²'dir. Şekil 6.14'te profil çevresindeki elektriksel akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir. Şekil 6.15'de kontak telinden ray seviyesine doğru elektriksel akı yoğunluğu değişimi verilmiştir.



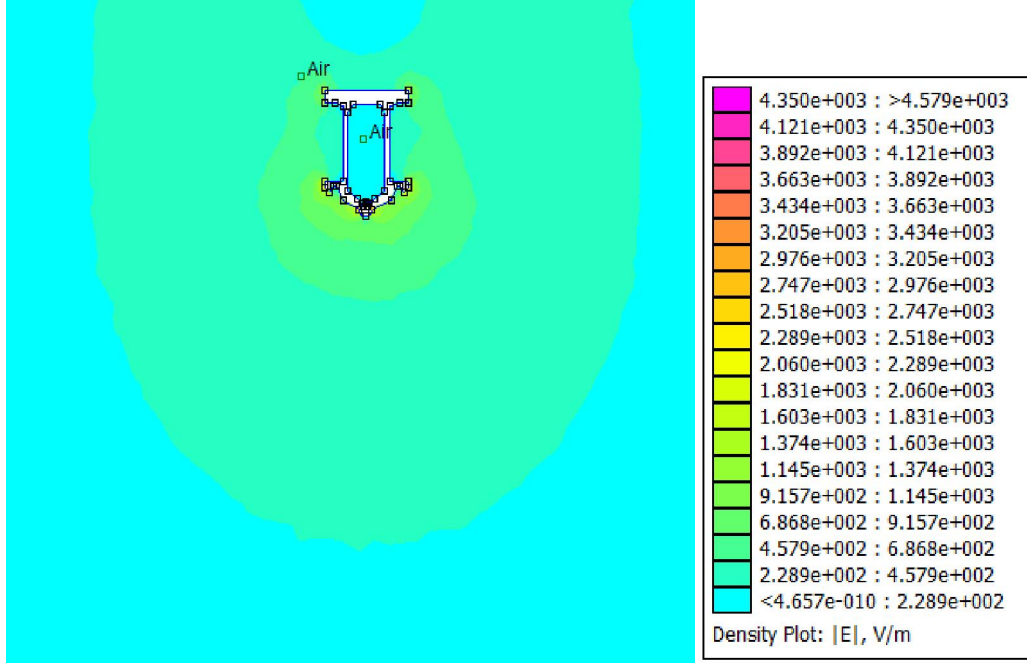
Şekil 6.14 : Elektriksel akı yoğunluğu dağılımı.



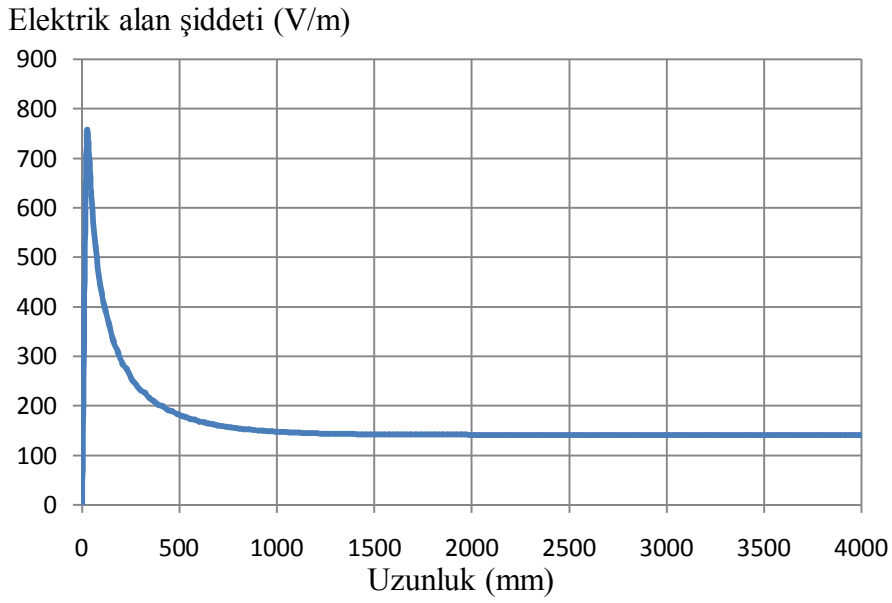
Şekil 6.15 : Elektriksel akı yoğunluğu dağılım grafiği.

Elektrik alan şiddeti dağılımında alt sınır $4,656 \times 10^{-10}$ V/m, üst sınır ise 4578,7 V/m olarak bulunmuştur. Şekil 6.16'da profil çevresindeki elektrik alan şiddeti dağılımı verilmiştir. En yüksek değerler Al profille bakır kablonun birleştiği çevrede görülmüştür.

Şekil 6.17’de kontak telinden ray seviyesine doğru elektrik alan şiddetinin değişimi verilmiştir.



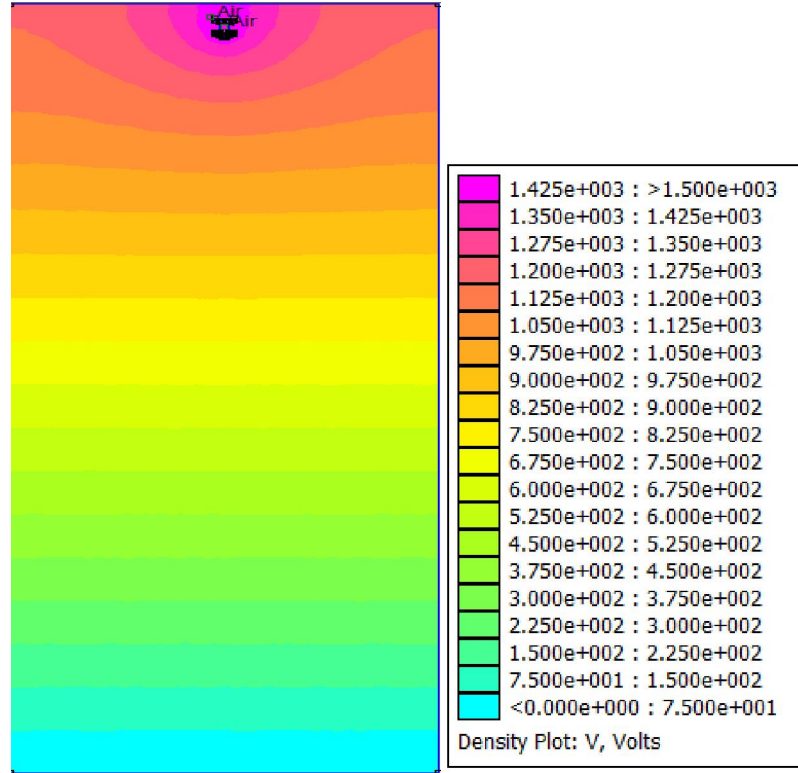
Şekil 6.16 : Elektrik alan şiddeti dağılımı.



Şekil 6.17 : Elektrik alan şiddeti dağılımı grafiği.

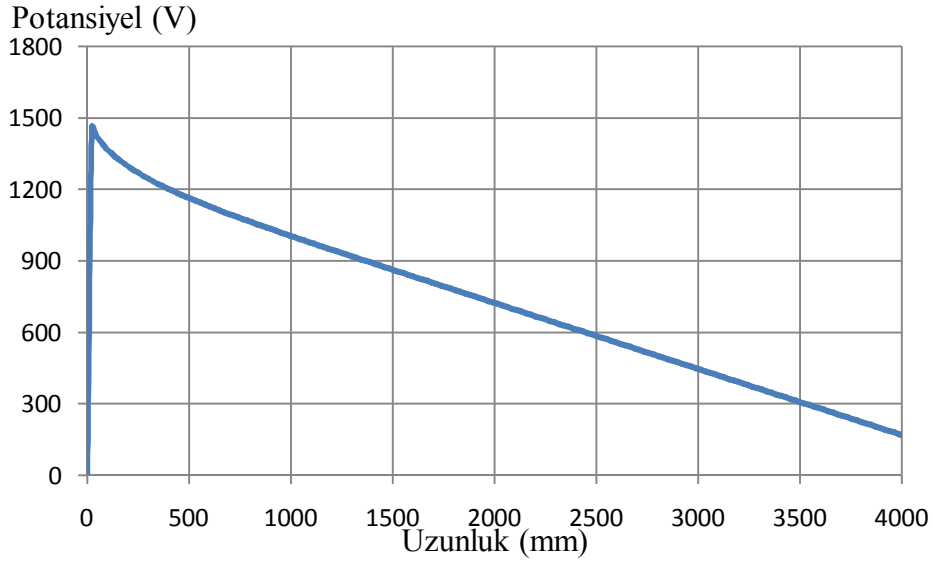
6.5.2 1500 V DC Gerilim için Elektrostatik Alan Analizi

Benzetimde profilin yapıldığı Al alaşım malzemesi ve bakır kablo, dağılımın doğru belirlenebilmesi için ağ oluşturma işleminde problem bölgesinin dışında tutulmuştur. Geri kalan bölge ise program tarafından 5710 düğümlü, 10.567 elemanlı sonlu eleman bölgesine ayrılmıştır. Şekil 6.18’de potansiyel dağılımı gösterilmiştir.



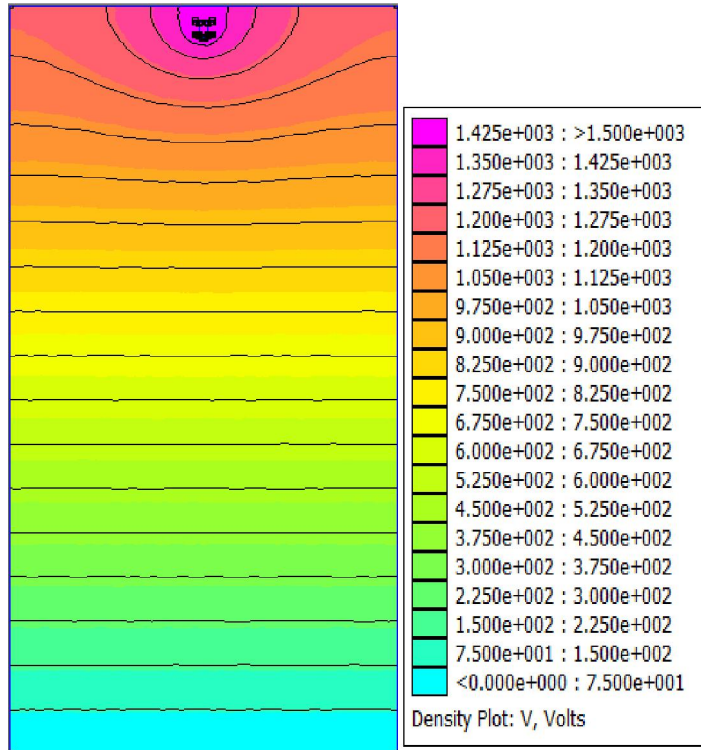
Şekil 6.18 : 1500 V DC potansiyel dağılımı.

Şekil 6.19’da iletken profildeki bakır kablo seviyesinden ray seviyesine doğru potansiyelin değişim grafiği verilmiştir.



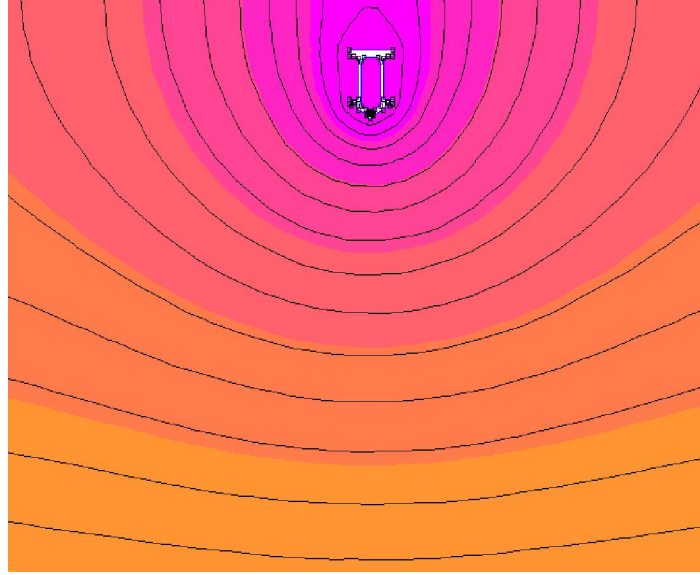
Şekil 6.19 : 1500 V DC için mesafeye göre potansiyel dağılımı.

Şekil 6.20’de eş potansiyel eğrileriyle birlikte potansiyel dağılımı verilmiştir.



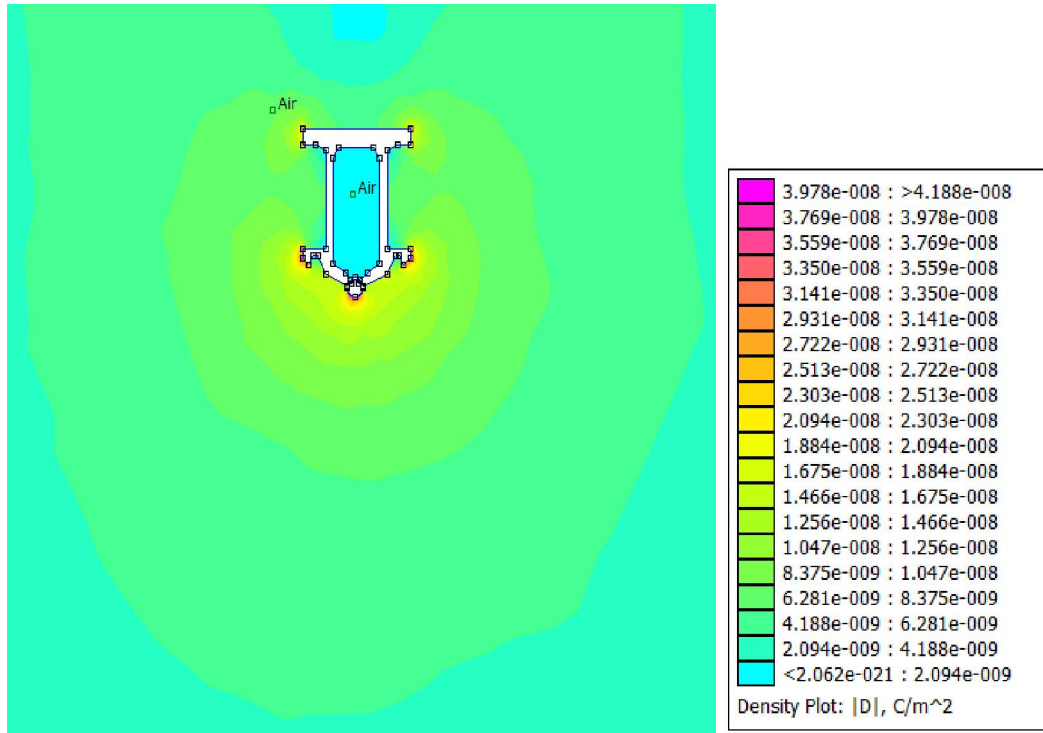
Şekil 6.20 : 1500 V DC için eş potansiyel eğrileri.

Şekil 6.21’de iletken profil çevresindeki potansiyel dağılımı gösterilmiştir.



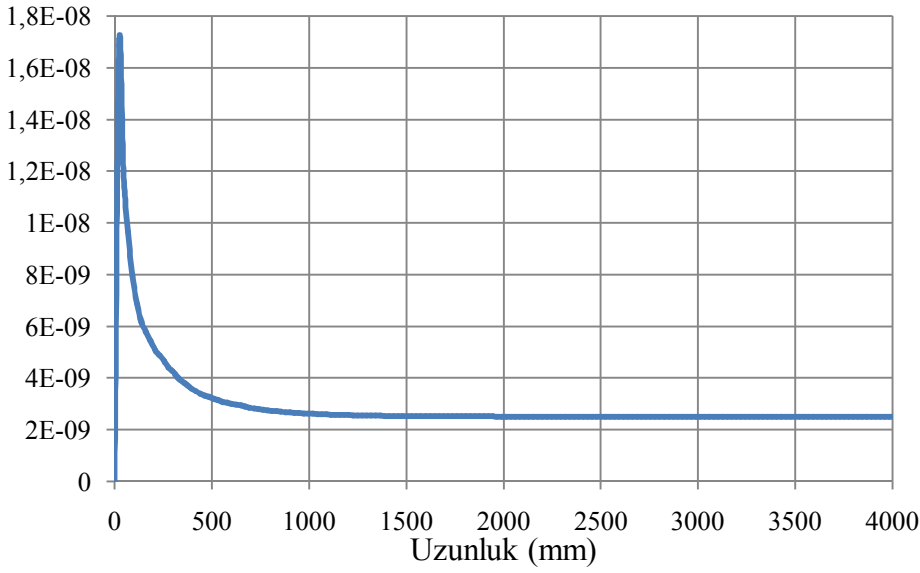
Şekil 6.21 : İletken profilin çevresindeki potansiyel dağılımı.

Akı yoğunluğunda alt sınır $2,06 \times 10^{-21}$ C/m², üst sınır ise $4,18 \times 10^{-8}$ C/m² olarak bulunmuştur. Aşağıda elektriksel akı yoğunluğunun profil çevresindeki büyüklük dağılımı verilmiştir. Şekil 6.22’de profil çevresindeki elektriksel akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir. Şekil 6.23’te kontak telinden ray seviyesine doğru elektriksel akı yoğunluğu değişimi gösterilmiştir.



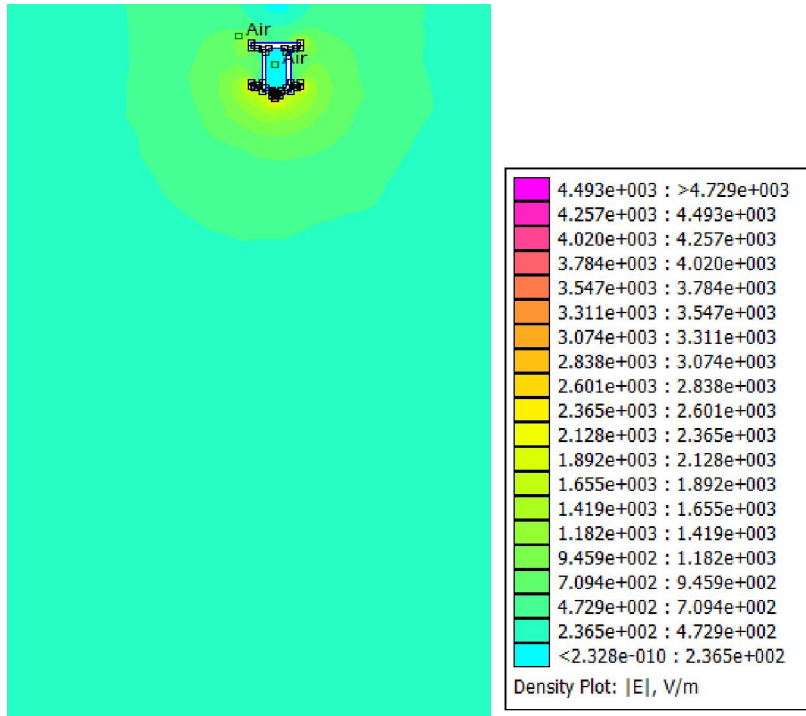
Şekil 6.22 : 1500 V DC için elektriksel akı yoğunluğu dağılımı.

Elektriksel akı yoğunluğu dağılımı (C/m²)

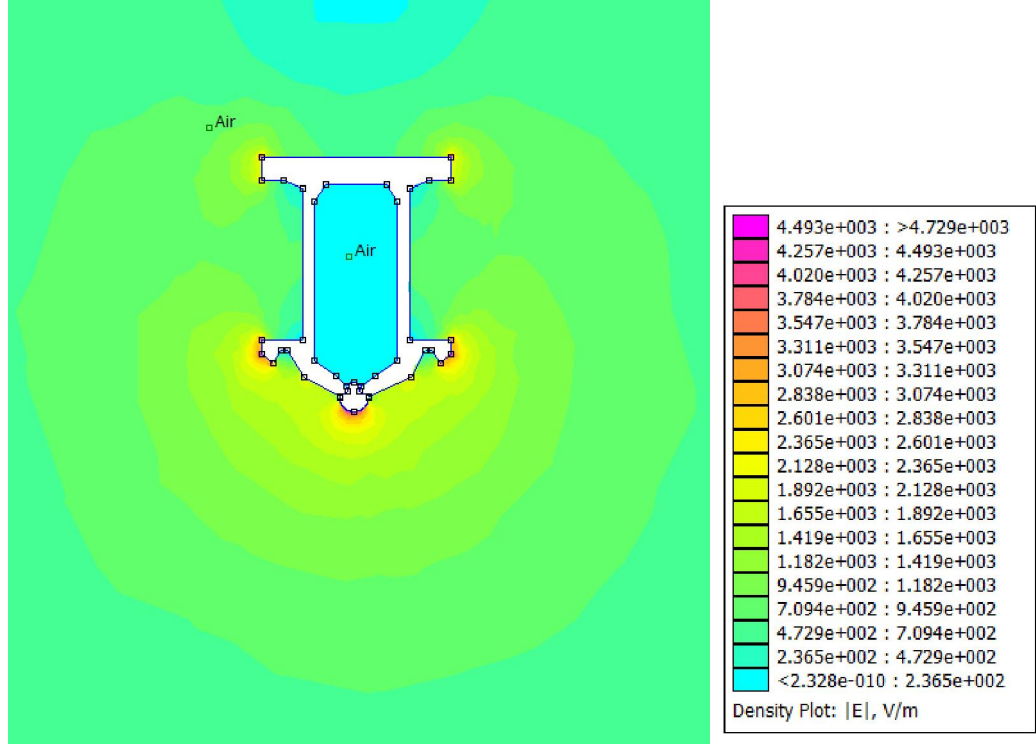


Şekil 6.23 : 1500 V DC için elektriksel akı yoğunluğu dağılımı grafiği.

Elektrik alan için inceleme yapıldığında, alt sınır $2,32 \times 10^{-10}$ V/m, üst sınır ise 4729,49 V/m olarak bulunmuştur. Elektrik alan şiddeti en yüksek değerini profilin köşe noktalarında ve bakır kablunun alt tarafında gözlenmiştir. Şekil 6.24’de iletken profil çevresindeki elektrik alan şiddeti dağılımı gösterilmiştir. Şekil 6.25’de bu dağılımın yakınlaştırılmış görüntüsü verilmiştir.

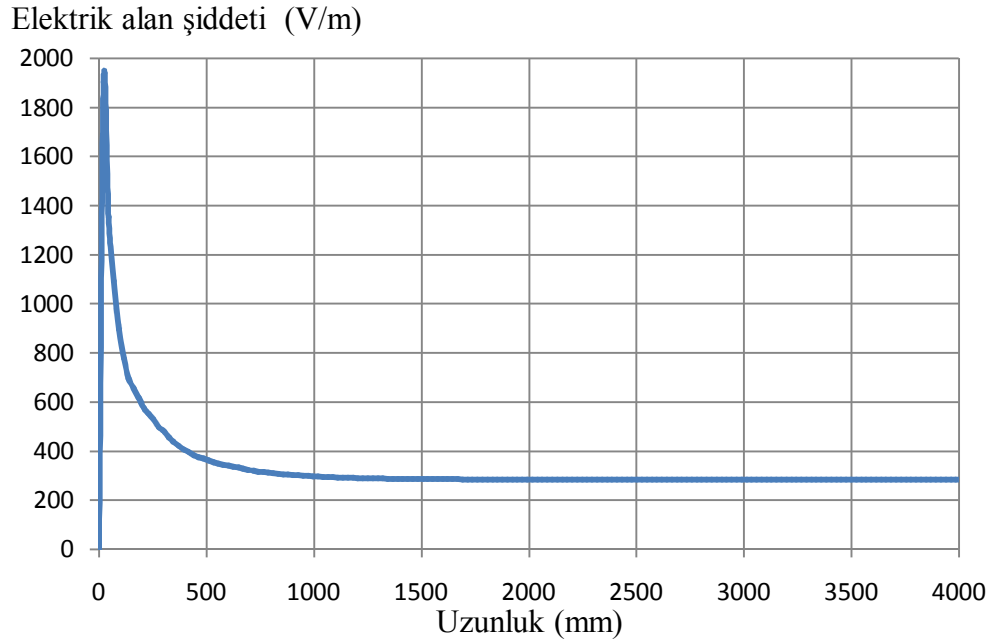


Şekil 6.24 : 1500 V DC için elektrik alan şiddeti dağılımı.



Şekil 6.25 : 1500 V DC için profil çevresindeki elektrik alan şiddeti dağılımı.

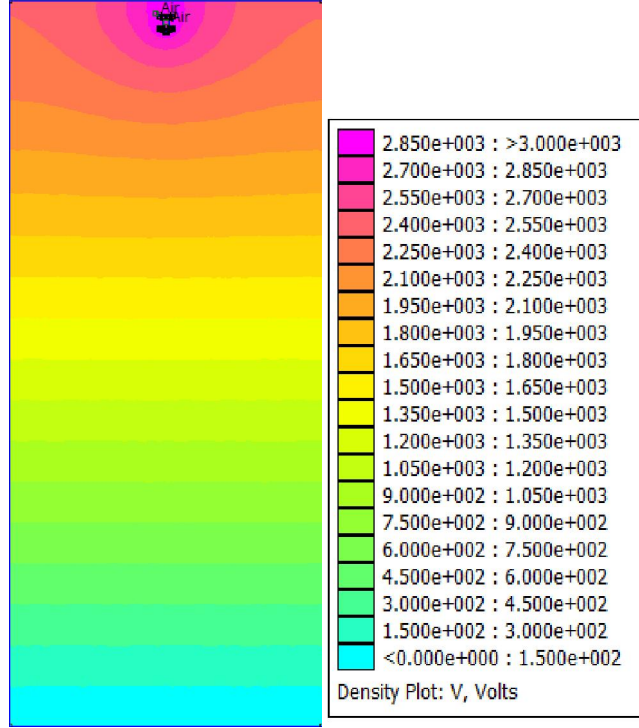
Şekil 6.26’da kontak telinden ray seviyesine doğru elektrik alan şiddetinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.26 : 1500 V DC için elektrik alan şiddeti dağılımı grafiği.

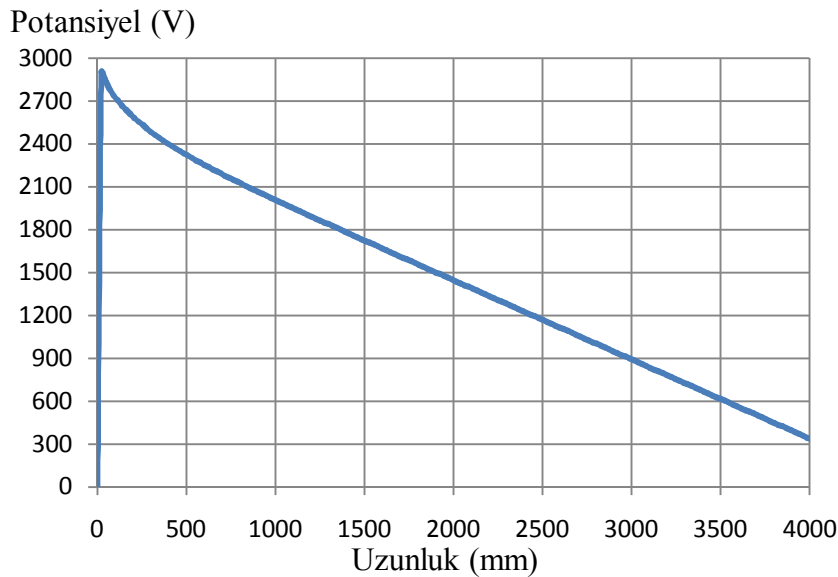
6.5.3 3000 V DC Gerilim için Elektrostatik Alan Analizi

Benzetimde profilin yapıldığı Al 6101 alaşım malzemesi ve bakır kablo, dağılımın doğru belirlenebilmesi için ağ oluşturma işleminde problem bölgesinin dışında tutulmuştur. Geri kalan bölge ise program tarafından 5710 düğümlü, 10.567 elemanlı sonlu eleman bölgesine ayrılmıştır. Şekil 6.27’de potansiyel dağılımı gösterilmiştir.



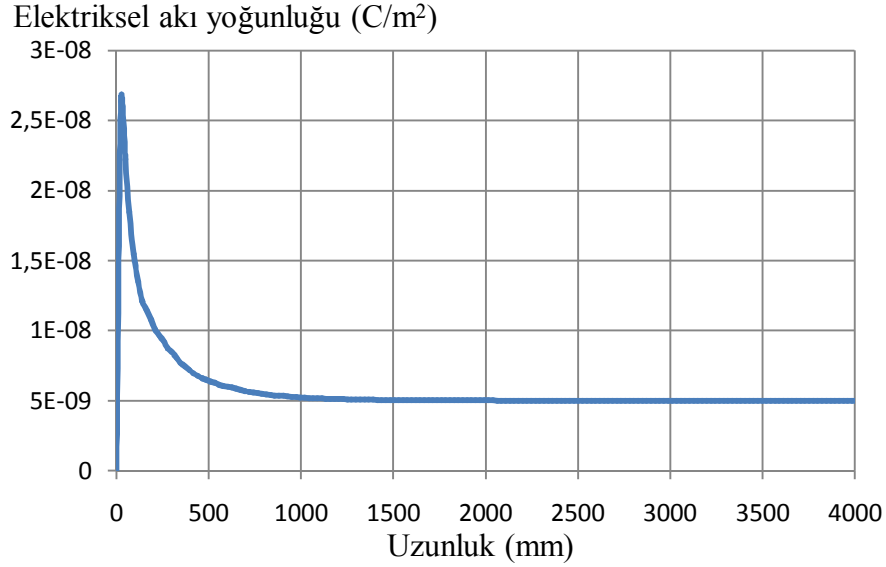
Şekil 6.27 : 3000 V DC için potansiyel dağılımı.

Şekil 6.28’de kontak telinden ray seviyesine doğru potansiyel dağılımı verilmiştir.



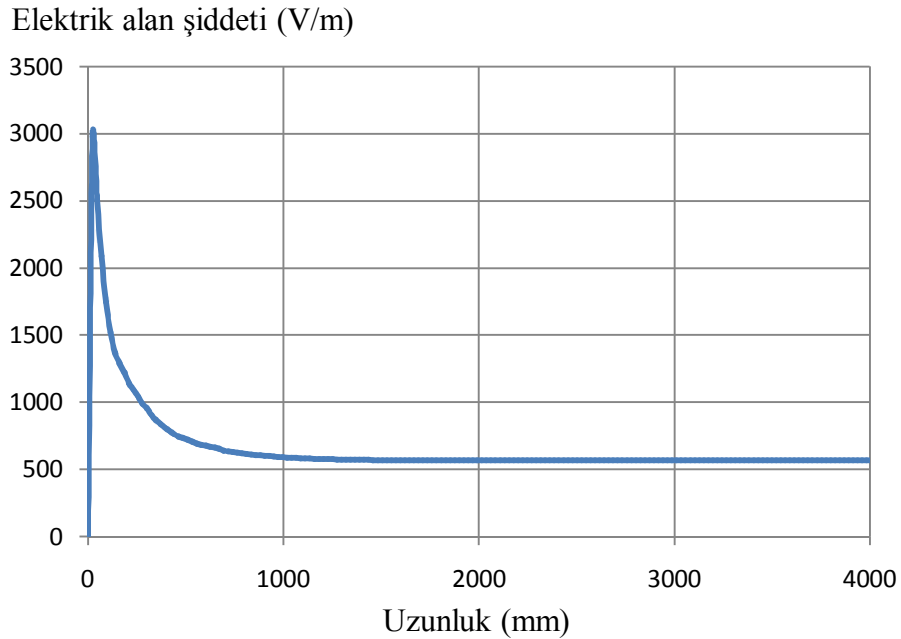
Şekil 6.28 : Potansiyelin uzaklığa bağlı değişim grafiği.

Elektriksel akı yoğunluğunda alt sınır $8,2 \times 10^{-21} \text{ C/m}^2$, üst sınır $1,6 \times 10^{-7} \text{ C/m}^2$ olarak bulunmuştur. Şekil 6.29’da kontak telinden ray seviyesine doğru elektriksel akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.



Şekil 6.29 : 3000 V DC elektriksel akı yoğunluğu dağılımı grafiği.

Elektrik alan şiddeti üst sınır 18323,3 V/m, alt sınır $9,3 \times 10^{-10} \text{ V/m}$ ’dir. Bakır kablunun, alüminyum profille birleştiği noktalarda elektrik alan şiddetinin üst sınır değerleri görülmüştür. Şekil 6.30’da elektrik alan şiddetinin kontak telinden ray seviyesine doğru değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 6.30 : 3000 V DC elektrik alan şiddeti dağılımı grafiği.

6.6 Tren Yokken Yolcunun Maruz Kaldığı Manyetik Alanın İncelenmesi

Bu bölümde rijit katener sistemi kullanılan bir hat, Femm programında modellenmiş ve bir yolcunun tren beklerken maruz kalacağı manyetik alan etkisi incelenmiştir. İnceleme istasyonda tren yokken yapılmıştır. Modelde rijit profilin yapısını Al 6101 alaşımı, bakır kablo ve havaya ilave olarak 1,86 m boyundaki bir yolcu raylardan 1 metre yükseklikteki güvenli bölgede treni beklemektedir. Al 6101, bakır ve havanın bağlı manyetik geçirgenliği 1 olarak alınmıştır. İnsan vücudunu modellemek ise son derece zor bir problem olmakla beraber benzetimde vücudun çoğunlukla yağ ve kemikten oluştuğu göz önünde bulundurularak bağlı manyetik geçirgenliği 0,99999176 olarak alınmıştır. Al 6101 alaşımın elektriksel iletkenliği %43 IACS olduğundan 24,985 MS/m (MegaSiemens/metre) olarak; bakırın elektriksel iletkenliği 58 MS/m, bakır kablo kesit alanı 150 mm² olarak alınmıştır. Simux programından faydalananarak Kadıköy-Kartal hattında işleyen 8’li bir trenin iki dakika sefer aralığında güzergah boyuncaki hareketinde katenerden çektiği maksimum akım grafiği kullanılmıştır. Yolcu istasyonlarının bulunduğu konumlar ilerleyen kısımda metre cinsinden verilmiştir. Bu bilgilerden yararlanılarak trenin duraklardan yolcu alırken çektiği maksimum akımlar belirlenmiştir. Bu akımlar kullanılarak analizler yapıp; durakta bekleyen bir yolcunun başından ayağına kadar etki eden manyetik alan şiddetleri ve manyetik akı yoğunlukları bulunmuştur. Simülasyonlar sırasında tüm hatta 20 adet tren bulunmaktadır. Çizelge 6.5’te farklı dokulara ilişkin bağlı manyetik geçirgenlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Farklı dokulara ilişkin bağlı manyetik geçirgenlik değerleri [14].

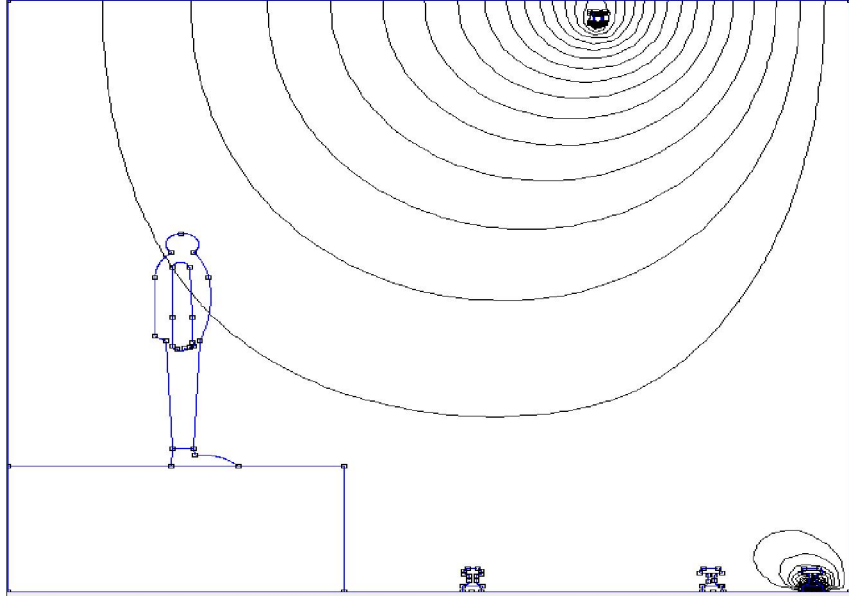
Madde	μ_r
Su	0,99999096
Yağ	0,99999221
Kemik	0,99999156
Kan	0,99999153

Çizelge 6.6'da 21 km'lik hattaki 16 adet istasyonun yerleri belirtilmektedir.

Çizelge 6.6 : Kadıköy Kartal hattı durak yerleri.

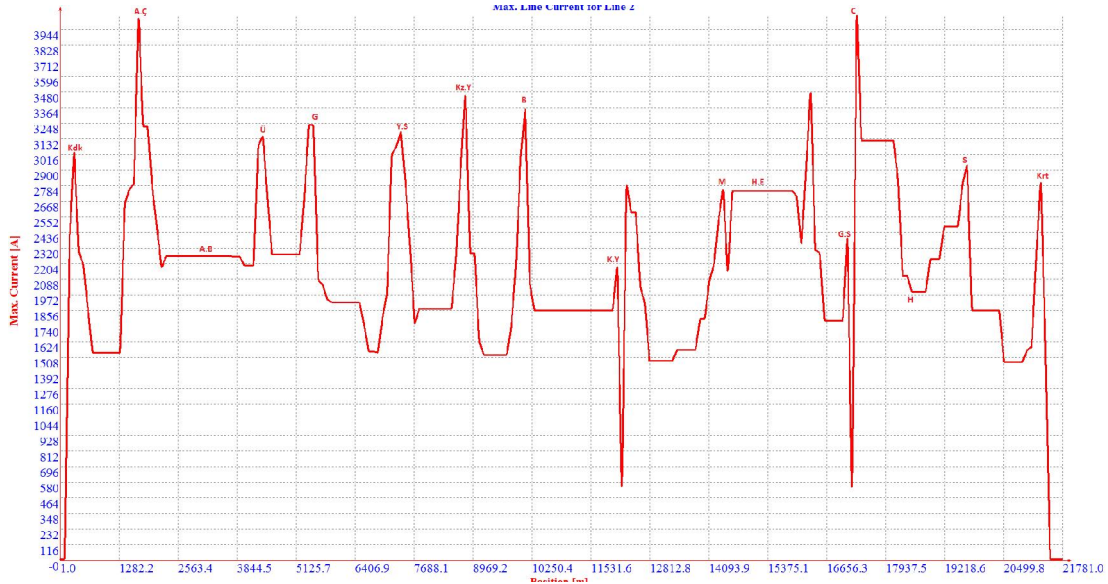
Durak Adı	Baş (m)	Son (m)
Kadıköy (Kdk)	208	388
Ayrılıkçeşme (A.Ç)	1541	1721
Acıbadem (A.B)	2969	3149
Ünalan (Ü)	4349	4529
Göztepe (G)	5369	5549
Yenisahra (Y.S)	7338	7518
Kozyatağı (Kz.Y)	8663	8843
Bostancı (B)	9966	10146
Küçükyalı (K.Y)	12208	12388
Maltepe (M)	14289	14469
Huzurevi (H.E)	15179	15359
Gülsuyu (G.S)	16156	16336
Esenkent/Cevizli (C)	17201	17381
Hastane (H)	18311	18491
Soğanlık (S)	19568	19748
Kartal (Krt)	21334	21514

Benzetimde durakta trenin gelmesini bekleyen bir yolcu, rijit katener sistemi, çelik taşıyıcı raylar ve dönüş iletkeni olarak bakır üçüncü ray kullanılmıştır. Durağa tren gelirken katenerden çekilen akımlarla trenin yolcu almak için durakta beklediği sıradaki çektiği akımların aynı olduğu kabul edilmiştir. Buradaki amaç sonraki bölümde trenin nasıl bir manyetik etki yaptığının görülebilmesidir. Yolcu topraklanmış beton kısımda bulunmaktadır. İletken profil ve bakır kablo, seri devre olarak tanımlanmıştır. Duraklara göre çekilen akım değiştirilmiştir. Taşıyıcı rayların yanında bulunan üçüncü raydan geçen dönüş akımı ise katenerden çekilen akımın aynı değerde, ters yönlüsü olarak düşünülmüştür. Taşıyıcı ray açıklığı 1,43 metredir. Benzetim yapıldığında problem 22.470 düğümlü 44.575 elemanlı sonlu elemanlar bölgesine ayrıştırılmıştır. Şekil 6.31'de oluşan manyetik akı yoğunluğu çizgilerinin dağılımı verilmiştir.



Şekil 6.31 : Durakta tren bekleyen yolcu modeli.

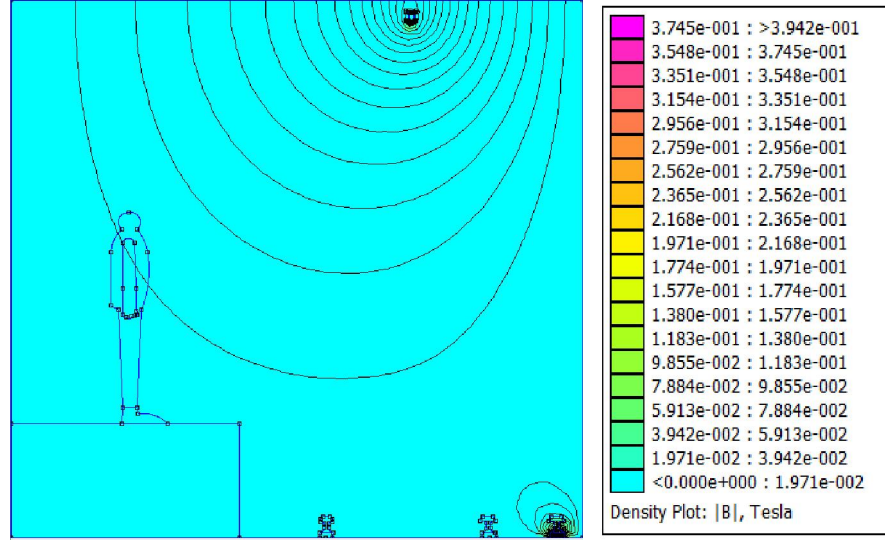
Duraklara göre hat boyunca çekilen maksimum akımlar, simux programı yardımıyla elde edilen Şekil 6.32'deki akım grafiğinden alınmıştır.



Şekil 6.32 : Sekizli tren için 2 dakika işletme aralığında hattın çekilen akım grafiği.

Bu grafikten yararlanarak hattaki her durakta trenin çekebildiği maksimum akımlar bulunmuştur. Aşağıda tablo olarak sunulan verilerden anlaşılacağı üzere en fazla akım Cevizli (Esenkent) istasyonunda çekilmiştir. Katenerden çekilen akım trenin hızlanma ve yavaşlamasından çok hattın geometrisine bağlıdır. Eğimli hatlarda hızlanma ve yavaşlamada tren daha fazla akım çeker. Duraklarda beklerken çekilen akım ise daha çok yardımcı güçler için çekilir.

Örneğin en yüksek akıma Cevizli istasyonunda 4050 A’lık akıma ulaşılmıştır. Bu değer için sonlu elemanlar yöntemiyle Femm programında analiz yapıldığında aşağıdaki dağılım görülmüştür. Şekil 6.33’te Cevizli istasyonundaki en yüksek akıma göre oluşan manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.



Şekil 6.33 : Manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

Çizelge 6.7’de duraklarda ulaşılan anlık maksimum akımlar tablo olarak verilmiştir.

Çizelge 6.7 : Duraklarda ulaşılan anlık maksimum akımlar.

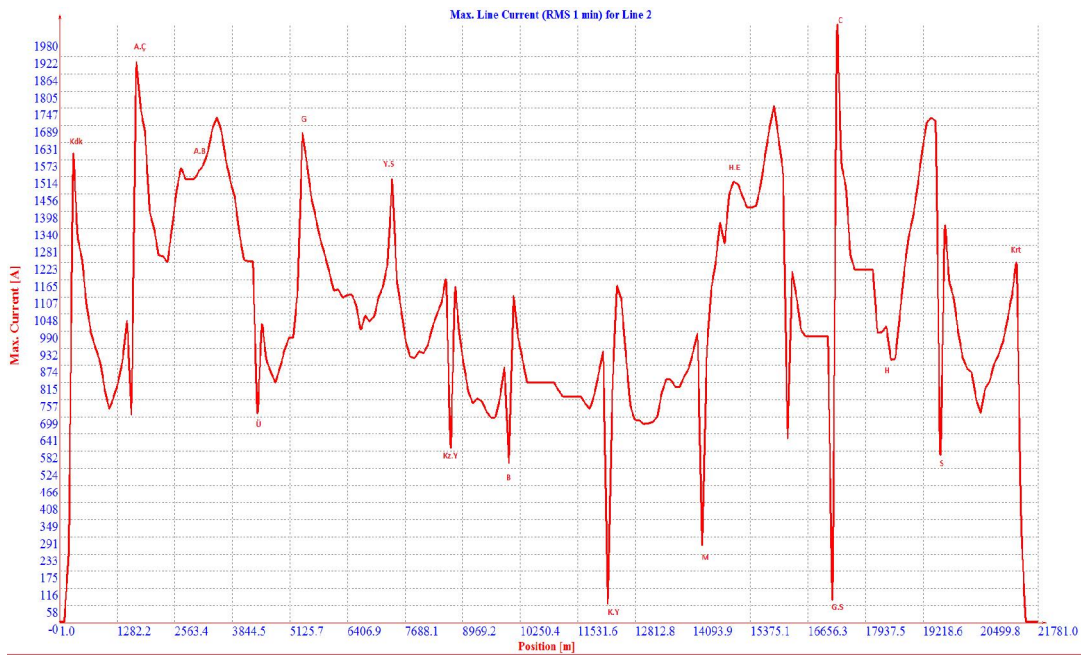
Durak Adı	Çekilen Maksimum Akım (Amper)
Kadıköy	3024
Ayrılıkçeşme	3994
Acıbadem	2262
Ünalan	3152
Göztepe	3245
Yenisahra	3190
Kozyatağı	2184
Bostancı	3358
Küçükyalı	2292
Maltepe	2764
Huzurevi	2755
Gülsuyu	2390
Esenkent/Cevizli	4050
Hastane	2108
Soğanlık	2925
Kartal	2800

Bu durakların her biri için ayrı olarak analiz tekrarlanarak baş bölgesinde ve ayak bölgesinde yolcuya etki eden manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan şiddetlerinin maksimum değerleri bulunmuştur ve bu değerler Çizelge 6.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.8 : Tren yokken anlık maksimum akımlara göre ortaya çıkan sonuçlar.

Akım değeri	Manyetik akı yoğunluğu kafada	Manyetik akı yoğunluğu ayakta	Manyetik alan şiddeti kafada	Manyetik alan şiddeti ayakta	Durak Adı
3024 A	0,00055744 T	0,00023043 T	443,607 A/m	183,377 A/m	Kadıköy
3994 A	0,00073575 T	0,000299385 T	585,496 A/m	238,245 A/m	A.Çeşme
2262 A	0,000419988 T	0,000173628 T	334,219 A/m	138,17 A/m	Acıbadem
3152 A	0,00058446 T	0,00023824 T	465,098 A/m	189,593 A/m	Ünalan
3245 A	0,000599198 T	0,000245996 T	476,83 A/m	195,759 A/m	Göztepe
3190 A	0,000586147 T	0,00024100 T	466,445 A/m	191,788 A/m	Yenisahra
2184 A	0,00040594 T	0,000168649 T	323,038 A/m	134,208 A/m	Kozyatağı
3358 A	0,00061817 T	0,00025485 T	491,933 A/m	202,805 A/m	Bostancı
2292 A	0,000421406 T	0,000176522 T	335,347 A/m	140,473 A/m	K.yalı
2764 A	0,000510175 T	0,000211433 T	405,988 A/m	168,254 A/m	Maltepe
2755 A	0,000509866 T	0,000210775 T	405,741 A/m	167,731 A/m	Huzurevi
2390 A	0,000441393 T	0,000185268 T	351,253 A/m	147,432 A/m	Gülsuyu
4050 A	0,000743996 T	0,000303451 T	592,058 A/m	241,481 A/m	Esenkent/Cevizli
2108 A	0,00038819 T	0,000163488 T	308,914 A/m	130,1 A/m	Hastane
2925 A	0,000540858 T	0,000221765 T	430,405 A/m	176,476 A/m	Soğanlık
2800 A	0,000518069 T	0,000212689 T	412,27 A/m	169,254 A/m	Kartal

Çıkan sonuçlardaki bazı değerler gündelik yaşamda değerlendirildiklerinde yüksek değerlerdedir ama bu akımlar çok kısa süreli olduklarından ve anlık olarak çok hızlı değiştiklerinden daha az tehlikelidirler. Daha sağlıklı bir değerlendirme için bir sonraki kısımda akımların bir dakikalık süreler için etkin değerleri kullanılacaktır. Simux programında bir dakikalık süre için ortaya çıkan akımın etkin değeri grafiği Şekil 6.34’de verilmiştir. Bu grafikten yararlanarak trenin durak pozisyonuna yakın noktalarda çektiği akımların etkin değerleri belirlenmiştir.



Şekil 6.34 : Hat boyunca 1 dakika için akımın etkin değerleri.

Bu grafikten yararlanarak trenlerin durakların bulunduğu konumlardaki bir dakikalık sürelerde durak pozisyonunda çektiği akımların etkin değerleri Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9 : Tren yokken akım değerlerine göre ortaya çıkan sonuçlar.

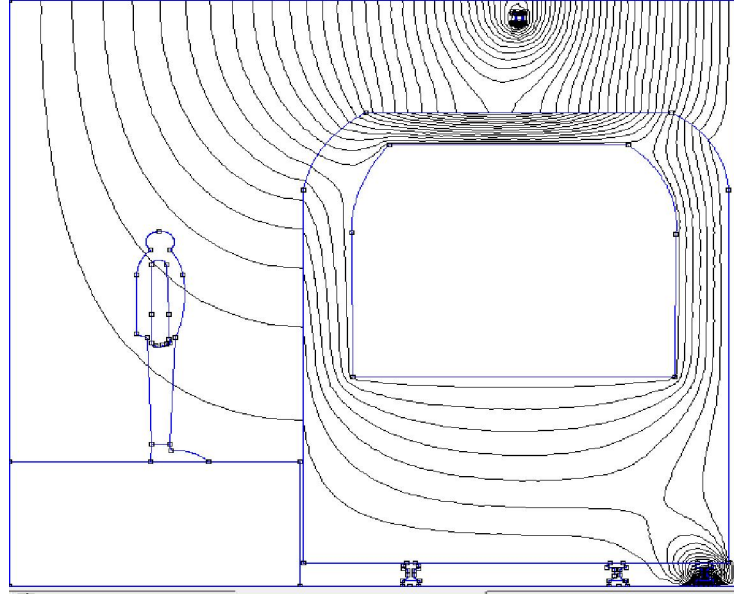
Akım değeri (A)	Manyetik akı yoğunluğu kafada	Manyetik akı yoğunluğu ayakta	Manyetik alan şiddeti kafada	Manyetik alan şiddeti ayakta	Durak Adı
1593	0,000295224 T	0,00012690 T	234,934 A/m	100,988 A/m	Kadıköy
1909	0,00035156 T	0,000149562 T	279,771 A/m	119,018 A/m	A.Çeşme
1598	0,000296127 T	0,000126218 T	235,652 A/m	100,442 A/m	Acıbadem
719	0,00013748 T	6,1653e-005 T	109,41 A/m	49,0629 A/m	Ünalan
1660	0,000306714 T	0,000130749 T	244,077 A/m	104,047 A/m	Göztepe
1500	0,000277893 T	0,00011831 T	221,142 A/m	94,151 A/m	Yenisahra
597	0,00011548 T	5,2813e-005 T	91,8974 A/m	42,0282 A/m	Kozyatağı
549	0,00010664 T	4,9622e-005 T	84,8629 A/m	39,4883 A/m	Bostancı
68	2,0486e-005 T	1,5051e-005 T	16,3024 A/m	11,9774 A/m	K.yalı
266	5,5771e-005 T	2,9303e-005 T	44,3817 A/m	23,3188 A/m	Maltepe
1494	0,000276812 T	0,000119111 T	220,282 A/m	94,7861 A/m	Huzurevi
82	2,3002e-005 T	1,601e-005 T	18,305 A/m	12,7404 A/m	Gülsuyu
1980	0,000362704 T	0,00015542 T	288,633 A/m	123,681 A/m	Esenkent/Cevizli
890	0,000167294 T	7,5125e-005 T	133,13 A/m	59,7836 A/m	Hastane
570	0,000110238 T	5,1366e-005 T	87,7252 A/m	40,8763 A/m	Soğanlık
1220	0,000227897 T	9,9010e-005 T	181,356 A/m	78,7904 A/m	Kartal

Trenlerin çektiği akımlar yolun geometrisine bağlı değişmektedir. Bazı istasyonlarda düşük akım çekilmesinin nedeni DC baraya akım basılmasıdır. Ortak baralı DC sistemlerde frenlemede geri kazanılan enerjide hatta aktarılmaktadır. Örneğin Küçükyalı durağına yaklaşan tren frenleme sonucu artan akım çekmiştir. Durağa girildiğinde çekilen akım azalarak, geri kazanılan akım tekrar hatta geri aktarılmıştır. Bu gibi durumlarda aktarılan akım hattaki yakın çevrede diğer trenin kullanımına açıktır. Tablo incelendiğinde en yüksek etkin akım değerine Cevizli daha sonraysa Ayrılıkçeşme durağında ulaşılmıştır. Cevizli istasyonunda bekleyen bir yolcu 362 μ T (mikrotesla) ile 155 μ T arasında bir manyetik akı yoğunluğuna maruz kalmıştır. Küçük Yalı durağında ise hattan çekilen akımın etkin değeri en düşüktür. Bu durakta bekleyen bir yolcu 20 μ T ile 15 μ T arasındaki küçük bir değere maruz kalmıştır. Genellikle tabloda maruz kalınan manyetik akı yoğunluğu bakımından 100 μ T ile 250 μ T arasında değerler görülmektedir.

6.7 Tren Varken Yolcunun Maruz Kaldığı Manyetik Alanın İncelenmesi

Bu bölümde rijit katener sistemi kullanılan bir hat Femm programında modellenmiş ve bir yolcunun tren geldiği zaman maruz kalacağı manyetik büyüklükler incelenmiştir. İnceleme istasyonda tren varken yapılmıştır. Modelde Al 6101 alaşımı, bakır kablo ve havaya ilave olarak 1,86 m boyundaki bir yolcu bulunmaktadır. Yolcu raylardan 1 m yükseklikteki güvenli bölgede treni beklemektedir. Al 6101, bakır ve havanın bağlı manyetik geçirgenliği 1 olarak alınmıştır. İnsan vücudunun çoğunlukla yağ ve kemikten oluştuğu göz önünde bulundurularak bağlı manyetik geçirgenliği 0,99999176 olarak alınmıştır. Al 6101 alaşımın elektriksel iletkenliği %43 IACS olduğundan 24,985 MS/m olarak; bakırın elektriksel iletkenliği 58 MS/m, bakır kablo kesit alanı 150 mm² olarak alınmıştır. Simux programından faydalanılarak bir önceki kısımda kullanılan Kadıköy-Kartal hattına ait maksimum ve etkin akım değerleri kullanılmıştır. Bu bilgilerden yararlanılarak istasyonda tren varken duraktaki yolcunun başından ayağına kadar etki eden manyetik alan şiddetleri ve manyetik akı yoğunlukları bulunmuştur. Benzetimde durakta trenin gelmesini bekleyen bir yolcu, rijit katener sistemi, taşıyıcı raylar ve dönüş iletkeni olarak üçüncü ray kullanılmıştır. Durağa tren gelirken katenerden çekilen akımlarla trenin yolcu almak için durakta beklediği sıradaki çektiği akımın aynı olduğu kabul edilmiştir. Yolcu topraklanmış beton kısımda bulunmaktadır. Tren; gövdesi saf demirden yapılmış, içerisinde hava bulunan bir kafes gibi modellenmiştir.

Trenin yüksekliği 3,5 m, genişliği ise 1,5 m'dir. İletken profil ve bakır kablo devre olarak tanımlanmış ve duraklara göre çektiği akım değiştirilmiştir. Taşıyıcı raylar çelikten yapılmıştır ve altlarında beton platform bulunmaktadır. Rayların paralelinde bulunan, bakırdan yapılmış üçüncü raydan geçen dönüş akımı ise katenerden çekilen akımın aynı değerli, ters yönüsü olarak düşünülmüştür. Bakır rayın altında seramik izolatör bulunmaktadır. Taşıyıcı ray açıklığı 1,43 m'dir. Benzetim yapıldığında problem 22.470 düğümlü 44.575 elemanlı sonlu elemanlar bölgesine ayrıştırılmıştır. Bir önceki kısımda kullanılan maksimum akımlar grafiğine göre belirlenmiş, duraklardaki akım değerleri kullanılarak benzetimler yapılmıştır. Şekil 6.35'de manyetik akı yoğunluğu dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 6.35 : Tren varken manyetik model.

Duraklarda görülen maksimum akımlara göre analiz yapıldığında Çizelge 6.10'daki sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Çizelge 6.10 : Tren varken anlık maksimum akımlara göre ortaya çıkan sonuçlar.

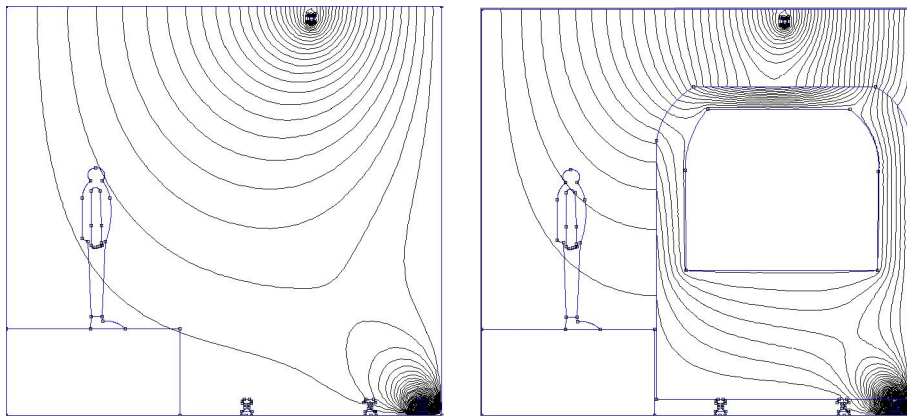
Akım değeri (A)	Manyetik akı yoğunluğu kafada	Manyetik akı yoğunluğu ayakta	Manyetik alan şiddeti kafada	Manyetik alan şiddeti ayakta	Durak Adı
3024	0,00076143 T	0,00021763 T	605,936 A/m	173,186 A/m	Kadıköy
3994	0,00100568 T	0,000284306 T	800,299 A/m	226,245 A/m	A.Çeşme
2262	0,000568026 T	0,000161017 T	452,024 A/m	128,134 A/m	Acıbadem
3152	0,00079151 T	0,000226108 T	629,876 A/m	179,932 A/m	Ünalan
3245	0,000817082 T	0,00023211 T	650,218 A/m	184,709 A/m	Göztepe
3190	0,000801061 T	0,00022786 T	637,469 A/m	181,331 A/m	Yenisahra
2184	0,00054992 T	0,000156006 T	437,621 A/m	124,147 A/m	Kozyatağı
3358	0,000839124 T	0,000243902 T	667,759 A/m	194,092 A/m	Bostancı
2292	0,000575559 T	0,000164416 T	458,019 A/m	130,839 A/m	K.yalı
2764	0,000694086 T	0,000198275 T	552,34 A/m	157,783 A/m	Maltepe
2755	0,000693701 T	0,000197629 T	552,035 A/m	157,27 A/m	Huzurevi
2390	0,000601796 T	0,000170954 T	478,898 A/m	136,042 A/m	Gülsuyu
4050	0,00102413 T	0,000292421 T	814,98 A/m	232,703 A/m	Esenkent/Cevizli
2108	0,000529354 T	0,000151217 T	421,25 A/m	120,336 A/m	Hastane
2925	0,000734515 T	0,000212141 T	584,514 A/m	168,818 A/m	Soğanlık
2800	0,000705032 T	0,000200008 T	561,052 A/m	159,162 A/m	Kartal

Daha doğru sonuç alabilmek için akımın 1 dakikalık etkin değerlerine göre analiz tekrar edilirse; Çizelge 6.11'deki ortaya çıkan sonuçlara ulaşılmıştır.

Çizelge 6.11 : Tren varken akım değerlerine göre ortaya çıkan sonuçlar.

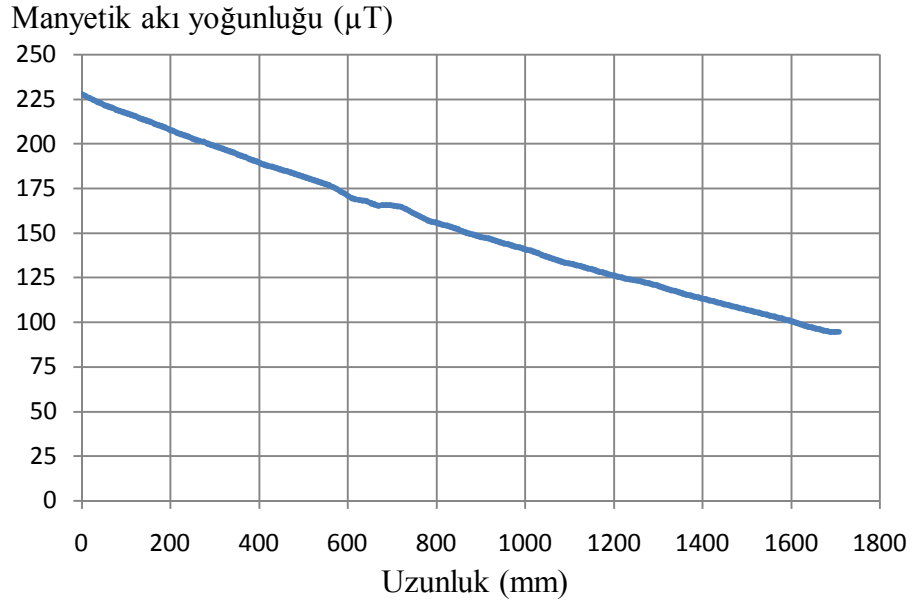
Akım değeri (A)	Manyetik akı yoğunluğu kafada	Manyetik akı yoğunluğu ayakta	Manyetik alan şiddeti kafada	Manyetik alan şiddeti ayakta	Durak Adı
1593	0,000401114 T	0,000114841 T	319,199 A/m	91,3883 A/m	Kadıköy
1909	0,000475953 T	0,000136942 T	378,755 A/m	108,976 A/m	A.Çeşme
1598	0,000404088 T	0,000115528 T	321,566 A/m	91,9346 A/m	Acıbadem
719	0,000181044 T	5,2147e-005 T	144,071 A/m	41,4983 A/m	Ünalan
1660	0,000413872 T	0,000119467 T	329,352 A/m	95,0696 A/m	Göztepe
1500	0,000373981 T	0,000108443 T	297,607 A/m	86,2967 A/m	Yenisahra
597	0,000150324 T	4,2965e-005 T	119,625 A/m	34,1914 A/m	Kozyatağı
549	0,000137864 T	3,9383e-005 T	109,71 A/m	31,3406 A/m	Bostancı
68	1,7077e-005 T	4,9331e-006 T	13,5901 A/m	3,9257 A/m	K.yalı
266	6,587e-005 T	1,9293e-005 T	52,4181 A/m	15,3533 A/m	Maltepe
1494	0,000375169 T	0,000107172 T	298,552 A/m	85,2857 A/m	Huzurevi
82	2,0593e-005 T	5,9026e-006 T	16,3878 A/m	4,69721 A/m	Gülsuyu
1980	0,000497211 T	0,000143604 T	395,671 A/m	114,277 A/m	Esenkent/Cevizli
890	0,000221896 T	6,4261e-005 T	176,581 A/m	51,1381 A/m	Hastane
570	0,000142114 T	4,1341e-005 T	113,092 A/m	32,8987 A/m	Soğanlık
1220	0,000305547 T	8,7801e-005 T	243,148 A/m	69,8707 A/m	Kartal

Tablo incelendiğinde tren varkenki durumda; vücudun katener hattına en yakın bölgesi olan baş bölgesindeki akım yoğunlukları ve alan şiddetleri, tren yokkenki duruma göre daha da artmıştır. Katener hattından uzaklaşıldığında, vücudun en uzak noktası olan ayağa doğru inildiğindeyse, tren yokkenki duruma göre manyetik akı yoğunlukları ve manyetik alan şiddetleri azalmıştır. Bunun nedeni olarak gelen trenin manyetik güçlendirme yaparak akı yolu bakımından trenin üst bölgesinde daha yoğun bir etki oluşturmuştur ve böylece vücuda girebilecek manyetik alan etkisini katenere en uzak noktada biraz azaltmıştır. Güçlü bir ferromanyetik malzeme olan demir tren gövdesi aynı şekilde trenin üst bölgesinde oluşan manyetik alanı yoğunlaştırmış, baş bölgesindeki akı yoğunluğunu ve manyetik alan şiddetini arttırmıştır. Şekil 6.36’da her iki durumdaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir.

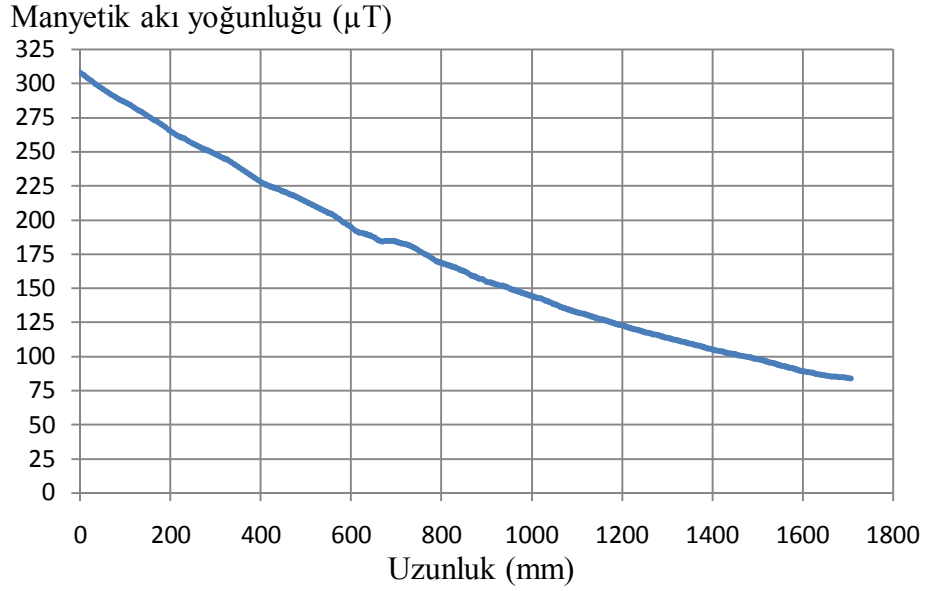


Şekil 6.36 : 1200 A için tren var ve yok durumunda akı yoğunluğu dağılımı.

Şekil 6.37’da tren yokken, Şekil 6.38’de ise tren varken baş bölgesinden ayağa kadar 1200 Amper için manyetik akı yoğunluğunun değişim grafikleri verilmiştir.



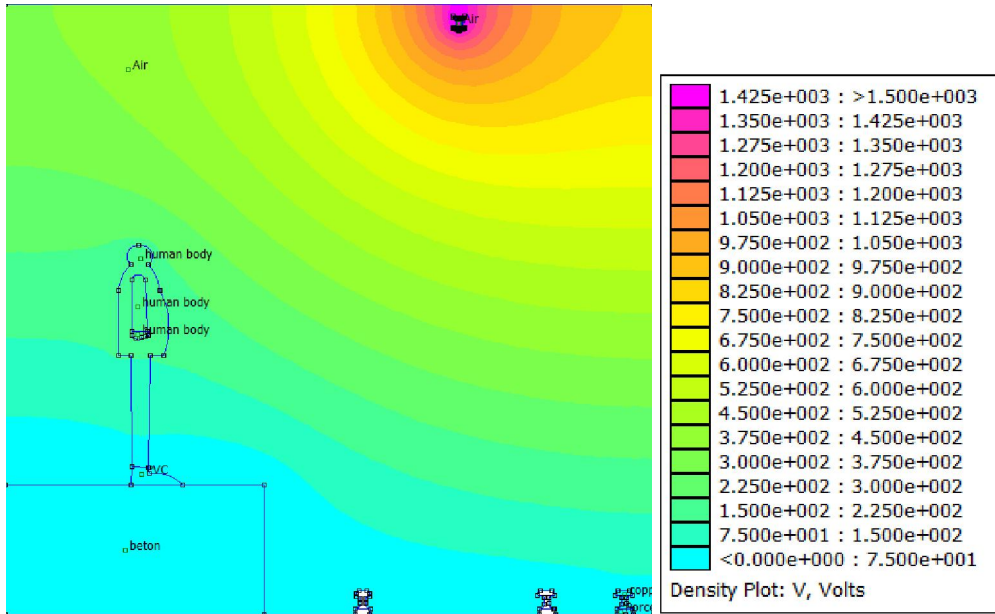
Şekil 6.37 : Tren yokken vücutta manyetik akı yoğunluğu dağılımı.



Şekil 6.38 : Tren varken vücutta manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

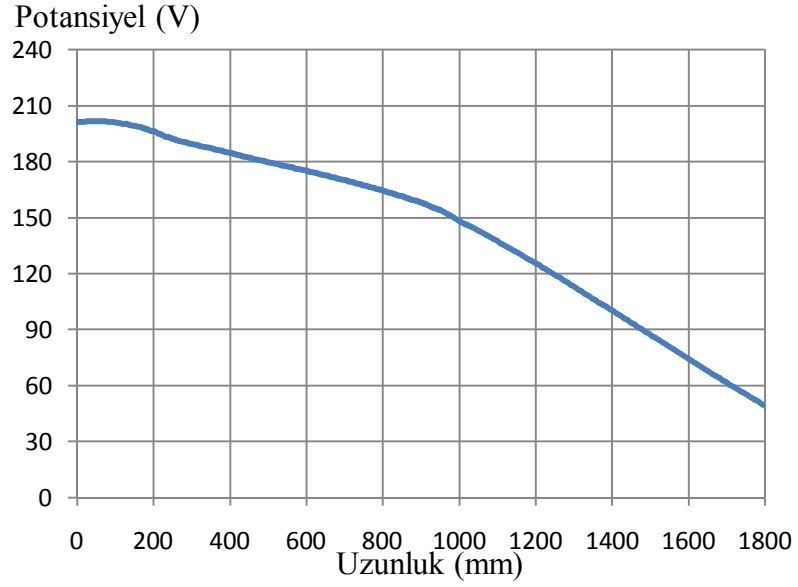
6.8 Tren Yokken Yolcunun Maruz Kaldığı Elektrik Alanın İncelenmesi

Bu kısımda ise gerilim değerleri kullanılarak insanın üzerine etki eden elektrik alan incelenmiştir. Standartlara göre 1500 V sürekli nominal gerilim için izin verilen en yüksek sürekli gerilim 1800 V; en düşük sürekli gerilim 1000 V'dir. Sırasıyla bu gerilim değerlerinin iletken barada olduğu, dönüş iletkeninde ise 1500 V için 60 V 1800 V için 100 V; 1000 V için 40 V gerilim olduğu benzetimlerde göz önünde bulundurulmuştur. Dönüş iletkeninin altında porselen izolatörler bulunmaktadır. Taşıyıcı raylar ve yolcunun üzerinde bulunduğu platform topraklanmıştır. İlk olarak 1500 V DC gerilim için elektrostatik analiz yapıldığında Şekil 6.39'daki potansiyel dağılımı ortaya çıkmıştır.

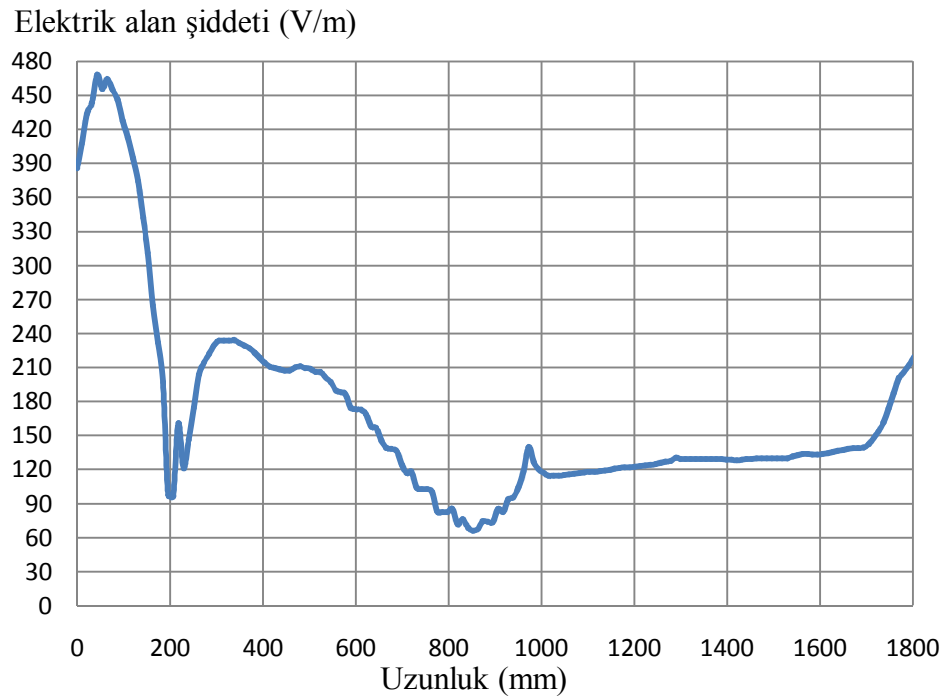


Şekil 6.39 : 1500 V için potansiyel dağılımı.

Yolcunun baş bölgesindeki elektrik alan şiddeti 96,74 V/m ile 468,2 V/m değeri arasındadır. Baştan ayağa doğru; potansiyel dağılımı grafiği Şekil 6.40'da, elektrik alan şiddetinin değişimi grafiği Şekil 6.41'de gösterilmiştir.

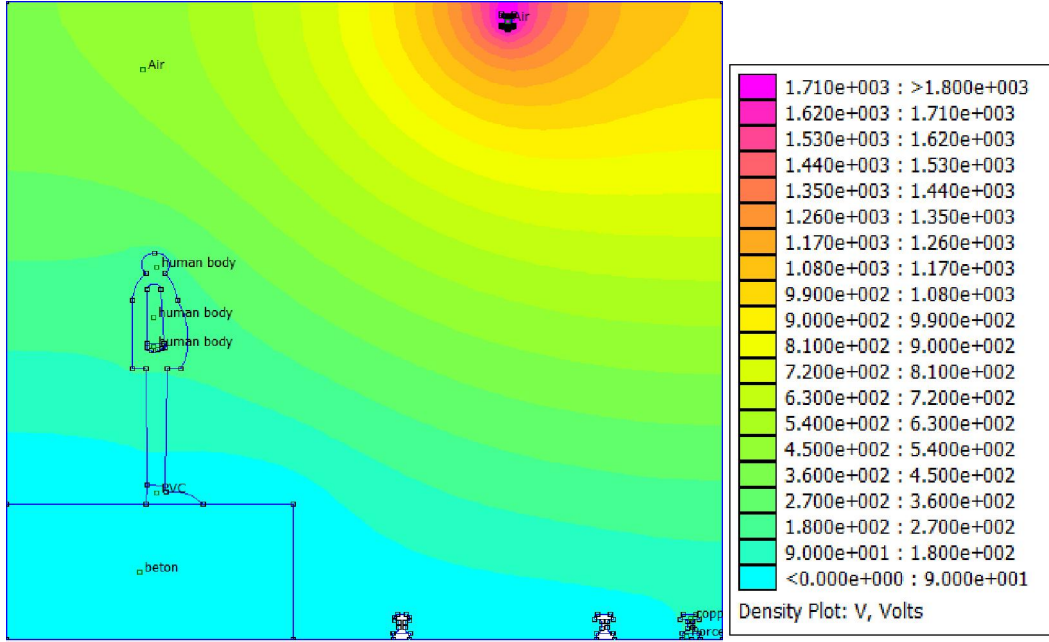


Şekil 6.40 : 1500 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı.

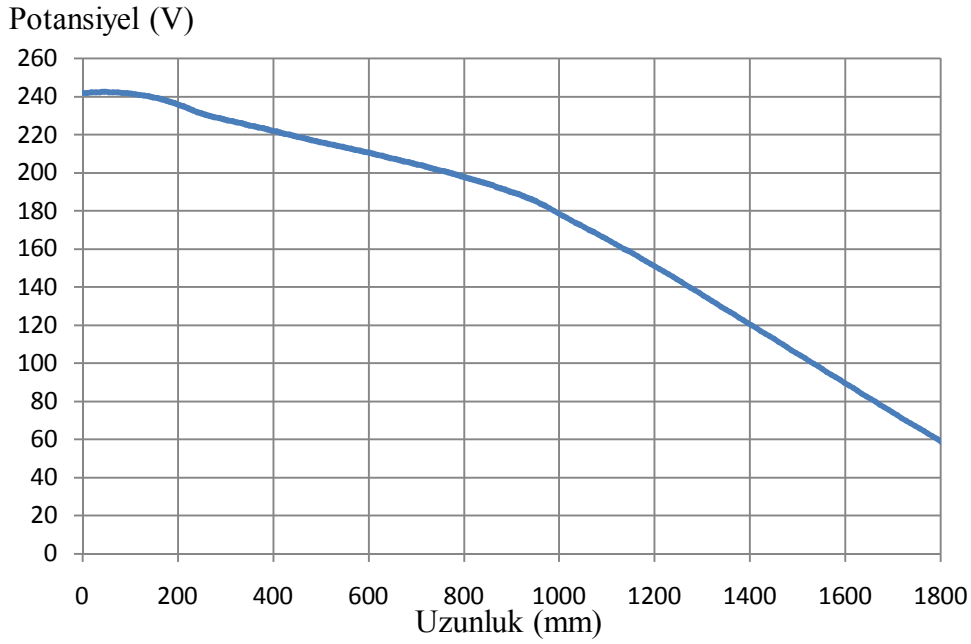


Şekil 6.41 : 1500 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı.

Şekil 6.42’de tren yokken 1800 volt rijit bara gerilimi için gerilim dağılımı gösterilmiştir. Şekil 6.43’te baş bölgesinden ayağa doğru, potansiyel dağılımı grafiği gösterilmiştir.



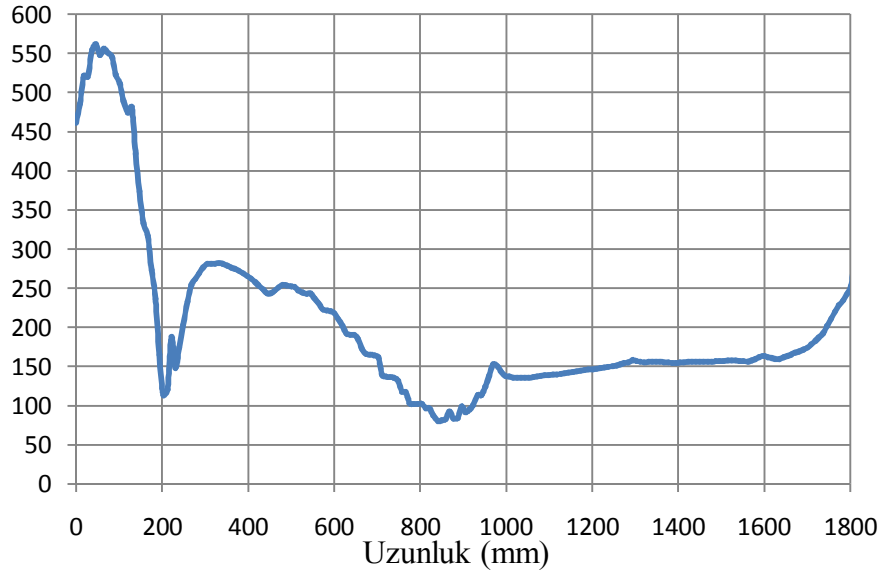
Şekil 6.42 : 1800 V için potansiyel dağılımı.



Şekil 6.43 : 1800V için baştan ayağa potansiyel dağılımı.

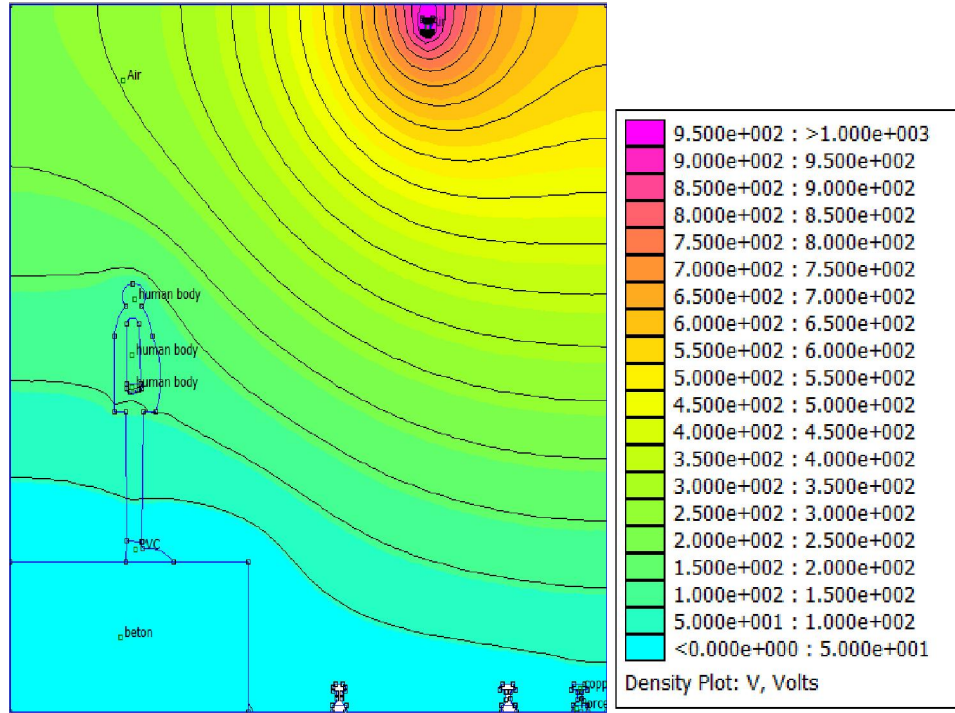
Yolcunun baş bölgesinde 113,6 V/m ile 562,2 V/m arasında değişen elektrik alan şiddeti gözlenmiştir. Şekil 6.44’de 1800 Volt bara gerilim değeri için baştan ayağa doğru, elektrik alan şiddetinin değişimi verilmiştir.

Elektrik alan şiddeti V/m

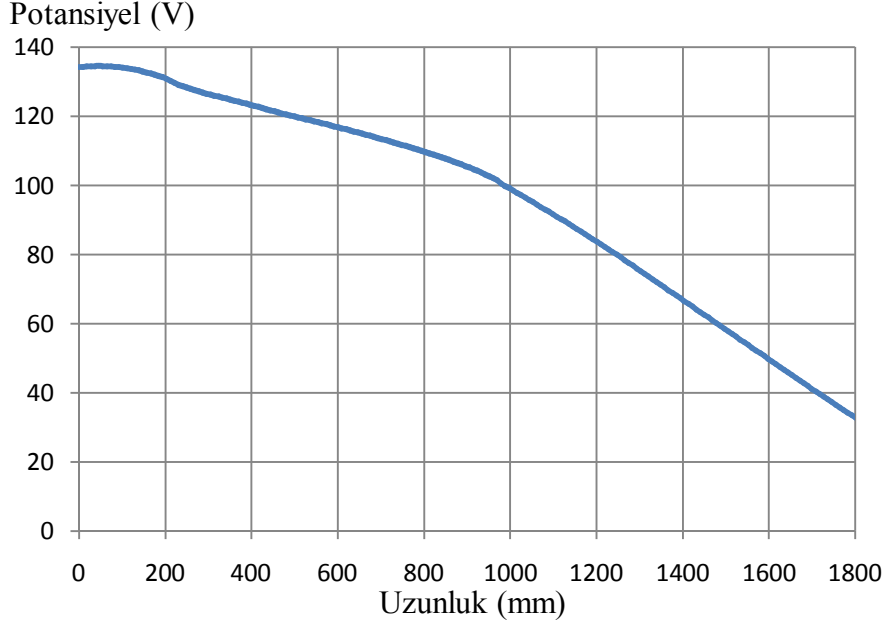


Şekil 6.44 : 1800 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı.

Şekil 6.45’de tren yokken 1000 volt rijit bara gerilimi için potansiyel dağılımı gösterilmiştir. Şekil 6.46’da baş bölgesinden ayağa doğru, potansiyel değişimi grafiği verilmiştir.

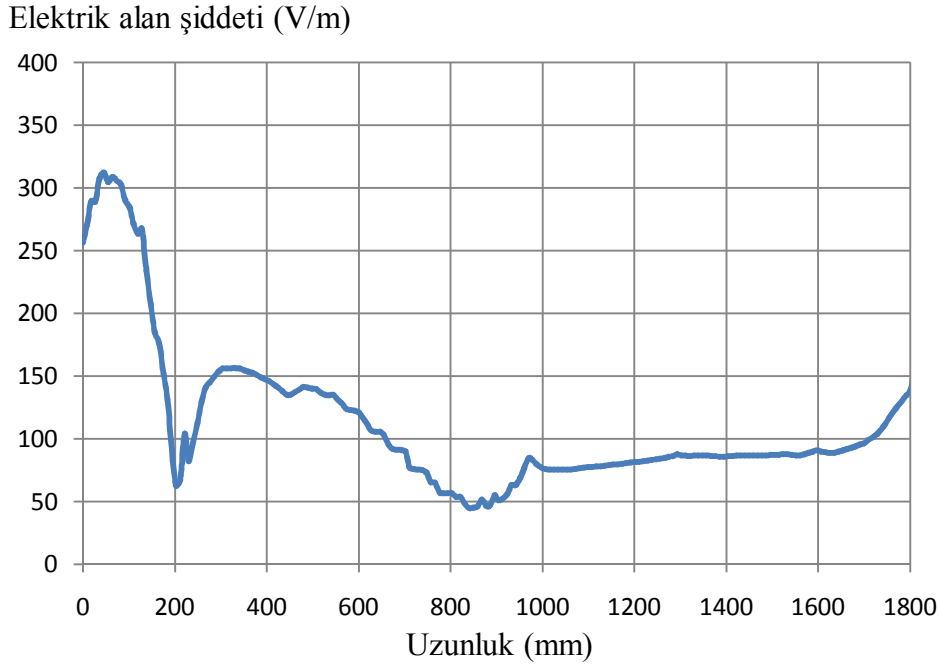


Şekil 6.45 : 1000 V için eş potansiyel eğrileriyle birlikte potansiyel dağılımı.



Şekil 6.46 : 1000 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı.

Baş bölgesinde 63 V/m ile 311,9 V/m arasında değişen elektrik alan şiddeti gözlenmiştir. Şekil 6.47’de baştan ayağa doğru, elektrik alan şiddetinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.47 : 1000 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı.

Çizelge 6.12’de tren yokken baradaki gerilim değerlerine göre vücuda etkileyen elektrik alan şiddetleri verilmiştir.

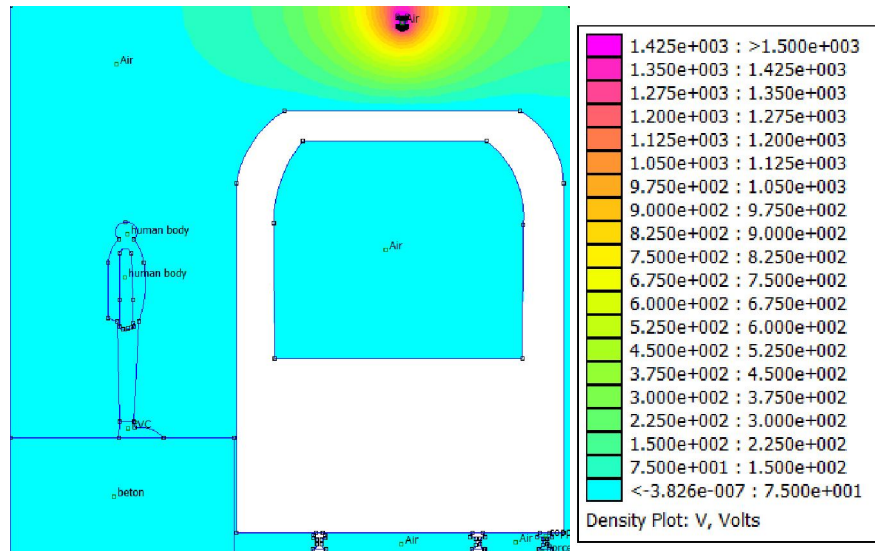
Çizelge 6.12 : Tren yokken vücuda etki eden elektrik alan şiddetleri.

Gerilim Değerleri	1000 V	1500 V	1800 V
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Baş bölgesi)	63-311,9 V/m	96,74-468,2 V/m	113,6-562,2 V/m
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Gövde)	44,7-156,3 V/m	67-234,5 V/m	80,7-282 V/m

Tablo incelendiğinde gerilim arttığında elektrik alan şiddetinin de arttığı görülmektedir. İşletmeye izin verilen en küçük sürekli gerilim olan 1000 V’de 311,9 V/m, en büyük sürekli gerilim 1800 V’de ise maksimum 562,2 V/m değeri görülmüştür. En fazla elektrik alan şiddetleri başın yukarı kısımlarında görülmüştür. Pratikte çok kısa süreli olması kaydıyla işletme gerilimi, 1500 V nominal gerilim için 1950 V’ye kadar çıkabilmektedir.

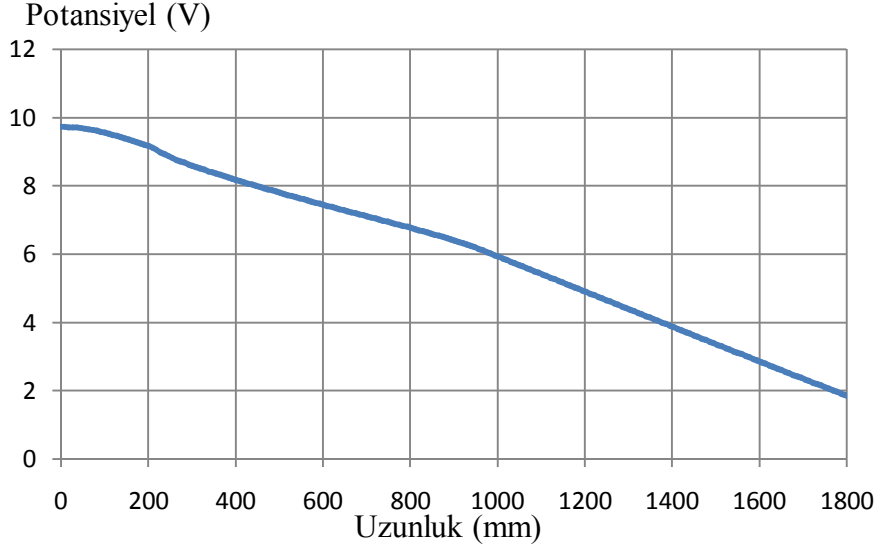
6.9 Tren Varken Yolcunun Maruz Kaldığı Elektrik Alanın İncelenmesi

Bu kısımda ise bir önceki kısımda kullanılan gerilim değerleri kullanılarak durakta tren varken yolcunun üzerine etki eden elektrik alan incelenmiştir. Standartlara göre 1500 V sürekli nominal gerilim için izin verilen en yüksek sürekli gerilim 1800 V; en düşük sürekli gerilim 1000 V’dir. Sırasıyla bu gerilim değerlerinin iletken barada olduğu, dönüş iletkeninde ise 1500 V için 60 V, 1800 V için 100 V, 1000 V için 40 volt gerilim olduğu benzetimlerde göz önünde bulundurulmuştur. Dönüş iletkeninin altında porselen izolatör bulunmaktadır. Taşıyıcı raylar ve yolcunun üzerinde bulunduğu platform topraklanmıştır. İlk olarak 1500 V DC gerilim için elektrostatik analiz yapıldığında Şekil 6.48’deki potansiyel dağılımı ortaya çıkmıştır.

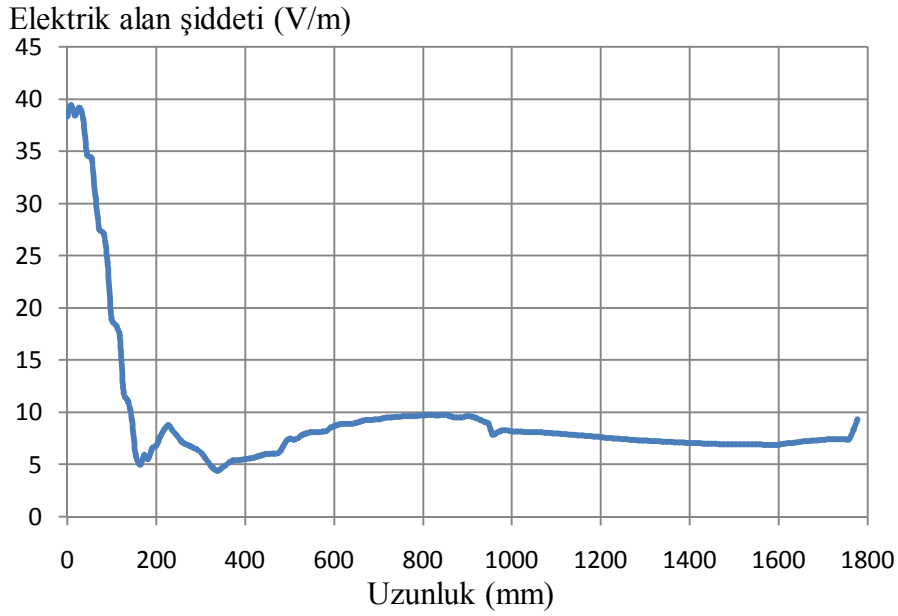


Şekil 6.48 : 1500 V için tren olduğu durumda potansiyel dağılımı.

Yolcunun baş bölgesindeki elektrik alan şiddeti 5,51 V/m ile 39,4 V/m değeri arasındadır. 1500 volt için baştan ayağa doğru; potansiyelin değişimi Şekil 6.49’da, elektrik alan şiddeti değerinin değişimi Şekil 6.50’de gösterilmiştir.

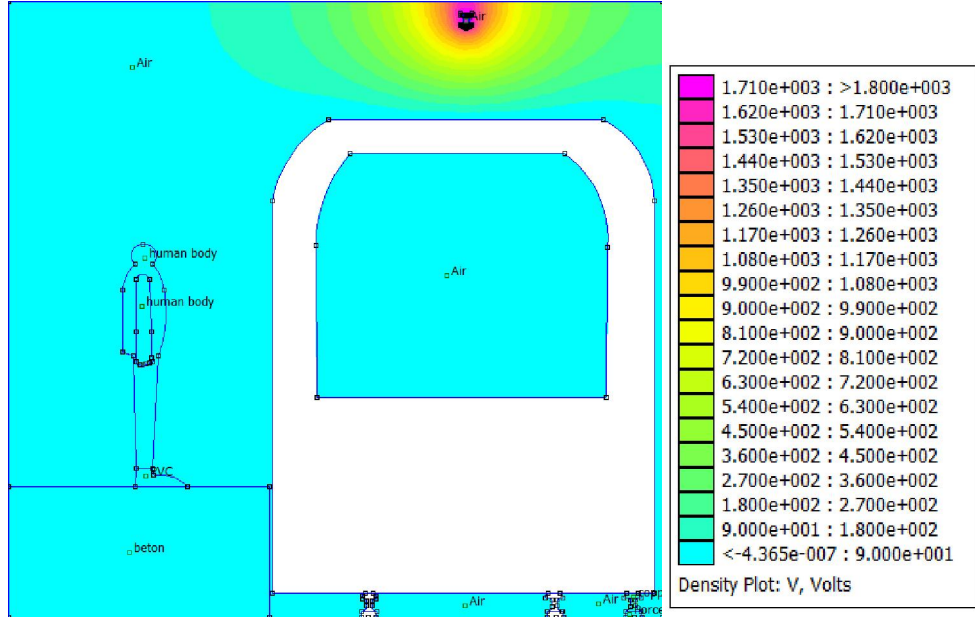


Şekil 6.49 : Tren var 1500 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı.



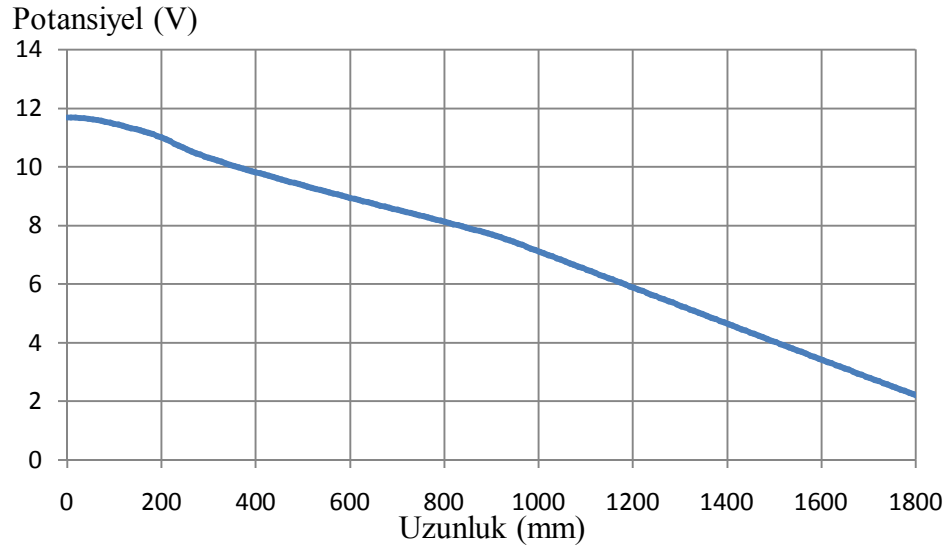
Şekil 6.50 : Tren var 1500 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı.

Tren olduğu durumda 1800 volt bara gerilimi için, çevredeki potansiyel dağılımı Şekil 6.51’de gösterilmiştir.

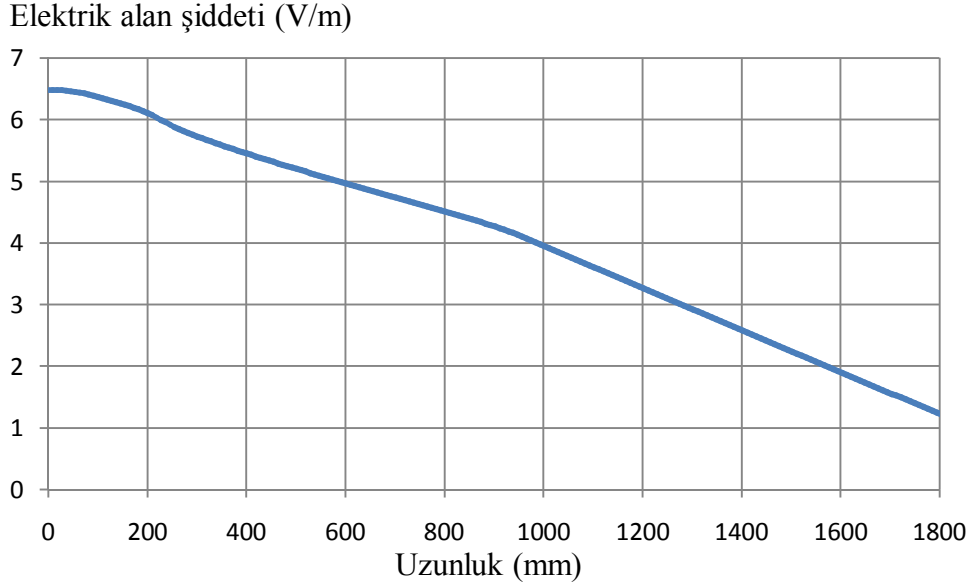


Şekil 6.51 : 1800 V için tren olduğu durumda potansiyel dağılımı.

Yolcunun baş bölgesindeki elektrik alan şiddeti 6 V/m ile 47 V/m değeri arasındadır. 1800 volt için baştan ayağa doğru; potansiyelin değişimi Şekil 6.52’de, elektrik alan şiddetinin değişimiye Şekil 6.53’te gösterilmiştir.

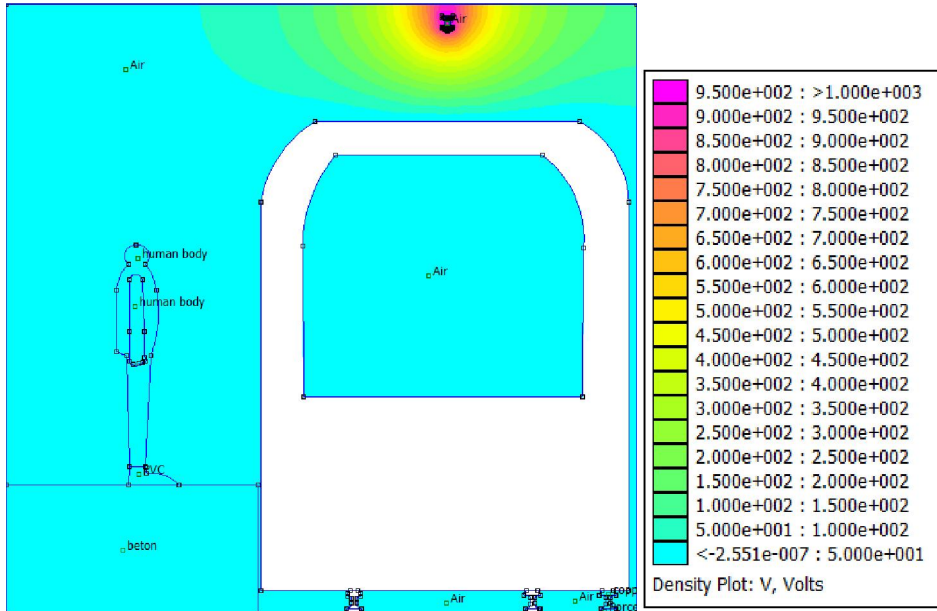


Şekil 6.52 : Tren var 1800 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı.



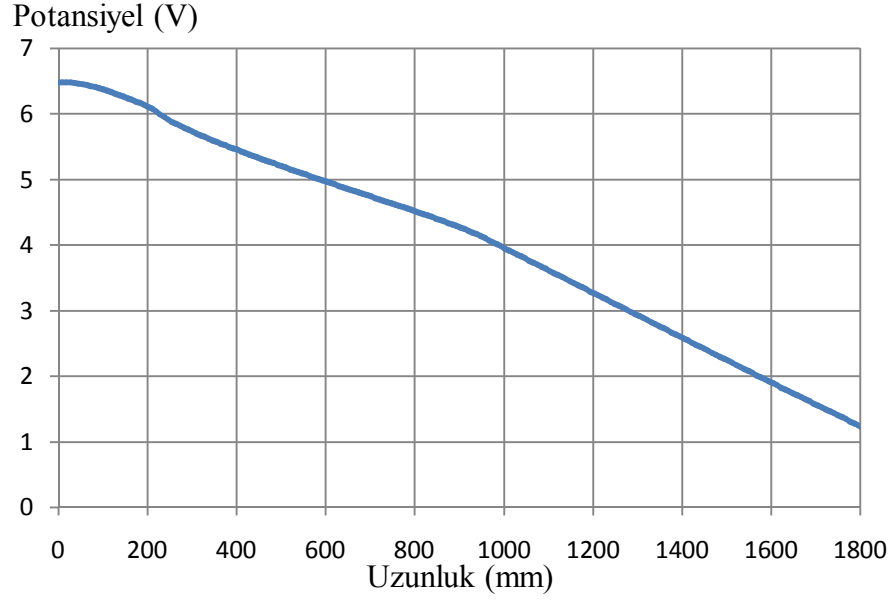
Şekil 6.53 : Tren var 1800 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı.

Tren olduğu durumda 1000 volt bara gerilimi için, çevredeki potansiyel dağılımı Şekil 6.54’de gösterilmiştir.

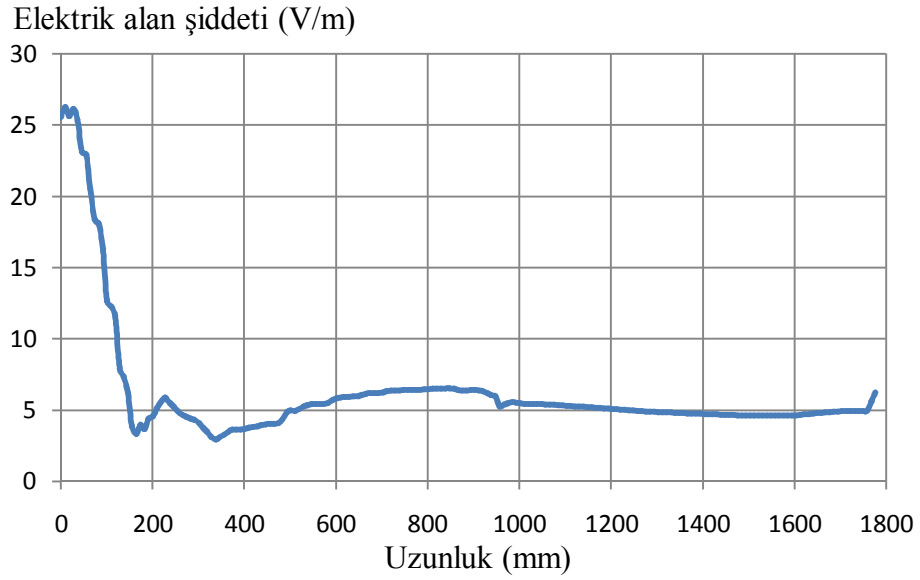


Şekil 6.54 : 1000 V için tren olduğu durumda potansiyel dağılımı.

Yolcunun baş bölgesindeki elektrik alan şiddeti 3,3 V/m ile 26,2 V/m değeridir. 1000 volt için baştan ayağa doğru; potansiyelin değişimi Şekil 6.55’de, elektrik alan şiddetinin değişimi Şekil 6.56’te gösterilmiştir.



Şekil 6.55 : Tren var 1000 V için baştan ayağa potansiyel dağılımı.



Şekil 6.56 : Tren var 1000 V için baştan ayağa elektrik alan şiddeti dağılımı.

Çizelge 6.13'te trenin olduğu durumda; baradaki 1000, 1500, 1800 volt gerilim değerleri için baş ve gövde bölgelerinde vücuda etkiyen elektrik alan şiddeti değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.13 : Tren varken vücuda etki eden elektrik alan şiddetleri.

Gerilim Değerleri	1000 V	1500 V	1800 V
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Baş bölgesi)	3,3-26,2 V/m	5,51-39,4 V/m	6-47 V/m
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Gövde)	2,91-6,53 V/m	4,38-9,8 V/m	5,24-11,56 V/m

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada raylı sistem elektrifikasyonunda kullanılan yöntemlerden rijit katener sistemi araştırılarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemiyle DC gerilimle çalışan bir raylı sistemin insan sağlığına etkisi araştırılmıştır. Tren varken ve yokkenki durumda yolcunun maruz kaldığı elektrik ve manyetik alan büyüklükleri belirlenmiştir. DC gerilimle ve akımla çalışan bir demiryolu sistemi ele alınmıştır. Modern elektrik güç sistemleri daha çok alternatif akımı kullanmaktadır. Bu sistemlerin frekansı birçok ülkede farklılık göstermesine rağmen genellikle 50 ya da 60 Hz'dir. Bu tür frekanslar aşırı düşük frekanslar olarak ifade edilirler (İngilizce kısaltması ELF). Günlük yaşamda kullandığımız çoğu ev aracı 60 Hz frekansında ciddi elektrik ve manyetik alan değerleri oluşturmaktadır [15]. Doğru akım kaynaklarından yayılan alanların frekansı ise 0 Hz'dir ve bunlar statik alanlar olarak ifade edilirler.

7.1 Statik Alanlar

Sürekli olarak doğal veya yapay kaynaklı elektrik ve manyetik alanların etkisinde yaşamaktayız. Gökyüzünde oluşan şimşek ve yıldırım doğal elektrik alanı etkisiyle; aydınlatma için kullanılan lambalar ise yapay elektrik alan sebebiyle oluşmaktadır.

Çizelge 7.1 : Yapay kaynaklı örnek statik elektrik alan değeri [18].

500 kV DC iletim hattı çevresi	17-30 kV/m
--------------------------------	------------

Çizelge 7.2 : Bazı statik manyetik alan değerleri [18].

MRI cihazları	15-40 milyon mG, (1,5-4 Tesla)
Dünyanın doğal alanı	300-700 mG (30-70 Mikrotelsa)

Tablo incelendiğinde doğal kaynaklı manyetik alanların, yapay kaynaklı olanlara göre daha az etki yaptığı görülebilir. Bu nedenle yapılan bilimsel çalışmalar genellikle yapay kaynaklı statik manyetik alanların insan sağlığına etkisi üzerinedir. Statik elektrik alanlar, canlı dokularına giremezler. Yalnızca canlı yüzeyinde statik

bir yük oluştururlar. Doğal kaynaklı manyetik alanlar, DC manyetik alan üretir ve bu alanlar da canlı üzerinde akım oluştururlar. Akımın yükselmesi manyetik alanı arttırır. Elektrik alanda olduğu gibi manyetik alanda da kaynaktan uzaklaşmak, alan etkisini azaltır. Manyetik alan elektrik alanda olduğu gibi basit yalıtkan cisimlerle engellenemez. Bu sebeple manyetik alandan korunma elektrik alana göre daha zordur.

7.2 İyonlaştırıcı Olmayan Elektromanyetik Alanlar

İyonlaştırıcı özellikte olmayan elektromanyetik alanlar, atomik bağları kırmak için yeterli enerjiye sahip değillerdir. Frekansın 0 Hz olduğu statik alanlar iyonlaştırıcı olmayan özelliktedirler. Böylece iyonlaştırıcı özellikte olan elektromanyetik alanlara göre daha az zararlıdır. MRI cihazlarında olduğu gibi bu alanların kısa süreli ve yüksek dozda maruz kalma durumlarında sağlık için zararlı olduklarına dair çalışmalar bulunmaktadır. Uzun süreli düşük dozda maruz kalma durumunda ise sağlık durumu açısından, net bulgular elde edilememiştir ve çalışmalar devam etmektedir. Canlıların düşük dozda olsa dahi uzun süreli elektromanyetik alana maruz kalmalarıyla kanser, alzheimer gibi hastalıklara yakalanma riski arasında ciddi kuşkular vardır [16]. Düşük frekanslı elektromanyetik alanların neden olduğu dokulardaki güç soğurması ihmal edilebilecek kadar azdır ve böylece vücut sıcaklığında kayda değer bir artış yaratmazlar.

7.3 Değerlendirme

Çalışanlar için ICNIRP'nin kabul ettiği referans değerleri Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3 : Frekansa göre ICNIRP'nin kabul ettiği referans değerler [17].

Mesleki Maruziyet Frekansı	Elektrik Alan Şiddeti (V/m)	Manyetik Alan Şiddeti (A/m)	Manyetik Akı Yoğunluğu (μT)
0-1 Hz	-	$1,63 \times 10^5$	2×10^5

AB konseyinin, statik alanlar için 12 Temmuz 1999 tarihli AB Konsey tavsiyesi ise Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4 : Statik alanlar için AB Konsey Tavsiyesi (1999/519/EC) [16].

Frekans (Hz)	E-alan şiddeti (V/m)	H-alan şiddeti (A/m)	B-manyetik akı yoğunluğu (μT)
0-1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	4×10^4

Yapılan çalışmada akım sürekli olarak değiştiği için manyetik analizde akımın bir dakikalık etkin değerlerine göre değerlendirme yapılmıştır. Benzetimler sonucu oluşan tablo incelendiğinde, tren varkenki durumda; vücudun katener hattına en yakın bölgesi olan baş bölgesindeki akı yoğunlukları ve alan şiddetleri, tren yokkenki duruma göre daha da artmıştır. Katener hattından uzaklaşıldığında, vücudun en uzak noktası olan ayağa doğru inildiğindeyse; tren varken, tren yokkenki duruma göre manyetik akı yoğunlukları ve manyetik alan şiddetleri azalmıştır. Bunun nedeni olarak gelen trenin manyetik güçlendirme yaparak akı yolu bakımından trenin üst bölgesinde daha yoğun bir etki oluşturmuştur ve böylece vücuda girebilecek manyetik alan etkisini katenere en uzak noktada biraz azaltmıştır. Güçlü bir ferromanyetik malzeme olan demir tren gövdesi de aynı şekilde trenin üst bölgesinde oluşan yoğun manyetik alanı güçlendirerek baş bölgesindeki akı yoğunluğunu ve manyetik alan şiddetini arttırmıştır. Etkin akım değerine göre tren yokken 362 μT, varken ise 497 μT değerleri baş çevresinde görülmüştür. Bu değerler tablolar eşliğinde yorumlandığında, ICNIRP'nin belirlediği statik manyetik alan referans değerlerin ve AB konseyinin tavsiye ettiği referans değerlerin, oldukça altında olduğu görülmektedir. St Petersburg metrosunda yapılan bir çalışmada görülen tepeden tepeye akıma göre maksimum değer 450 μT, tren çevresindeki platformda 50-325 μT arasında görülmüştür [21]. St Petersburg metrosu 825 V DC sistemle elektrikleştirilmiştir. 750 V DC ile elektrikleştirilmiş St Petersburg tramvayında yolcu platformunda maksimum akımlarla yapılan ölçümlerde ise 500-1000 μT arası değerler ölçülmüştür [21]. Bu çalışmada maksimum akımlara göre yapılan benzetimlerde ise tren varken baş bölgesinde 529-1024 μT, tren yokken baş bölgesinde 388-743 μT değerleri arasında görülmüştür. Bu tezdeki araştırmada, dünyanın statik manyetik alanı, trende bulunan akım çeken çeşitli birimlerin yarattığı manyetik alan, göz önünde bulundurulmamıştır.

Yapılmış olan ölçümlerle tezde bulunanlar arasındaki farklılık bu sebepten kaynaklanmaktadır. Çizelge 7.5'te etkin değerlere göre vücuda etki eden manyetik büyüklüklerin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 7.5 : Manyetik büyüklüklerin karşılaştırılması.

Amper (RMS)	Manyetik akı yoğunluğu kafada	Manyetik akı yoğunluğu ayakta	Manyetik alan şiddeti kafada	Manyetik alan şiddeti ayakta
Tren yokken 1980 A	362,7 μ T	155,42 μ T	288,633 A/m	123,681 A/m
Tren varken 1980 A	497,2 μ T	143,6 μ T	395,671 A/m	114,277 A/m
Tren yokken 68 A	0,204 μ T	0,151 μ T	16,3024 A/m	11,9774 A/m
Tren varken 68 A	0,174 μ T	4,9 μ T	13,8917 A/m	3,9257 A/m

Uluslararası iyonize olmaya radyasyon koruma komitesi (ICNIRP) statik manyetik alanlar için manyetik akı yoğunluğu sınır değerlerini özel bir iş için maruz kalınmasında; baş bölgesi için üç saniyeye kadar manyetik akı yoğunluğu değişiminde 2 T, kol ve bacaklar içinse 8 T'ye kadar kabul edilebilir olarak belirlemiştir [20]. Statik alanların doğrudan etkileri incelendiğinde genel kamu sağlığı için vücudun hiçbir bölgesinde 400 mT değerinin aşılması önerilmiştir [19]. Dolaylı etkiler dikkate alındığıdaysa; örneğin, vücudunda elektronik cihaz (kalp pili, beyin pili, kulak içi aparat vb.) taşıyan insanlar için önerilen limit değer 0,5 mT = 500 μ T'dır. Bu sebeple DC demiryolu sistemlerinde kritik değere yaklaşıldığı görülmektedir. Bu nedenle bu tip cihazları taşıyan kimseler de düşünülerek, alan ölçümleri titizlikle yapılmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.

Çizelge 7.6 : Elektriksel büyüklüklerin karşılaştırılması.

Gerilim Değerleri	1000 V	1500 V	1800 V
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Baş bölgesi) Tren Varken	3,3-26,2 V/m	5,51-39,4 V/m	6-47 V/m
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Baş bölgesi) Tren Yokken	63-311,9 V/m	96,74-468,2 V/m	113,6-562,2 V/m
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Gövde) Tren Varken	2,91-6,53 V/m	4,38-9,8 V/m	5,24-11,56 V/m
Vücuda etki eden elektrik alan şiddeti (Gövde) Tren Yokken	44,7-156,3 V/m	67-234,5 V/m	80,7-282 V/m

Elektrik alan açısından incelendiğinde ise 1500 V işletme gerilimi için standartlara göre izin verilen en yüksek ve en düşük sürekli gerilimler kullanılarak analizler yapılmıştır. Tren olduğu durumda yolcunun baş ve gövde kısımlarının her ikisinde de elektrik alan şiddetleri, trenin olmadığı duruma göre azalmıştır. Trenin yaptığı perdeleme elektrik alanın düşmesine neden olmuştur. Trenin içerisinde ise demir gövdeden dolayı elektrik alan etkisi görülmemektedir. DC gerilimin oluşturduğu elektrik alanlar incelendiğinde tren olmadığı durumda 44,7 V/m ile 562,2 V/m arasında; tren olduğu durumda 2,91 V/m ile 47 V/m arasında değerler görülmüştür. ICNIRP'nin statik elektrik alanlarla ilgili bir üst sınır değeri bulunmamaktadır. Bu nedenle oluşan bu statik alan değerleri insan sağlığı açısından ciddi bir risk doğurmayacaktır. Elektromanyetik dalgalarda frekans yükseldikçe tehlike artmaktadır.

DC sistemlerin insan sağlığına uzun zamanlı etkilerinin belirlenebilmesi için daha fazla çalışma yapılmalıdır. Havai hat DC besleme kullanan metro sistemlerinin her gün altından binlerce insan geçmektedir.

Buralarda ölçümler, modellemeler ve hesaplamalar yapılarak havai katenerin insan sağlığına etkisi manyetik alan açısından araştırılmalıdır. Bakım ve işletmede çalışan teknik personel iyi eğitilmelidir. Personelin maruz kaldığı değerler belirlenmeli ve standartlardan fazlaysa gerekli manyetik ekranlama oluşturulmalıdır. Manyetik ekranlama boya, kumaş ya da çeşitli malzemelerin kullanılmasıyla gerekli görünen yerlere ya da kimselere uygulanabilmektedir. Büyüyen ve gelişen dünyamızda teknolojiyle aynı hızda bir sağlık bilinci geliştirilmeli ve etkin bir korunma düzeyi oluşturulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Frey, S.** (2012). 1st Edition, by White Word Publications, Railway Electrification Systems&Engineering.
- [2] **Url-1**<<http://tr.wikipedia.org/wiki/TGV>>, son erişim tarihi:31.01.2015.
- [3] **Url-2** <<http://toplutasima.org/viewtopic.php?t=133&start=20&sid=03b9027>>, son erişim 31.01.2015.
- [4] **Oura, Y. , Mochinaga, Y. , Nagasawa, H. edited by Kanji Wako.**(1998). Railway Technology Today 3 Railway Electric Power Feeding Systems.
- [5] **Bonnett, C.F.** (2005). Practical Railway Engineering, 2nd Ed. London, Imperial College Press.
- [6] **Bellek, M.** (2012). Demiryolu Katener Sistemlerinde Kullanılan Enerji Kablolarının Çeşitleri ve Özellikleri, İTÜ.
- [7] **MEGEP RAYLI SİSTEMLER TEKNOLOJİSİ** (2013). Raylı Sistem Araçlarına Elektrik Enerjisinin Aktarılması.
- [8] **MEGEP RAYLI SİSTEMLER TEKNOLOJİSİ** (2011). Üçüncü Ray.
- [9] **Sina,C.** (2011). İstanbul Ulaşım A.Ş Kadıköy Kartal Hattı Sunumu .
- [10] **İstanbul Ulaşım A.Ş.** (2011). Kadıköy Kartal Metro Hattında Katener İletken Ray.
- [11] **Url-3**<<http://www.biymed.com/femmu/analiz/fem/seynedir.htm>>,son erişim tarihi:31.01.2015.
- [12] **Baltzis K. B.** (2008). The FEMM Package, A simple, fast and accurate open source electromagnetic tool in science and engineering.
- [13] **Url-4**<http://aluminiumwirerod.com/aluminium-and-alloy-rod-for-mechanical-applications.htm#Aluminium_alloy_rod_EN_AW_6101>, Aluminium Wire Rods EN AW 6101 Chemical Composition son erişim:31.12.2014.
- [14] **Collins, C. ,Yang, B. ,Yang, Q. ve Smith, M.** (2002). Numerical Calculations of the static magnetic field in three dimensional multi-tissue models of the human head.
- [15] **Url-5**<<http://www.biltek.tubitak.gov.tr/sandik/gsm.pdf>> (2011). TMMOB, EMO İzmir Şubesi, Elektromanyetik alanların etkileri,son erişim:05.03.2015.
- [16] **Uçar, N.** (2009). Avrupa ülkelerinde elektromanyetik alanlarla ilgili mevzuatlar ve uygulamalar raporu.
- [17] **Güner, R.** (2014). Elektromanyetik alanların çalışanların sağlık ve güvenliğine etkisi ve alınacak tedbirler.
- [18] **ATCO Electric** (2010). HVDC Project, Facts about direct current electric and magnetic fields.

- [19] **ICNRP** (2009). On the guidelines on limits of exposure to static magnetic fields.
- [20] **ICNRP** (2014). Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz.
- [21] **Ptitsyena, N., Ponzetto A.** (2011). Magnetic Fields Encountered in Electric Transport: Rail Systems, Trolleybus and Cars.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Salih SARISAKAL

Doğum Yeri ve Tarihi : Samsun, 18.05.1987

E-Posta : sarisakals@itu.edu.tr, sarisakalsalih@hotmail.com

Öğrenim Durumu:

- **Lisans** : 2012, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği (2010-2011) öğretim yılı, Università di Bologna (Erasmus programıyla)

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

2012 Zorlu Center Projesi, Sahne Kısmı Yapımı, Elektrik-Elektronik Mühendisi