



**ELEKTRİK İLETİM HATTI VE YER ALTI BORU HATLARI
ARASINDAKİ ELEKTRİKSEL GİRİŞİMİN CDGES KULLANILARAK
ANALİZİ**

Özgür ÇETİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Özgür ÇETİN

26 /01 /2023

ELEKTRİK İLETİM HATTI VE YER ALTI BORU HATLARI ARASINDAKİ ELEKTRİKSEL GİRİŞİMİN CDEGS KULLANILARAK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Özgür ÇETİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Sanayinin gelişimi ve hızla ilerlemesi, hem gelişmiş ve hem de gelişmekte olan ülkeler için alt yapı çalışmaları önem arz etmektedir. Bu alt yapı çalışmalarının başlıcaları Elektrik İletim Hatları, Petrol/Doğal Gaz boru hatları ve Demir yollarıdır. Birçok ülkede ve Türkiye’de gerek coğrafi koşullardan, gerekse kamulaştırma sorunları ve ekonomik nedenlerden Elektrik İletim Hatları, Petrol/Doğal gaz boru hatları ve Demir yolları çoğu zaman aynı coğrafi koridoru kullanmaktadır. Bu durumun birçok avantaj ile birlikte bir takım dezavantajlara da sebep olmaktadır. Bu dezavantajlardan en önemlilerden birisi elektromanyetik girişimlerdir. Bu tez çalışmasında Ağrı-Horasan arasında tesis edilmiş doğal gaz boru hattı ile aynı hatta paralel olan 400 kV ve 154 kV Elektrik İletim Hattı arasındaki elektromanyetik girişim analiz edilmesi ve azaltılmasına yönelik önlemler de bulunmuştur. Elektromanyetik etkileşimleri modellemek ve analizi için CDEGS bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Yapılan benzetimlerde öncelikle kararlı durumdaki etkileşimler ve daha sonra 400 kV Elektrik İletim hattında 3 faz kısa devre olması durumunda elektromanyetik girişimler analiz edilerek değerlendirilmesi ve azaltılması yönelik önlemlerde bulunulmuştur.

Bilim Kodu : 90545
Anahtar Kelimeler : Elektromanyetik girişim, elektrik iletim hatları, metal boru hatları, kısa devre, CDEGS
Sayfa Adedi : 83
Danışman : Prof. Dr. M. Cengiz. TAPLAMACIOĞLU

ANALYSIS OF ELECTRICAL INTERFERENCE BETWEEN ELECTRIC
TRANSMISSION AND UNDERGROUND PIPELINES USING CDEGS

(M. Sc. Thesis)

Özgür ÇETİN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

The development and rapid progress of the industry and infrastructure studies are important for both developed and developing countries. Main of these infrastructure works are Electricity Transmission Lines, Oil/Natural Gas pipelines and Railways. In many countries and Turkey, due to geographical conditions, expropriation problems and economic reasons, Electricity Transmission Lines, Oil/Natural Gas Pipelines and Railways often use the same geographical corridor. Along with many advantages, this situation also causes some disadvantages. One of the most important of these disadvantages is electromagnetic interference. In this thesis, measures for the analysis and reduction of electromagnetic interference between the natural gas pipeline established between Ağrı and Horasan and the 400 kV and 154 kV Electricity Transmission Line parallel to the same line were also found. CDEGS computer software was used to model and analyze electromagnetic interactions. In the simulations, firstly steady state interactions and then in case of 3-phase short circuit in 400 kV Electric Transmission line, electromagnetic interferences were analyzed and measures were taken to evaluate and reduce them.

Science Code : 90545

Key Words : Electromagnetic interference, power transmission lines, metal pipelines, short circuit, CDEGS.

Page Number : 83

Supervisor : Prof. Dr. M. Cengiz. TAPLAMACIOĞLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışması süreci boyunca tez çalışmasının danışmanlığını yürüten hocam Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU ile çalışmalarına destek veren Dr. Öğretim Üyesi Hıdır DÜZKAYA'ya teşekkür ederim. Ayrıca, rahmetli matematik öğretmeni babam Mehmet ÇETİN ve yine matematik öğretmeni annem Yeter ÇETİN olmak üzere ilkokuldan yüksek lisans kadar süren eğitim hayatımda desteklerini esirgemeyen öğretmenlerim ile tez sürecinde desteğini eksik etmeyen eşim Aslı Serinken ÇETİN ile kız kardeşim Özge Çetin MAILLIS'ye ve çalışmama izin verdiği için ikizlerim Mehmet Edip ile Aslı Ece'ye teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
HARİTALARIN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. AC GİRİŞİMLER	5
2.1. Kapasitif Etki.....	5
2.2. İndüktif Etki	6
2.3. Kondaktif Etki	9
2.3.1 Elektriksel ark	14
2.3.2. Yıldırım	14
3. KOROZYON VE KATOTİK KORUMA	15
3.1. Korozyon.....	15
3.1.1. Nernst çizelgesi	18
3.1.2. Korozyona etki eden değişkenler	20
3.1.3. Korozyon zararları	23
3.2. Katodik Koruma	25
3.2.1. Galvanik anotlu katodik koruma.....	26

	Sayfa
3.2.2. Dış akım kaynaklı katodik koruma	27
3.2.3. T/R ünitesi	29
3.2.4. Akım ölçüm hücresi.....	30
4. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM HESAPLAMA METODLARI	33
4.1. Güvenli Gerilim Sınır Değerleri.....	38
4.2. EİH'nin Boru Hattına Elektriksel Etki Mesafeleri.....	38
4.3. EİH'nin Boru Hattına Yaklaşım Sınır Mesafeleri.....	39
5. MODELLEME VE BENZETİM SONUCU.....	41
5.1. 400 kV ve 154 kV EİH'nde Normal İşletme Durumu	42
5.2. Kısa Devre Arızasında 400 kV EİH Direk Toprak Direncinin Değişimi	44
5.3. Kısa Devre Arızasında Toprak Özdirencinin Değişimi	50
5.4. Kısa Devre Arızasında 37. km'de Bakır Kablo ve Bakır Ağ Kullanımı	53
5.5. Kısa devre Arızasında Çelik Toprak Koruma Yerine Alüminyum Toprak Koruma İletkeni Kullanımı	56
5.6. Katodik Korumasız İşletme Koşullarında Boru Hattında Oluşan Elektromanyetik Girişimler.....	64
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	77
ÖZ GEÇMİŞ	83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Nernst çizelgesi.....	19
Çizelge 3.2. Zemin öz direncine göre zeminlerin korozyonluk dereceleri	22
Çizelge 4.1. Pheasant iletken özellikleri	36
Çizelge 5.1. İşletme durumunda 1 cm ² kesit akımı ve dokunma gerilimi	42
Çizelge 5.2. Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre dokunma gerilimi	45
Çizelge 5.3. Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre adım gerilimi	47
Çizelge 5.4. Kısa devre arızasında toprak öz direncinin değişimine göre dokunma gerilimi.....	50
Çizelge 5.5. Kısa devre arızasında toprak öz direncinin değişimine göre adım gerilimi değişimi	51
Çizelge 5.6. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ile bakır ağ kullanımına göre adım gerilimi	53
Çizelge 5.7. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ile bakır ağ kullanımına göre dokunma gerilimi	54
Çizelge 5.8. Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre dokunma gerilimi değişimi	56
Çizelge 5.9. Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre adım gerilimi değişimi	59
Çizelge 5.10. Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre boru hattı kaplama gerilimi	61
Çizelge 5.11. Katodik korumasız işletme durumunda 1 cm ² kesit akımı ve dokunma gerilimi.....	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Tek ve çift devre EİH direk resmi	7
Şekil 3.1. Kuru pil	18
Şekil 3.2. Boru-toprak potansiyeli ölçümü	20
Şekil 3.3. Metal boru hatları arıza nedenleri 1 Ocak 2010-4 Kasım 2016.....	24
Şekil 3.4. Galvanik anotlu katodik koruma	27
Şekil 3.5. Dış akım kaynaklı katodik koruma.....	28
Şekil 3.6. Akım ölçüm hücresi.....	30
Şekil 4.1. 400 kV ve 154 kV EİH ile doğalgaz boru hattı ROWCAD güzergâhı.....	37
Şekil 5.1. Normal işletme koşulunda 1 cm ² kesit akım yoğunluğu	43
Şekil 5.2. Normal işletme koşulunda dokunma gerilimi.....	44
Şekil 5.3. Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre dokunma gerilimi değişimi	49
Şekil 5.4. Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre adım gerilimi değişimi	49
Şekil 5.5. Kısa devre arızasında toprak öz direnci değişimine göre dokunma gerilimi değişimi	52
Şekil 5.6. Kısa devre arızasında toprak öz direnci değişimine göre adım gerilimi değişimi	52
Şekil 5.7. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ve bakır ağ kullanımında adım gerilimi değişimi.....	55
Şekil 5.8. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ve bakır ağ kullanımında dokunma gerilimi değişimi.....	55
Şekil 5.9. Kısa devre arızasında 96 mm ² çelik toprak koruma telli dokunma gerilimi	57
Şekil 5.10. Kısa devre arızasında 93 mm ² alüminyum toprak koruma telli dokunma gerilimi	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. Kısa devre arızasında 200 mm ² alüminyum toprak koruma telli dokunma gerilimi	58
Şekil 5.12. Kısa devre arızasında 96 mm ² çelik toprak koruma telli adım gerilimi	60
Şekil 5.13. Kısa devre arızasında 93 mm ² alüminyum toprak koruma telli adım gerilimi	60
Şekil 5.14. Kısa devre arızasında 200 mm ² alüminyum toprak koruma telli adım gerilimi	61
Şekil 5.15. Kısa devre arızasında 96 mm ² çelik toprak koruma telli kaplama stres gerilimi	62
Şekil 5.16. Kısa devre arızasında 93 mm ² alüminyum toprak koruma telli kaplama stres gerilimi	63
Şekil 5.17. Kısa devre arızasında 200 mm ² alüminyum toprak koruma telli kaplama stres gerilimi	63
Şekil 5.18. Normal işletme durumunda katodik korumasız 1 cm ² kesit akım yoğunluğu.....	65
Şekil 5.19. Normal işletme durumunda katodik korumasız dokunma gerilimi	65

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Korozyonlu demir köşebent.....	17

HARİTALARIN LİSTESİ

Harita	Sayfa
Harita 4.1. 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH ve BOTAŞ boru hattı	36
Harita 4.2. 400 kV Erzurum III (Horasan) -Ağrı EİH ve BOTAŞ boru hattının kritik kesişim bölgesi	37

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
Al	Alüminyum
A/m ²	Amper/metre kare
cm	Santimetre
cm ²	Santimetre kare
Cu/CuSO ₄	Bakır/Bakır sülfat
Fe	Demir
Hg ₂ Cl ₂	Kalomel
hz	Hertz
kA	Kilo Amper
km	Kilometre
kV	Kilo Volt
m	Metre
mA	Mili Amper
m ²	Metrekare
mm ²	Milimetre kare
mol/l	Molar
pH	Potansiyel Hidrojen
V	Volt
Zn	Çinko
Ω.cm	Ohm.santimetre
Ω.m	Ohm.metre
Ω.m ²	Ohm.metrekare

Kısaltmalar**Açıklamalar****AC**

Alternatif akım

ACSR

Aluminum conductor steel reinforced

BOTAŞ

Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi

CDEGSCurrent distribution, electromagnetic fields,
grounding and soil structure analysis**CONIND**

Conduction and induction

DC

Doğru akım

DIN

Alman standardizasyon enstitüsü

EİH

Elektrik İletim Hattı

EMTP

Elektromagnetic transient program

GSMH

Gayrisafi millî hâsıla

HIFREQ

Electromagnetic fields analysis

MCMMega circular miles (1 MCM = 0,5067 mm²)**PHMSA**Pipeline and Hazardous Materials Safety
Administration**PSCAD**

Power systems computer aided design

ROW

Right of way

ROWCAD

Right of way computer aided design

T/R

Transformatör/Redresör

1. GİRİŞ

Her geçen gün sanayi ve üretim yatırımları artan ülkemizde; elektrik, doğal gaz, petrol boru hatları, metal su boru hatları ve tren yolları gibi alt yapı çalışmaları hızla devam etmekte ve artmaktadır. Özellikle birbirine yakın olan durumlarda, metal boru hatları ve tren yolları ile elektrik iletim ve/veya dağıtım hatları arasında elektriksel girişimler oluşmaktadır. Söz konusu elektriksel etkilerden birisi metal boru hatlarında korozyona sebep olabilmesidir. Bazen bu etki metal borunun delinmesine kadar varıp, canlılara zarar vermesi yanında çevre problemlerine ve ciddi ekonomik zararlara neden olabilmektedir (Cigre, 1995).

Ülkemizin kuzeyi ve güneyi denize paralel sıra dağlarla, batısı denize dik dağlarla çevrili olup önemli bir kısmında engebeli coğrafi yapısı mevcuttur. Engelibeli arazilerin dışındaki ova ve plato gibi araziler mesken yapılaşması, sanayi tesisleri veya tarım arazisi olarak kullanılmaktadır. Coğrafi arazi koşulları nedeniyle şehirlerarası yapılan enerji, su, doğal gaz, petrol boru hattı ve tren yolları vb. yatırım ve alt yapılar aynı koridoru kullanmak zorunda kalmaktadırlar. Bazı bölgelerde arazi koşulları uygun olsa bile, kamulaştırma maliyetlerinin yüksek olması da aynı güzergâhın kullanımına sebep olmaktadır. Ülkemizde gerek arazi koşulları ve gerekse ekonomik nedenler Elektrik İletim Hattı (EİH) ile boru hatları sık sık karşılaştırmaktadır.

Günümüzde metal boru hatları su, doğal gaz, petrol ve farklı sıvıları taşımak için kullanılmaktadır. Genellikle yer altına yaklaşık 1-1,5 m derinliğe tesis edilmekte, ancak yer üstüne tesis edilen uygulamalar da bulunmaktadır. Yer altına tesis edilen metal boru hatları korozyondan korunmak için dış kısmı yalıtkan malzeme ile kaplanmakta ve katodik koruma uygulaması yapılmaktadır. Katodik korumada amaç boru hattındaki elektron kaybını önleyip zamanla boru hattının metal et kalınlığının azalması ve delinmesini engellemektir. Bu sayede metal boru hatlarının kullanım ömürlerini artırıp daha ekonomik metal boru hatları tesis edilmektedir (İsmail, Hasibuan, Isa, Abdurrahman ve Islami, 2019).

Boru hattı kaplaması korozyonu engellemek için yeterli bir önlem gibi görünse de, tesis aşamasında kaplama zarar görebilmekte ve kaplama üstünde çizik veya deformasyonlar oluşabilmektedir. Tesis aşamasında kaplamada herhangi bir deformasyon olmadığını kabul etsek bile, boru hattı yakınında tesis edilmiş EİH, boru hattı kaplama stres gerilimi oluşturup,

kaplamanın deformasyonuna neden olabilmektedir. Boru hattı kaplamasında oluşan çatlak ve deformasyonlar uygun bir ortamda kısa sürede paslanmaya ve pullanıp boru hattı et kalınlığında azalmaya neden olmaktadır. Ortamdaki nem, toprağın asitlik değeri, oksijen miktarı, toprak öz direnci değeri, EİH ile paralel ve/veya yakın ve kesişim olması vb. etkenler söz konusu deformasyonun hızını etkilemektedir.

EİH ile yer altı metal boru hattı arasında oluşan elektriksel girişimler günümüzde farklı açılardan incelenmekte ve boru hattını korumak için farklı yöntemler önerilmektedir (Tao, Suna, Tao, Y., Yunfei ve Xinliang, 2018; Çetin, Düzkaya, ve Taplamacıoğlu, 2021, 2022). Tez çalışmasında “Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis” (CDEGS) bilgisayar programı kullanarak Ağrı-Horasan arasında tesis edilmiş Boru Hatları ile Petrol Taşıma Anonim Şirketi (BOTAŞ) doğal gaz boru hattı ile EİH’leri arasında; üç faz toprak kısa devre arızası sırasında oluşan girişim etkilerini azaltmaya yönelik benzetimler yapılmıştır.

Tez çalışmasında kullanılan CDEGS bilgisayar programı; detaylı benzetim yapabilme kabiliyetine sahip, gerçeğe yakın sonuç verdiği literatürde yer almış ve birçok makalede kullanılan bir programdır (Qi, Yuan, Li ve Cui, 2013; El Gayar ve Abdul-Malek, 2016). Boru hattı tesis aşamasından önce CDEGS veya muadil bilgisayar programları ile yapılacak benzetim çalışmaları sayesinde önceden gerekli önlemler alınarak, boru hattında korozyon kaynaklı arızalar engellenebilmektedir. Metal boru hattının tesis aşamasında uygulanan önlemler, tesis yapıldıktan sonra uygulanacak önlemlere göre daha az kazı ve inşaat işi gerektirecektir.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde EİH ile Boru Hattı arasında oluşan Kapasitif, İndüktif ve Kondaktif girişim akım ve gerilim değerlerine etki eden faktörler ile bu etkilerin zararları incelenmektedir. Tezin üçüncü bölümde korozyonun nasıl ve neden oluştuğu, zararları, katodik korumanın faydaları ve farklı katodik koruma uygulamaları açıklanmaktadır. Tezin dördüncü bölümde CDEGS bilgisayar programının girişim akım ve gerilimi hesap yöntemi ve kullandığı matematiksel formüller açıklanmıştır. Tezin beşinci bölümde 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı ve 154 kV Horasan-Ağrı EİH ile paralel güzergâhı kullanan Ağrı-Horasan doğal gaz boru hattı üç faz kısa devre arızasını CDEGS bilgisayar programı kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları incelenmiştir. Bu bölümde ilk olarak işletme durumunda oluşan elektromanyetik girişimler incelenmekte, işletme durumunda güvenlik

sınırları içinde (dokunma gerilimi 15 V ve 1 cm² kesit akım yoğunluğu 30 mA/m² sınırının altında (BOTAŞ, 2021)) kaldığı benzetim sonucuna göre tespit edilmektedir. Müteakiben 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı E.İ.H'tinde oluşacak üç faz kısa devre arızasında boru hattında meydana gelen elektromanyetik girişim gerilimlerinden dokunma ve adım gerilim seviyelerinin; toprak öz direnci, direk toprak geçiş direnci ve EİH koruma iletkeninin değiştirilmesi durumlarının etkileri benzetim çalışmaları ile araştırılmaktadır. Ayrıca bu bölümde dokunma ve adım gerilimlerini azaltmak amacıyla kritik olan geçiş yerinde farklı yöntemler denenmiştir. Bakır kablo kullanması durumunda dokunma gerilimi %20, bakır ağ kullanılması durumunda ise %48 gerilim seviyesinde azalmaların olduğu belirlenmiştir. Tezin altıncı ve son bölümü ise yapılan çalışmaların sonuçlarının değerlendirilmesi ve ileriye dönük yapılabilecek çalışmalar önerilmiştir.

2. AC GİRİŞİMLER

EİH ve elektrikli tren hatları ile aynı güzergâhı kullanan metal boru hatları arasında elektriksel girişimler oluşmaktadır. AC girişimlerin Kapasitif, İndüktif ve Kondaktif etkileri bulunmaktadır. Metal boru hattı yer üstünde ve elektriksel olarak topraktan izole olarak tesis edildiği durumlarda; EİH ile paralel ve/veya kesişim geçişleri olan boru hattı üstünde ağırlıklı olarak kapasitif girişim gerilimi oluşmaktadır. İndüktif etki ise yer altına tesis edilmiş boru hattı ile EİH arasında normal işletme durumunda oluşmaktadır. Kondaktif etki, EİH’ndeki kısa devre, elektrik arkı, yıldırım ve anahtarlama arızalarında ortaya çıkmaktadır.

2.1. Kapasitif Etki

Kapasitif etki yer üstüne tesis edilmiş ve topraktan elektriksel olarak yalıtılmış metal boru hattı ile EİH arasında oluşmaktadır. Yer altına tesis edilmiş boru hatlarında, boru etrafındaki toprak ekran etkisi göstererek kapasitif etkileşim önlenmektedir. Kapasitif etki hem olağan durumda hem de arıza durumunda gözlemlenmektedir.

Kapasitif etkinin büyüklüğü;

- EİH’nin gerilim seviyesi,
 - EİH ile boru hattı arasındaki mesafe,
 - EİH çalışma koşulu (arıza veya olağan durum),
 - EİH ile boru hattının paralel oldukları mesafe,
- koşullarına göre değişmektedir (Cigre, 1995).

El Gayar ve Abdul-Malek (2016) tarafından yapılan çalışmada EİH’nin yıldırım kaynaklı arızalarda boru hattı girişim gerilimi hesaplamak amacıyla “Power Systems Computer Aided Design” (PSCAD) ve CDEGS programları kullanılmıştır. CDEGS bilgisayar programının sonuçları daha hassas ve gerçeğe yakın olduğu söz konusu bu çalışmada belirtilmiştir. PSCAD programıyla boru hattı EİH boyunca aynı mesafede paralel olarak benzetim yapmakta, CDEGS programında ise paralel veya kesişim noktaları farklı mesafeler ve açılarda gerçek duruma yakın benzetim yapılabilmektedir. Ayrıca PSCAD programı toprağın yapısını sonlu iletken olarak modellemektedir, CDEGS ise homojen bir toprak

yapısı olarak değil yatay veya dikey katmanlı olarak, gerçeğe yakın modelleyebildiği belirtilmektedir. Makalede yerden 1 m yüksekte tesis edilmiş boru hattı ile paralel güzergâhta olan EİH girişim etkisi incelenmektedir. Yıldırım arızasını incelemek için yapılan benzetimlerde, EİH toprak teline 10,7 kA ile 110,7 kA arasında yıldırım akım uygulanarak boru hattı üstünde oluşan kapasitif gerilimler izlenmektedir. Daha sonra boru hattının yerden yüksekliği 1 m ile 5 m arasında, toprak öz direnci ise 100 Ω .m ile 3000 Ω .m arasında değiştirilip analizler yapılmaktadır. Boru hattı yerden yüksekliğinin ve toprak öz direnci artışının boru hattı üstündeki kapasitif girişim gerilimini artırdığı tespit edilmektedir (El Gayar ve Abdul-Malek, 2016).

Kapasitif etki nedeniyle metal boru hattı yüzeyinde gerilim oluşmakta, boru hattına dokunan insan veya canlı varlıklar bu gerilimden etkilenebilmektedir. Genellikle EİH'leri 50-60 Hz frekanslarında elektrik iletimi yaptıklarından, bu frekanslarda bir gerilime dokunulduğunda insan vücudu yaklaşık 20 mA'lık akımı tolere edebilmektedir. Farklı ülkelerde ve standartlarda bu sınır değer 5-15 mA arasında değişmektedir (Cigre, 1995).

2.2. İndüktif Etki

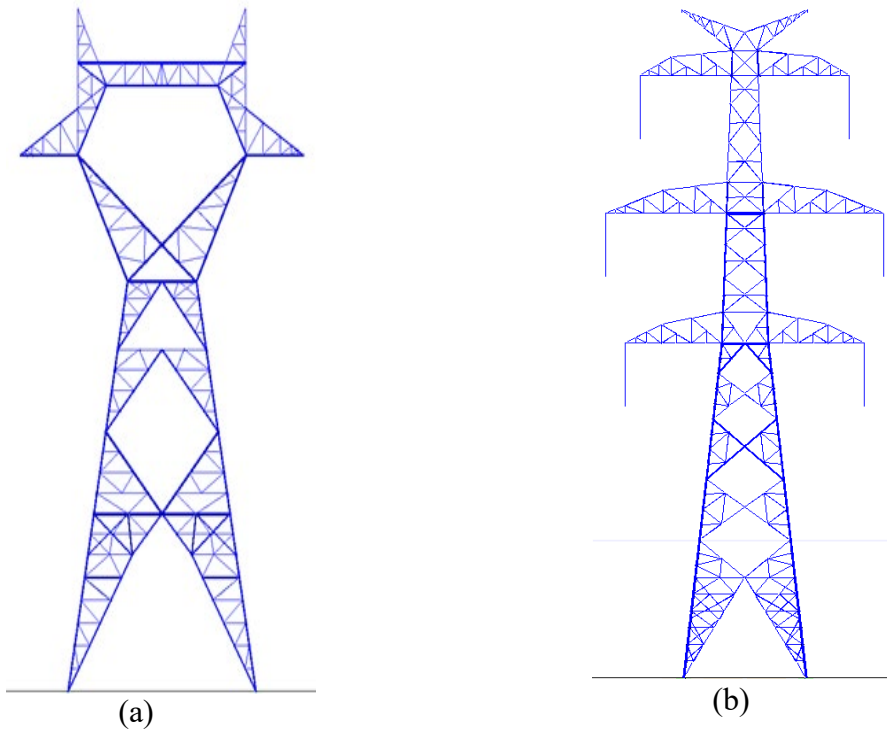
EİH ile paralel veya yakınında geçen yer altına veya yer üstüne tesisi edilmiş metal boru hattı üstünde; EİH'nin taşıdığı akımın yarattığı elektromanyetik alan boru hattı üstünde gerilim indüklemektedir.

İndüktif etki eden değişkenler aşağıda maddeler halinde verilmektedir;

- EİH'nin taşıdığı akım ve EİH işletme durumu (arıza veya kararlı durum),
- EİH ile boru hattı arasındaki mesafe,
- EİH ile boru hattı arasındaki paralel ve kesişim bölgelerinin uzunluğu,
- EİH direklerinin fiziksel yapısı, faz iletkenleri arası mesafe, arıza durumunda toprağa akan akım (Cigre, 1995),
- EİH iletkeninde akan akımın dengelenme derecesi,
- EİH paratoner bağlantı kabloları için kullanılan iletken tipi,
- Yapının kaplama direnci,
- Yapıda mevcut olan topraklama,

- Toprak öz direncinin derinliğe bağlı değişimi (NACE SP0177-2014).

Isogai, Ametani ve Hosokawa (2008) tarafından yapılan çalışmada tek devre kedi tipi direkli (fazlar yerden eşit mesafede yatay olarak tesis edilir) EİH ile çam tipi çift devre (faz iletkenleri düşey olarak tesis edilir) direkli EİH'lerinin boru hattına indüklediği indüktif gerilimler incelenmiştir. Çalışmada faz iletkenleri yatay olan tek devre direkleri, faz iletkenleri düşey olan çift devre direğe göre %20 daha fazla boru hattına indüktif girişim gerilimi oluşturduğu tespit edilmektedir. Çalışmada toprak öz direnci değişiminin etkisi araştırılmış ve toprak öz direnci ile indüktif gerilim artışının doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 2.1 (a)'da tek devre EİH direk resmi, Şekil 2.1 (b)'de ise çift devre EİH direk resmi verilmektedir.



Şekil 2.1. (a) Tek devre ve Şekil 2.1 (b) Çift devre EİH direk resmi

Lu, Liu, Qi, ve Yuan, (2012) tarafından yapılan çalışmada paralel tesis edilmiş EİH ile metal boru hattı arasında boru hattı yer altı kot seviyesinde bakır kablo döşenmiştir. Bakır kablo farklı uzunlukta kullanıldığında örneğin 100 m yerine 500 m olduğunda; boru hattı kaplama gerilimi yaklaşık 2,7 kat azaldığı tespit edilmektedir. Direk toprak geçiş direnci 5 Ω 'dan 30 Ω değerinde arttığında boru hattı kaplama gerilimi %20,3 azalmaktadır. Normal işletme koşullarında boru hattı ve EİH kesişim bölgesinde 300 m boru hattı ile aynı seviyede ve boru

hattına 1 m mesafede bakır kablo kullanıldığında; kaplama geriliminin %58,5 azaldığı tespit edilmektedir. Toprak öz direnci 100 Ω .m yerine 1000 Ω .m alındığında, normal işletme koşullarında boru hattı kaplama gerilimi %26,1 azaldığı belirtilmektedir.

Micu, Czumbil, Christoforidis, Ceclan ve Ştet (2015) tarafından yapılan çalışmada; 15 km boyunca 2 m yer altına tesis edilmiş boru hattı ile boru hattına 30 m uzaklıkta olan ve faz akımı dengeli ve 300 A değerindeki EİH'nin indüklediği girişim gerilimleri incelenmektedir. EİH'nin A fazı 0°, B fazı 120° ve C fazı 240° olan çift devre direklerde ilk olarak sağ bölümdeki fazlar ABC ve sol bölümdeki fazlar ABC kabul edilip; boru hattına indüklenen gerilim tespit edilmektedir. İkinci olarak sağ bölüm "ABC veya ACB" sol bölümündeki fazlar ise "ABC, ACB, BAC, BCA, CAB CBA" kabul edilerek indüklenen gerilimler ölçülmüştür. Benzetim çalışmaları sonucunda boru hattında izlenen en düşük girişim gerilimi ACB-BCA sıralamasında gerçekleşmiştir. ACB-BCA faz sıralaması boru hattı girişim gerilimi değeri ABC-ABC faz sırasına göre %82 daha az olmaktadır. Faz akımlarında %5 dengesizlik olduğunda boru hattı girişim geriliminin %17 arttığı tespit edilmektedir.

El-Refaie, Ahmed, Mohamed ve Gaber, (2017) tarafından yapılan çalışmada ise çift devre direklerde sırasıyla "ABC-ABC" faz sıralı EİH ile "ABC-CBA" faz sıralı EİH'nin boru hattına indüklendiği gerilim incelenmiştir. "ABC-ABC" faz sıralı EİH'nin boru hattına daha az indüktif gerilim yüklediği tespit edilmektedir. Yine aynı çalışmada toprak koruma iletkenin etkisi incelenmiştir. Toprak koruma iletkeni EİH'ne düşen yıldırım ve faz toprak arızalarında, arıza akımını trafo topraklamasına aktarılması amaçlı kullanılmaktadır. Normal kullanım koşullarında EİH faz iletkenlerinin elektromanyetik etkisi toprak koruma iletkeninde akım indüklenmesine neden olmakta ve bu nedenle toprak telli EİH'lerinde, boru hattına indüklenen gerilimin daha fazla olduğu tespit edilmektedir. Fazlarda %30 dengesiz yük olduğu durumda, dengeli olması durumuna göre boru hattında yaklaşık iki kat indüktif gerilim olduğu tespit edilmiştir.

Yuan ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada, El-Refaie ve diğerleri, (2017) ve Micu ve diğerleri, (2015) makalelerindeki benzer çift devre EİH'nin faz sıraları değişimi etkisi incelenmektedir. Toprak öz direnci 100 Ω .m ile 2000 Ω .m, EİH ile boru hattı mesafesi - 1500 m ile +1500 m arasında değiştirilip, farklı faz sıralamasının (ABC-ABC, ABC-ACB, ABC-BCA, ABC-BAC, ABC-CAB ve ABC-CBA) boru hattı kaplamasındaki girişim

gerilimi incelenmiştir. Boru hattı en yüksek kaplama stres gerilimi; toprak direnci, EİH ile boru hattı mesafesi, EİH'nin farklı faz sıralaması ile değiştiği tespit edilmektedir. Toprak öz direnç değerleri değiştikçe en yüksek kaplama gerilimi EİH farklı faz sıralamasında oluşmakta olduğu belirtilmiştir.

Papadopoulos, Apostolidis, Chrysochos ve Christoforidis (2019) tarafından yapılan çalışmada ise Kuzey Amerika EİH'lerinde en sık kullanılan 50/60 Hz ile 900 Hz frekans aralığında boru hattına indüklenen gerilim değişimi incelenmiştir. Yapılan analizler sonucu karşılıklı empedans değerini, en fazla faz iletkenlerinin yerden yüksekliği ve toprak öz direnç değişkenlerinden etkilediği; boru hattı yer altı seviyesi, fazlar arası mesafe ve direk geometrisinin karşılıklı empedans değerine etkisinin düşük olduğu tespit edilmektedir.

EİH'nin işletme koşulunda boru hattına etki eden indüktif girişim gerilimlerinin zararları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Boru hattında çalışan teknik personelin boru hattı metal kısmına temas etmesi sonucu indüktif gerilime maruz kalması.
- Uzun boru hatlarında elektriksel yalıtkan sağlayan flanşlara zarar vermesi.
- Boru hattına bağlı elektronik teçhizata sahip donanımlara, örneğin katodik koruma cihazlarına zarar verilmesidir (Cigre, 1995).

2.3. Kondaktif Etki

Trafo merkezleri, Elektrik Santralleri ve EİH direklerinde, bir toprak kısa devre, yıldırım, elektriksel ark ve anahtarlama arızası olduğunda, toprağa akan arıza akımı, yakın bölgelerde potansiyel yükselmesine neden olmaktadır. Yer altına tesis edilmiş metal boru hatları söz konusu toprak arıza noktasına yakın veya etki alanını içinde ise boru hattı çevresindeki toprak potansiyeli ile boru hattı dış yüzeyi arasında önemli farklılıklar olmaktadır (Cigre, 1995).

Arıza akımı boru hattı etrafındaki toprak potansiyelinin yükselmesine neden olup, boru hattının kaplamasını etkilemektedir. Arıza sırasında kritik olay boru hattı kaplamasının dayanabileceği gerilimin üstünde toprakta potansiyel artışı olmasıdır. Boru hattı kaplamasının dayanabileceği gerilimin üstünde toprak gerilimi oluşması durumunda

kaplamada delinmeler meydana gelmektedir. Toprak kısa devre arızasının yakınında bulunan boru hattı kaplamasında yüksek gerilimler oluşur olur ve bazen bu bölgelerde metal boru yüzeyinde erimeler görülebilmektedir.

Arıza sonucu yükselen gerilim boru hattı yalıtım flanşları ile katodik koruma sistemine zarar vermektedir. Son olarak boru hattı üzerinde dokunma ve adım gerilimi artacağından, arıza sırasında boru hattına dokunan veya yakınında bulunan teknisyen ve/veya canlılara zarar verebilmektedir.

EİH'den kondaktif etki ile etkilenen boru hattında, metal kısmına temas eden bir teknisyeni etkileyen akımın büyüklüğü, boru hattının boyutuna, boru hattı topraklama değerine, EİH iletken kablolarına yakınlığına, EİH voltaj seviyesine ve EİH ile boru hattının geometrik düzenine bağlı bir fonksiyondur. Örneğin, 100 Ω ' luk bir topraklama çubuğu ile topraklanmış boru hattına 1000 Ω değerinde direnci olan bir insan dokunduğunda, topraklama çubuğundan 10 kat daha fazla akım taşıyacak ve böylece mevcut şok akımının büyüklüğünü 10 kat azaltacaktır. Elektrik çarpmasını veya ark oluşmasını engellemek için topraklama çubukları genellikle yeterli koruma sağlayabilir. Ek topraklama ihtiyacı ise basit bir voltmetre testi ile doğrulanabilir (NACE SP0177-2014).

Kopsidas ve Cotton (2008) tarafından yapılan çalışmada yıldırım arızasının yer altı ve yer üstüne tesis edilmiş metal boru hatlarına etkisi CDEGS programı kullanılarak analiz edilmektedir. Yer üstü boru hatlarında EİH ile boru hattı arasında paralellik arttıkça boru hattına indüklenen gerilimin etkisinin arttığı tespit edilmiştir. Yer altına gömülü boru hatları yıldırım arızasında, en yüksek boru hattı kaplama gerilimi, 100 m paralellik sırasında oluşmakta ve EİH ile boru hattı arasındaki paralellik arttıkça yıldırım arızası nedeniyle boru hattına indüklenen gerilim azalmaktadır. Tipik bir boru hattı kaplaması 20 kV değerine kadar dayanabilmektedir (Kopsidas ve Cotton, 2008). Ancak tesis aşamasında boru hattı kaplaması zarar görmektedir. Araştırmalarda yıldırım ve kısa devre arızası kaynaklı boru hattı kaplamasının zarar görmeden 1 000-1 200 V arası artışa dayandığı tespit edilmiştir (Cigre, 1995).

Qi ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada EİH kısa devre analizleri incelenmiştir. Paralel tesis edilmiş EİH ile boru hattı arasında kısa devre arıza yeri değişimine göre boru hattı kaplama gerilimi değişimi incelenmektedir. EİH ile boru hattının paralel güzergâhın

ortasında kısa devre arızası olma durumunda boru hattı kaplama gerilim değerin en yüksek değeri aldığı tespit edilmektedir. Arıza yeri paralelliğin orta noktasından uzaklaştıkça boru hattı kaplama geriliminin azaldığı ve en düşük kaplama geriliminin paralelliğin uç kısımlarındaki kısa devre analizlerinde izlenmektedir. Boru hattı kaplama direnci ($\Omega.m^2$) arttıkça faz-toprak kısa devre arızasında boru hattı kaplama gerilim artmaktadır. EİH ve bağlantılı olduğu trafo merkezlerinde farklı kısa devre akımı gözlemlendiği kabul edilerek boru hattı kaplama gerilimi de incelenmiştir. Trafo merkezlerinde oluşan kısa devre akımlarının oranı ile kaplama geriliminin doğru orantılı olarak değiştiği fark edilmektedir.

Kondaktif etki en fazla aşağıdaki değişkenlerden etkilenir;

- Toplam kısa devre akımı,
- EİH topraklama kablosunun tipi ve kaynağa kadar olan uzunluğu,
- İçinden akımın geçtiği direklerin, kulelerin veya trafo merkezlerinin temellerinin ve topraklama sistemlerinin özellikleri,
- Toprak özdirencinin derinlik ile değişimi,
- Güç sistemleri ve etkilenen metalik yapı arasındaki mesafe (NACE SP0177-2014).

Dushimimana Simiyu, Ndayishimiye, Niringiyimana ve Bikorimana (2019) tarafından yapılan çalışmada çift devre direklerde; bir iletken grubun sabit ABC sıralaması ile ikinci iletken grubun ise sırasıyla ABC, ACB, BAC, BCA, CAB, CBA faz sıralamasıyla benzetimi yapılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre çift devre EİH' nın faz sırası ABC-BCA olarak tesis edildiğinde boru hattına en düşük gerilimin indüklendiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda bir faz toprak kısa devre arızası incelenmiş olup;

- Boru hattı üstünde indüklenen gerilimin boru hattına en yakın fazda arıza olası durumunda en büyük genlikte oluştuğu,
- Toprak özdirenci arttıkça boru hattına indüklenen gerilimin arttığı, 1000 $\Omega.m$ değerinden sonra nerdeyse sabit kaldığı,
- EİH ile boru hattı arasındaki mesafe 100 m'den 600 m'ye çıkarıldığında boru hattına indüklenen gerilimin %62 azaldığı,
- EİH direklerinin toprak geçiş direnci arttıkça boru hattına indüklenen gerilimin azaldığı, tespit edilmiştir.

Abdel-Gawad, Shaalan, Darwish ve Basuny (2019) tarafından yapılan çalışmada; EİH’de tek faz, iki faz ve üç faz kısa devre olması durumunda boru hattı kaplama gerilim değişimi incelenmektedir. Tek faz toprak kısa devre arızası durumunda boru hattına en fazla gerilimin indüklendiği, ikinci olarak iki faz toprak arızası ve en az ise üç faz toprak arızasının boru hattına gerilim indüklediği tespit edilmiştir. Üç faz kısa devre arızası durumunda boru hattına indüklenen gerilim, tek faz kısa devre arızasının %19’u kadar gerçekleşmektedir. Kısa devre ve yıldırım arızalarının, boru hattı ile katodik koruma sistemine zarar verebileceği belirtilmiştir. EİH toprak geçiş direncinin normal işletme koşullarında boru hattına indüklenen gerilime etkisinin olmadığı ancak tek faz toprak kısa devre arızasında boru hattına indüklenen gerilimi arttığı benzetim çalışmalarında tespit edilmektedir.

Liu, Wang, ve Yu (2017) tarafından yapılan çalışmada yıldırım kaynaklı arızalarda diğer tüm değişkenleri sabit tutup sadece EİH direklerinin toprak geçiş dirençleri değiştirildiğinde oluşan değişimler gözlemlenmiştir. EİH direk toprak geçiş direnci 5 Ω ’dan 30 Ω değerine yükseldiğinde, boru hattı girişim geriliminin %23 azaldığı tespit edilmektedir. Çalışmada yapılan yıldırım arızası benzetiminde boru hattına en yüksek 300 kV gerilim indüklenmiştir. Arıza noktasının 2 km ileri ve gerisinde boru hattına indüklenen gerilim değeri ise 10 kV olarak tespit edilmiştir.

Mousa ve diğerleri (2017) tarafından yapılan çalışmada; 345 kV EİH ile 2 km boru hattının paralellik ve kesişim durumları incelenmiştir. Yıldırım arızasında EİH ile boru hattı arasındaki mesafe, toprak öz direnci, homojen olmayan toprak yapısı, boru hattı yakınına yatay veya dikey iletken tesis edilmesi incelenmiştir. EİH ile boru hattının kesiştiği bölgelerinde boru hattına paralel iletken tesis edilmesinin kaplama gerilimini %50 azalttığı gözlemlenmektedir. Yatay ve düşey iletken çubukların birlikte kullanıldığı topraklama sistemi boru hattını daha etkin korumaktadır (Mousa ve diğerleri, 2017). Çalışmada incelen bir diğer husus ise iki katmanlı toprak yapısında, katman öz direnci değişiminin boru hattı kaplama gerilimine etkisi olmuştur. İlk katmanı 1000 $\Omega.m$, ikinci katmanı 100 $\Omega.m$ öz dirence sahip toprak yapısında, katman boyunun değişimi ile boru hattı kaplama geriliminin değişimi incelenmektedir. İlk katman boyu 0,5 m den 2 m boyuna artırıldığında kaplama gerilimi 2,4 kV seviyelerine ulaşmakta, 2 m’den 6 m boyuna artırıldığında boru hattı kaplama gerilimi 1 kV seviyelerine düştüğü ve 6 m’den 12 m boyuna arttırdığımızda boru hattı kaplama gerilimi 2,6 kV seviyelerine ulaştığı, tespit edilmektedir. Bu sonuçlara

göre toprak katman yapısı ve yer altı boru hattı tesis derinliği, boru hattı kaplama gerilimini etkileyecek değişkenler olduğu görülmektedir.

Tao ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmada; EİH ile paralel tesis edilmiş bir boru hattında kaplama girişim gerilimi, oluşturacak farklı koşullar altında incelenmiştir. Söz konusu koşullar; normal işletme durumu, toprak kısa devre arızası ve yıldırım kaynaklı arızalarıdır. Boru hattı kaplama gerilimini azaltmak için iki farklı yöntem önerilmektedir. İlk yöntem EİH ile boru hattının paralel mesafesinin azaltıldığı veya kesiştiği bölgelerde boru hattına paralel bakır kablo kullanımıdır. İkinci yöntem ise bakır kablo yerine 60 m x 40 m ölçülerinde ve 20 m x 20 m büyüklüğünde ızgara ağı olan 6 adet bakır hasır ağı kullanılmasıdır. Bakır hasırlar 0,8 metre derinliğe gömülmektedir. Yapılan çalışmada CDEGS' de bakır hasır uygulamasının benzetimi yapılmış olup, bakır hasır uygulaması ile normal koşullarda indüklenen boru hattı kaplama geriliminin yaklaşık %83 azaldığı hesaplanmıştır.

Kondaktif etkinin zararları (Cigre, 1995):

- EİH veya trafo merkezinde oluşan kısa devre arızası sırasında boru hattı üstünde transfer gerilim oluşur. Bu anda boru hattına dokunan teknisyen elektrik şoku yaşar. 50-60 Hz frekanslı alternatif gerilimlerde bir insanın dayanabileceği gerilim üst sınır değeri 50 V' dur (EKAD). Eğer 50 volt üstünde bir elektrik şokunda kazazede sağlık sorunları yaşamaktadır.
- Boru hattının transfer admittansı arıza sırasında yükselir ve bunun sonucu kaplamada azalma ve/veya delinmeler meydana gelmektedir. Boru hattı akım kaynaklı katodik koruma ile korunuyorsa arıza sırasında boru hattından toprağa akan akımı engellemek için katodik korumanın akım değeri yükseltilmektedir. Katodik korumanın ters yönlü yüksek akımı da boru hattı kaplamasına zarar verebilmektedir.
- Toprak kısa devre esnasında oluşan transfer gerilimi metal boru üstünde erimelere neden olabilmektedir. Bu etki boru hattının arıza noktasına (EİH direği veya trafo merkezi) çok yakın olması durumunda gerçekleşmektedir.
- Transfer voltajı boru hattı yalıtım flanşlarının dielektrik dayanımından yüksek ise yalıtım flanşları zarar görmektedir.

- Akım korumalı ve yarı iletkenli doğrultucu kullanan katodik koruma sistemi arıza sonucu oluşan transfer geriliminden etkilenip zarar görebilmektedir.

Bu tez çalışmasında 400 kV EİH’inde meydana gelen üç faz kısa devre arızasında BOTAŞ doğal gaz boru hattında oluşan kondaktif girişim gerilimlerinden dokunma, adım ve kaplama gerilimlerini azaltmaya yönelik farklı yöntemler denenmektedir. Bu yöntemler arasında EİH toprak koruma iletkeninin değiştirilmesi, boru hattına paralel EİH ile kesişim bölgesinde bakır kablo tesis edilmesi ve bakır hasır ağ kullanılması gibi alternatifler bulunmaktadır.

2.3.1. Elektriksel ark

EİH’ da bir toprak kısa devre sırasında, EİH ve çevreleyen toprak ile trafo merkezi topraklaması arasında yüksek bir potansiyel farkı oluşmaktadır. Boru hattı, EİH ile paralel veya trafo merkezine yakın tesis edilmiş ise, boru hattı üzerindeki indüklenen gerilim arıza yerinin yakınındaki toprak potansiyeline polaritede zıt olma eğiliminde olmaktadır. Oluşan gerilim, herhangi bir elektriksel kırılma gerilim değerini aşarsa, bir ark meydana gelebilir. Bunun sonucu, boru hattı kaplaması, yalıtkan bölümleri, bağlantı noktaları, paratonerler ve katodik koruma tesisleri zarar görebilmektedir.

2.3.2. Yıldırım

EİH’ne yıldırım düşmesi durumunda, faz-toprak kısa devre arızasına benzer yer altına tesis boru hattında kondüktif etki olmaktadır. EİH düşen yıldırım akımı toprak koruma iletkeni ile trafo merkezi topraklamasından toprağa akar ve akımın bir kısmı ise direk topraklamasından toprağa akar. EİH direğinden toprağa akan akım, EİH’ne paralel veya kesişimde tesis edilen boru hattında kondaktif gerilim oluşturmaktadır.

3. KOROZYON VE KATODİK KORUMA

Metal boru hatlarımızdaki arızaların önemli bir kısmı korozyondan meydana gelmektedir. Korozyonu önlemek için alınacak önemli önlemlerden biri katodik korumadır. Bu bölümde öncelikle korozyon nedir, neden kaynaklanır, boru hatlarına verdiği zararlar vb. konuları incelenmektedir. Sonraki kısımlarda ise katodik koruma nedir, farklı yöntemleri ve uygulama alanları incelenmektedir.

3.1. Korozyon

Korozyon bir maddenin bulunduğu çevreden etkilenecek tahrip olması olayıdır. Söz konusu tahrip olan madde, sanayide farklı süreçlerde imal edilmekte veya doğal süreçte oluşmaktadır. Metallerde korozyon; metalin metal olmayan oksijen, sülfür ve benzeri maddeler ile elektrokimyasal tepkimeye uğrayıp bozulması olayı olarak tanımlanabilir (Metin, 2007).

DIN 50900 normuna göre korozyon, metal malzemenin ölçülebilir seviyede değişimine neden olan metal-çevre tepkimesi olarak tanımlanmakta olup, korozyon zararı ise metal bir yapının bir kısmının veya bütününün hasara uğraması olarak tanımlanmaktadır (Bıyık, 2013).

Doğada bulunan metaller en düşük enerji seviyesinde kararlı haldedir. Sanayide en çok kullanılan metallerden demir, doğada oksit mineralleri halinde bulunmaktadır. Oksit halindeki demir minerallerine yüksek enerji uygulanarak çelik vb. metallere dönüştürülür. İşlenmiş demir metaller uygun ortam bulduğunda tekrar doğadaki ilk haline dönüşmek istemektedir. Termodinamiğin temel yasalarından biri maddenin en düşük enerjili haline dönüşme isteğidir. İlk haline dönüşme sırasında demir oksitlenerek pas oluşmakta ve bu pas metal yapıda korozyon ve demir malzemenin işlevsizleşmesine neden olmaktadır (Karataş, 2019).

Abu-Hamet'in (1998) yaptığı deneysel çalışmada toprak yapısının korozyona etkisi incelenmiştir. Toprak öz direnci, toprak pH'ı ve toprak nemi ölçülüp, koroziyonun bu üç değişkene bağlı olduğu ileri sürülmüştür. Deneyde çelik parçaları farklı toprak koşullarında

bekletilip, çelik malzemede oluşan korozyon ve bu korozyona bağlı kütle kaybı ölçülmüştür. Deneysel olarak ölçülen toprağın korozifliği ile Maurin formülü (Abu-Hamet, 1998) uyumlu bulunmuştur. Söz konusu formüle göre toprak korozifliği, pH ve toprak özdirenci ile ters, toprak nemi ile doğru orantılıdır (Bıyık, 2013).

$$\%K = 2 \frac{10 - \text{pH}}{\sqrt{\rho}} (10 + Z) \quad (3.1)$$

K : Zeminin koroziflik derecesi,

ρ : Özdirenç ($\Omega \cdot \text{cm}$),

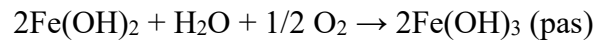
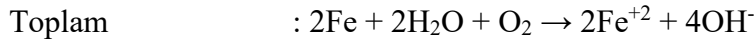
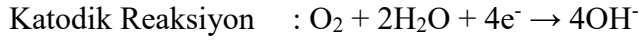
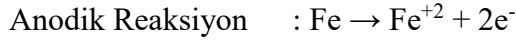
Z : Nem yüzdesidir.

Boru hatları birçok metal bileşeni (flanşlar, boru hattı bağlantıları ve vanalar gibi), vida, perçinleme, kaynak, vb. yöntemler ile birbirine bağlanır. Bu bağlantı parçalarında dar çatlaklar veya kaynak bağlantı hataları oluşabilmektedir. Çatlak ve kaynak hataları boru hattında korozyon kaynaklı ciddi hasara neden olmaktadır. Elektromanyetik girişimlerin, aralık korozyonunu artıran bir etkisi vardır. Elektromanyetik girişimler, boru hattı bağlantı bölümlerinde aralık korozyonu ile boru hattının delinmesine ve sızıntıya sebep olmaktadır. Bu durumlar çevre kirliliği ve enerji israfına neden olmaktadır (Lou, Lin, Zhou, Li ve Wang 2020). Aralık geometrisinin korozyon hızı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmalarda, aralık genişliğinin 0,05~0,15 mm olduğunda ciddi korozyon meydana gelebileceği belirtilmektedir (Zhang, 2013; Liu, 2016).

Elektromanyetik girişim ve aralık korozyonunun aynı anda gerçekleştirildiği durumda, doğal gaz boru hattında ciddi korozyon hasarı olmaktadır. Elektromanyetik girişim ve aralık korozyon etkisi altında oluşan korozyon hızı, normal korozyon hızının 7 katı ve aralık korozyon hızının 3 katı olan 0,51 mm/yıl'dır. Bu nedenle, doğal gaz boru hatlarında elektromanyetik girişim ve çatlak korozyonu birleştiğinde, patlama ve ciddi çevre kirliliğine neden olabilecek delinme ve sızıntılar gerçekleşebilmektedir (Lou ve diğerleri, 2021).

Boru hatları genellikle demir metalinden yapılmaktadır. Yer altına gömülü demir boru hatları toprak pH, nem ve toprak özdirenç değişkenlerine göre korozyona uğramaktadır. Genellikler boru hatları toprağın korozotif etkisinden korunması için yalıtkan bir malzeme ile kaplanmaktadır. Ancak bu malzeme boru hattının tesisi esnasında hasar görüp kısmi

deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu durumda tesis aşamasına müteakip toprak ile boru hattı temas etmekte ve bu durumda elektrokimyasal tepkimeler başlatarak boru hattında korozyon oluşmaktadır. Demir elementi korozyon tepkimesi aşağıda sıralanan reaksiyonlar sonucu gerçekleşmektedir (Reşitoğlu, 2015).

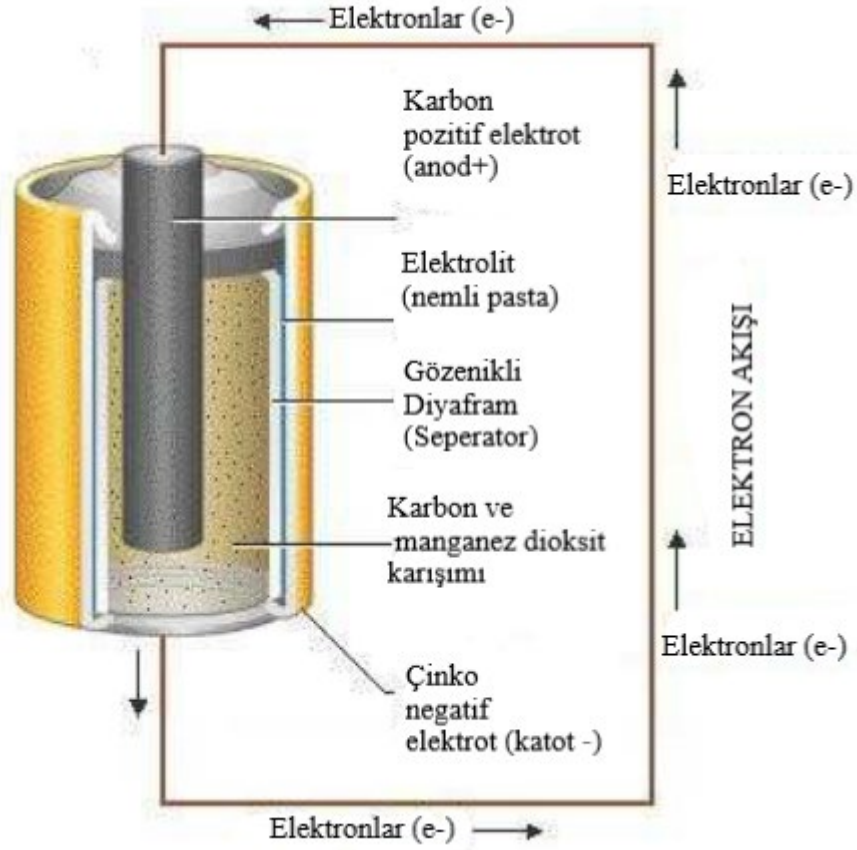


Resim 3.1. Korozyonlu demir köşebent

Korozyon olayı elektrokimyasal bir tepkimedir. Anot olarak adlandırılan bölümde yükseltgenme, katot olarak adlandırılan bölgede redüksiyon tepkimesinin aynı anda oluşması ile korozyon gerçekleşmektedir. Bu tanımdan baktığımızda korozyon olayı akım üreten bir pil olarak modellenebilmektedir (Reşitoğlu, 2015).

Şekil 3.1.'de karbon-çinko kuru pil örneği, korozyon hücrecini modelleyebilmek için verilmektedir. Merkezdeki karbon çubuk anot, çubuğun etrafındaki çinko ise katottur (Bıyık, 2007).

Kuru Pil



Şekil 3.1. Kuru pil (Bıyık, 2007).

3.1.1. Nernst çizelgesi

Nernst çizelgesi, 1 atmosfer basınç ve 25 °C'de 1 mol/lit iyon sulu çözeltide, hidrojen gazı ile temastaki platin elektrot (referans elektrot) potansiyelini standart kabul edilerek, her bir metalin 25 °C'deki çözeltisinde metal ile çözelti arasında ölçülen potansiyel değerlerinin sırasıdır (Reşitoğlu, 2015). Nernst çizelgesinde (Çizelge 3.1.) hidrojene göre daha negatif olan metaller daha aktif, yani iyonlaşma eğilimi daha fazla olan metali, hidrojene göre daha pozitif olan metaller ise daha soy, yani iyonlaşma eğilimi daha az olan metali karakterize etmektedir. Bir metalin aktifliği, elektronunu verme eğilimi, diğer bir ifade ile reaksiyona girme eğilimidir. Metaller aktifleştikçe daha kolay korozyona maruz kalmaktadır (Reşitoğlu, 2015).

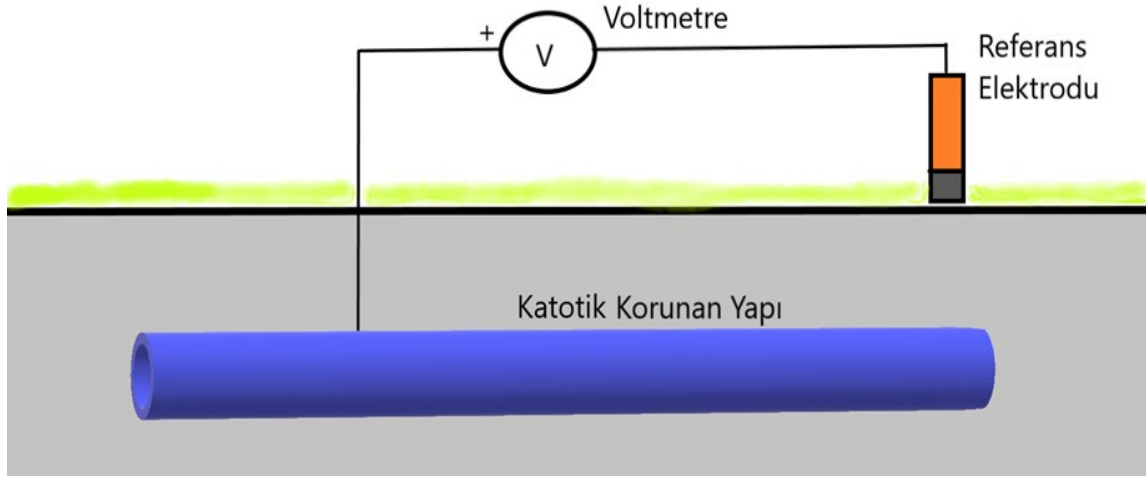
Çizelge 3.1. Nernst çizelgesi

Metal	Reaksiyon	Elektrot Potansiyeli (V)
Lityum	$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}$	- 3.030
Potasyum	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{K}$	- 2.925
Sodyum	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Na}$	- 2.714
Magnezyum	$\text{Mg}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	- 2.371
Alüminyum	$\text{Al}^{+++} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}$	- 1.662
Mangan	$\text{Mn}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mn}$	- 1.050
Çinko	$\text{Zn}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	- 0.763
Krom	$\text{Cr}^{+++} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	- 0.744
Demir	$\text{Fe}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	- 0.440
Kadmiyum	$\text{Cd}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0.403
Kobalt	$\text{Co}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Co}$	- 0.277
Nikel	$\text{Ni}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.250
Kalay	$\text{Sn}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	- 0.136
Kurşun	$\text{Pb}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	- 0.126
Hidrojen	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.000
Bakır	$\text{Cu}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+ 0.340
Cıva	$\text{Hg}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hg}$	+0.792
Gümüş	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+ 0.799
Platin	$\text{Pt}^{++} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pt}$	+ 1.200
Altın	$\text{Au}^{+++} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Au}$	+ 1.420

Yukardaki çizelgede verilen elektrot potansiyelleri, metallerin hidrojen elektrotu potansiyel farkına göre hazırlanmıştır. Saha uygulamalarında su ve zemin içerisindeki elektrot potansiyeli için Hg_2Cl_2 (Kalomel) veya doymuş Cu/CuSO_4 (Bakır/Bakır sülfat) referans elektrotu kullanılmaktadır. Bu elektrotların standart hidrojen elektrotuna göre ölçülen elektrot potansiyelleri (Reşitoğlu, 2015);

- Hg_2Cl_2 (Kalomel) elektrot = +0,280 V
 - Cu/CuSO_4 (Bakır/Bakır sülfat) elektrot = +0,316 V
- tur.

Boru hatlarında aralıklarla potansiyel ölçümleri yapılmaktadır. Ölçüm yapabilmek için boru hattı ile elektriksel bağlantı yapılmakta ve bu bağlantıya voltmetrenin pozitif ucu bağlanırken, negatif ucuna ise referans elektrot bağlanmaktadır. Şekil 3.2.'de bu bağlantı şeması gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Boru-toprak potansiyeli ölçümü

3.1.2. Korozyona etki eden değişkenler

Korozyona etki eden temel değişkenler genel olarak yedi adettir. Söz konusu yedi değişken aşağıda açıklanmaktadır.

Ortam

Korozyon oluşum hızı metalin özellikleri ve bulunduğu çevre koşulları ile ilgilidir. Ortamın asidik veya bazik durumu, havanın, oksijenin veya suyun metale geçebilme yeteneği, elektriksel girişimler ve farklı bakteriler korozyonu başlatmakta ve/veya hızlandırmaktadır.

Sıcaklık

Sıcaklık artması veya azalması korozyon hızını etkiler. Sıcaklığın artmasıyla iyonların hareketi artmakta, ancak yüksek sıcaklıkta oksijenin yoğunluğu azalmaktadır. Azalan oksijen miktarının korozyon hızına etkisi sıcaklığın artışına göre daha az etki etmektedir. Sonuç olarak sıcaklık artmasıyla korozyon hızı artmaktadır. Sıcaklık 0 derecenin altına düştüğünde toprak donmakta, iyon hareketleri ve dolayısıyla korozyon hızı yavaşlamaktadır (Metin, 2007).

Malzeme

Farklı metal malzemelerin birbirlerine göre elektrot potansiyelinin bulunması farklı metal malzemelerden oluşan yapılarda korozyona neden olmaktadır. Boru hatlarında deformasyona uğrayan kısımların yenilenmesi durumunda yeni montaj yapılan malzeme ile mevcut malzeme arasında potansiyel fark oluşmakta ve bu durum korozyona neden olmaktadır (Metin, 2007).

Taneler Arası Özellik Farkları

İki farklı yoğunluklu taneli metal yapılarda, yoğunluk farkının değiştiği bölümlerde potansiyel fark oluşmakta ve bu durumda korozyon başlamaktadır. Örneğin paslanmaz çelik boru veya paslanmaz çelik tanklara yapılan kaynaklar iki farklı tane yoğunluklu kısım oluşturmakta ve bu durum kaynak yerlerinde paslanmaya neden olmaktadır. Kaynak nedenli korozyonu engellemek için elektrot kaynağı veya katodik koruma önlemlerini almak gerekmektedir.

Sistem Dizaynı

Korozyona uğraması muhtemel metal malzemelerin bulunduğu ortama korozyon etkisi oluşturacak sıvı gibi maddelerin birikmesini engelleyecek tasarımlar yapılmalıdır.

Oksijen Konsantrasyonu

Toprak altına tesis edilmiş metal yapılarda oksijen yoğunluğu yapı boyunca aynı olmayabilmektedir. Bu tip metal yapılarda farklı oksijen yoğunluğu olan bölgelerin biri anot diğeri ise katot olup elektrokimyasal korozyona neden olmaktadır (Metin, 2007).

Toprak Özdirenci

Toprak özdirenci düşük olan bölgelerde iletkenlik yüksek olduğundan iyonlar daha kolay hareket etmektedir. Bu durum korozyon hızını artmakta, toprak özdirenci yüksek bölgelerde ise iyon hareketi daha zor olduğundan korozyon hızı azalmaktadır.

Çizelge 3.2. Zemin öz direncine göre zeminlerin korozyonluk dereceleri (TS EN ISO 18086).

Toprak Öz direnci ($\Omega.m$)	Toprak Korozyon Özelliği
$\Omega.m < 25$	Çok Korozyonlu
$25 < \Omega.m < 100$	Korozyonlu
$100 < \Omega.m < 300$	Orta Korozyonlu
$300 < \Omega.m$	Az Korozyonlu

AC korozyon olasılığı, aşağıdaki değişkenlerin bir kısmının veya tamamının değerlendirilmesi ile yapılmalıdır (TS EN ISO 18086:2021-02),

- Yapıdaki AC voltajı,
- Katodik koruma çalıştığındaki potansiyel değeri,
- AC akım yoğunluğu,
- DC akım yoğunluğu,
- AC/DC akım yoğunluğu oranı,
- Toprak öz direnci,
- Korozyon hızı.

Korozyon hızı ölçümleri

Aşağıda üç genel korozyon hızı ölçümü türü belirtilmektedir (TS EN ISO 18086:2021-02),

- Ağırlık kaybı ölçümleri,
- Perforasyon ölçümleri,
- ER ölçümleri.

Ağırlık kaybı ölçümleri, metal yapının yanında toprağa gömülü ağırlığı belli olan metal kuponlar ile yapılır. Belli bir çalışma süresinden sonra (aylar veya yıllar), kupon çıkarılır ve TS EN ISO 8407'de açıklanan prosedüre uygun olarak temizlik, muayene ve tartım için bir laboratuvara gönderilir. Avantajı korozyon topografyası hakkında bilgi sağlamaktır. Bu bilgiler en yüksek korozyon hızı ile ortalama korozyon hızıdır. Dezavantajı kupon çıkarılmadan korozyon hakkında bilgi sahibi olunamamaktadır.

Perforasyon ölçümleri özel perforasyon problemleri ile yapılır (TS EN ISO 8407). Korozyon işlemi kuponun duvar kalınlığını deldiğinde bir sinyal üretilir. Korozyon hızını, probu topraktan çıkarmadan kaydetmektedir. Ancak kupon delinmeden korozyon hızı bilgisine ulaşamamaktadır.

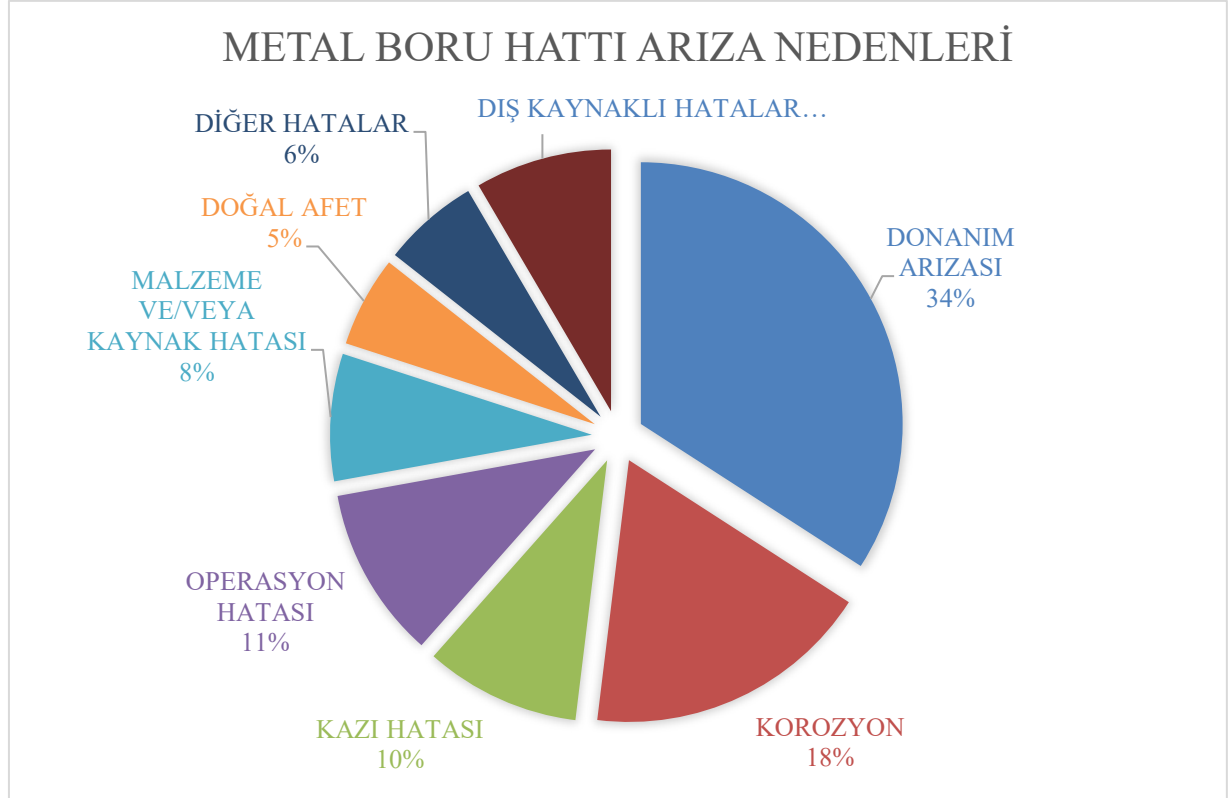
ER ölçümleri, ER problemlerinin kurulumunu gerektirir. Korozyon, kuponun kalınlığını kademeli olarak azalttığında, kuponun ER değeri artar ve ortalama korozyon hızının sürekli olarak takip edilmelidir. Bu bilgi katodik koruma seviyelerini optimize etmek için kullanılmaktadır (TS EN ISO 8407).

3.1.3. Korozyon zararları

Korozyon ulusal ve uluslararası ölçekte önemli ekonomik zararlara neden olmaktadır. Ülkemizde önlenabilir korozyon maddi zararları GSMH' nin %1,6'sı kadardır (Bıyık, 2013). Korozyon zararlarına sadece malzeme değil, enerji ve emek kaybını da eklersek ülkeler bazında, GSMH' nin yaklaşık %5'i düzeyindedir. Bu oran ABD'de 444 milyar \$ ile GSMH' nin %3,1'ne tekabül etmektedir.

Dünya genelinde korozyon nedeniyle doğrudan uğranılan kaybın yılda yaklaşık 2,2 trilyon \$, Türkiye'de ise yılda yaklaşık olarak 45,6 milyar \$'lık bir kaybın olduğu görülmektedir. (Bıyık, 2006).

Amerika PHMSA (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration) kurumunun karadaki metal boru hatlarında 1 Ocak 2010 ile 4 Kasım 2016 yılları arasında meydana gelen arıza olaylarının incelediği rapor Şekil 3.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Metal boru hatları arıza nedenleri 1 Ocak 2010-4 Kasım 2016 (PHMSA)

Şekil 3.3.'ü incelendiğimizde metal boru hatlarında arıza nedenleri arasında en büyük oran %34 ile donanım arızası, ikinci olarak %18 ile korozyon, üçüncü sırada %11 ile operasyon hatası, dördüncü sırada %10 ile kazı hatası ve beşinci sırada ise %8 ile malzeme ve/veya kaynak hatalarıdır.

Şekil 3.3.'deki veriler incelendiğinde boru hatlarındaki arıza kaynaklarında yine ilk sırada donanım ve ikinci sırada korozyon bulunmaktadır. Metal boru hatlarında donanım, korozyon, malzeme ve/veya kaynak hatalarının toplamı %60'lık arıza nedenidir. Söz konusu arıza nedenleri, imalat ve tesis aşamalarında alınacak önlemler ile önemli bir oranda engellenebilmektedir.

Amerika Birleşik Devletleri PHMSA arıza verileri dikkate alınarak, ülkemizde tesis edilecek veya tesis edilmiş metal boru hatlarında oluşabilecek arızaları engelleyecek önlemlerin alınması ülke ekonomisine katkıda bulunacaktır.

3.2. Katodik Koruma

Sir Humphry Davy, 1824 yılında tuzlu suda yaptığı laboratuvar deneyleri sonucunda bakırın demir veya çinkoya bağlanarak korozyona karşı başarılı bir şekilde korunabileceğini belirtmiştir. Gemilerin bakır yüzeylerinin yaklaşık 1:100 oranında demir bloklar ile gemiye bağlı galvanik katodik korunması tavsiye etmektedir. Katodik korumanın bilinen ilk uygulaması, Samarang isimli bir savaş gemisinde 1824 yılında Sir Humphry Davy tarafından denenmiştir. Gemi gövdesinin bakır bölümleri çinko anot kullanılarak korunmaya çalışılmıştır. Çinko anot bakır gemi gövdesini korumakla birlikte, katodik koruma nedeniyle bakır yüzey toksit özelliğini kaybettiğinde gövdede yosun ve midye toplanmıştır. Gemi gövdesinde biriken yosun ve midyeler katodik korumanın bir işe yaramadığı izlenimi yaratmış ve sonuç olarak bir yüzyıla yakın tekrar denenmemiştir. Metal boru hatlarının kullanılmaya başlanması ile tekrar katodik koruma gündeme gelmiş ve günümüze kadar katodik koruma metotları hızla gelişmiş ve önemli ekonomik kazanımlar sunulmuştur. (Revie, 2008; Reşitoğlu, 2015).

Bulunduğu çevre ortam koşullarında anot özelliğinde olan ve bu nedenle korozyona maruz olan metalin, elektrokimyasal işlemler ile katot özellik kazandırılması olayı, katodik koruma olarak adlandırılmaktadır. Katodik korumanın amacı bir metal yapının korozyona uğramasını engellemektir. Katodik koruma metal yapıları korozyondan korumak amacıyla yapılan endüstriyel bir uygulamadır. Katodik koruma yer altına gömülü metal boru hatlar, metal tanklar, köprüler, denizaltılar, gemiler ve limanlar gibi endüstriyel tesislerde mevcut metal yapıları korumak amacıyla kullanılmaktadır.

Demir malzemeden yapılmış bir yapıda anottaki tepki demirin elektron vermesi ile başlar ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^-$), katodik koruma demirin kaybettiğine eşit ve/veya daha fazla elektronun demir yapıya verilmesi ile korunmasıdır. Yapıya kaybettiğinden fazla elektron verilmesi, demirin oksitlenmesini başlatan kimyasal tepkimeleri ve korozyon oluşumunu engellemektedir. Bu bölümün ilk kısmında açıklanan boru hatlarında oluşan korozyon kaynaklı arızaların önemli bir kısmı katodik koruma sayesinde engellenebilir (Metin, 2017; Karataş, 2019).

Katodik korumanın yaygın kullanıldığı alanlar:

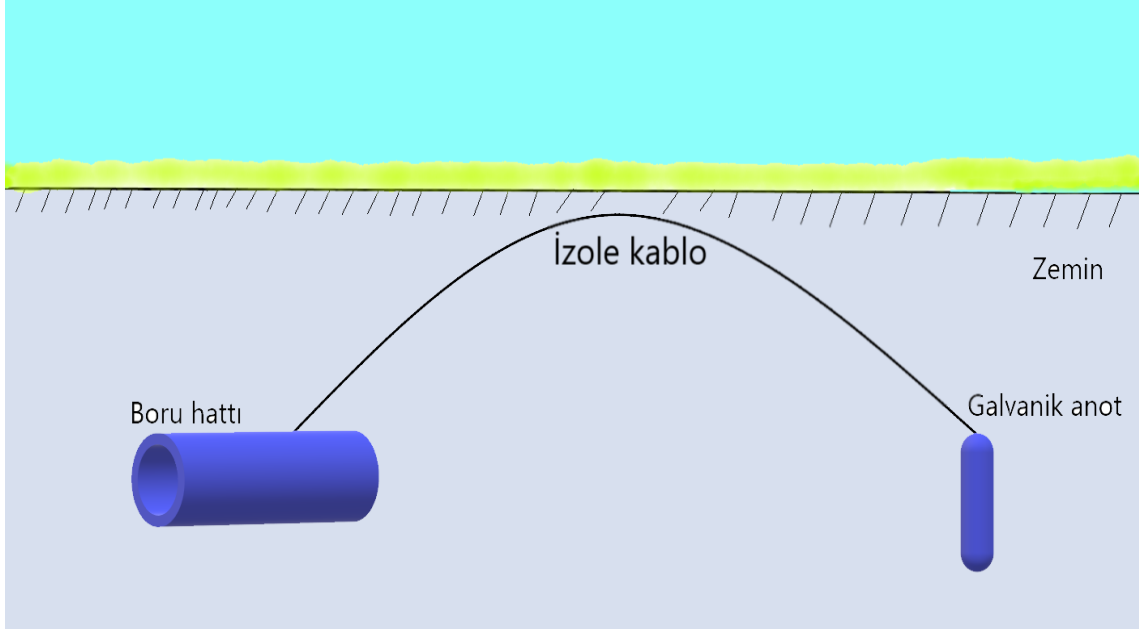
- Gemi gövdeleri,
- Petrol, doğal gaz ve içme suyu boru hatları,
- Rıhtım ve iskele çelik kazıkları,
- Duba ve balans tankları,
- Sıvı depolama tankları,
- Yangın sistemleri,
- Kanalizasyon sistemleri,

genel uygulamalarıdır.

Günümüzde katodik koruma iki farklı yöntemde uygulanmaktadır. İlk yöntem korunmak istenilen metal yapıdan daha anodik özelliğe sahip bir metal ile (kurban anot, galvanik anot) elektriksel olarak irtibatlandırılıp, korozyondan korunmak istenilen metal yapının katot özelliğine sahip olmasını sağlamaktır. Bu yöntem galvanik anotlu katodik koruma olarak adlandırılmaktadır. İkinci yöntem ise korozyona uğrayan metal yapının bir dış doğru akım kaynağından akım verilmesi ile yapılan katodik korumadır. Bu yöntem ise dış akım kaynaklı katodik koruma olarak adlandırılmaktadır.

3.2.1. Galvanik anotlu katodik koruma

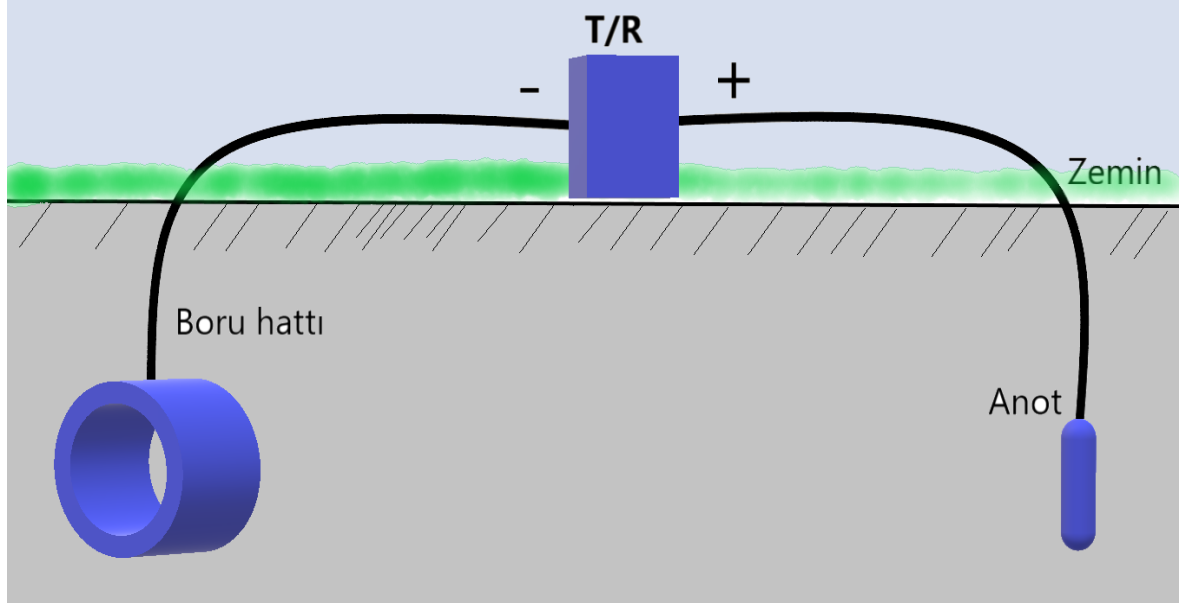
Galvanik anotlu katodik korumada korunan metal yapıda korozyonu önlemek için daha aktif bir metal ile gerekli akımın sağlanmasıdır. Örneğin dökme demirden yapılmış bir yapının Cu/CuSO₄ (bakır/bakır sülfat) elektrotu potansiyel farkı -0,68 mV'tur. Bu yapıyı alüminyum alaşım (%95 Al, %5 Zn) ile korumak istersek, alüminyum alaşımın Cu/ CuSO₄ elektrotuna göre potansiyel farkı -1,05 V' tur. Her iki metal elektriksel olarak bağlanır ise aralarında yaklaşık 0,37 V DC potansiyel farkı oluşmaktadır. Alüminyum alaşımdan dökme demir yapıya doğru akım akışı olur ve yapı katodik olarak korunması sağlanmış olur (Karataş, 2019). Şekil 3.5.'de Galvanik anotlu katodik koruma gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Galvanik anotlu katodik koruma

3.2.2. Dış akım kaynaklı katodik koruma

Dış akım kaynaklı katodik korumada galvanik anotlu korumadan farklı olarak katodik koruma için gerekli DC akım, bir elektrik kaynağından sağlanmaktadır. Söz konusu kaynak elektrik şebekesi, batarya, güneş veya rüzgar enerjisi olabilmektedir. Ülkemizde genellikle elektrik şebekesine bağlı Transformatör/Redresör (T/R) üniteleri kullanılmaktadır. T/R ünitelerinde ilk olarak alternatif gerilim transformatörle redresör ünitesin çalışma değerlerine düşürülmekte, redresör ünitesi ise alternatif akımı metal yapının korunması için doğru akıma dönüştürmektedir (Reşitoğlu, 2015). Şekil 3.6.'da dış akım kaynaklı katodik koruma şeması görülmektedir.



Şekil 3.5. Dış akım kaynaklı katodik koruma

T/R ünitesinin (-) ucu korunacak metal yapıya, (+) ucu ise yardımcı anoda bağlanmaktadır. Dış akım kaynaklı katodik korumada kullanılan yardımcı anotlar birim amper başına en az kütle kaybı olan platin, yüksek silikonlu demir ve grafit gibi metalledir.

Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde ayrıca ölçüm hücreleri bulunmaktadır. Örneğin korozyondan korunacak yapı demirden yapılmış ise; ölçüm hücresi bakır/bakır sülfat çözeltisine ile demir yapının potansiyel farkının en az -850 mV değerinde olmalıdır. Demir yapıları korozyondan korumak için -850 mV veya -850 mV'dan daha düşük bir değerde olmalıdır (Reşitoğlu, 2015).

Ismail ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmada, yaklaşık 12,3 km boyunca paralel güzergâh kullanan 150 kV E.İ.H ile 16 inç'lik metal boru hattı girişim gerilimi incelenmektedir. Saha çalışmalarında iki farklı durumda boru hattı gerilimi ölçülmüş olup; ilk durumda dış akım kaynaklı katodik korumasız ölçümler yapılmış, ikinci durumda ise dış akım kaynaklı katodik koruma sistemi devreye alınarak ölçümler yapılmıştır. Dış akım kaynaklı katodik koruma ile boru hattı en yüksek kaplama gerilimi 17,32 V değerinden 5,74 V değerine düşürülmüştür.

Shabangu, Shrivastava, Abe, ve Olubambi (2018) tarafından yapılan çalışmada EİH ile boru hattı arasında oluşan girişim etkisini azaltabilmek için deneysel dış akım kaynaklı katodik

koruma uygulamıştır. Boru hattının yakınında EİH bulunmadığı koşulda boru hattı ve katodik koruma anodu arasında -850 mV potansiyel farkı olması korozyon etkilerini önlediği ancak EİH ile paralel ve/veya kesişim olduğu zaman -850 mV gerilim farkı yeterli olmadığı, etkili bir koruma yapabilmek için -1150 mV seviyesinde katodik koruma yapılmasının gerekli olacağı önerilmektedir.

Adedeji, Ponnle, Abe, ve Jimoh (2015) tarafından yapılan çalışmada dış akım kaynaklı katodik koruma, enerji kaynağına erişim imkânı bulunan yerlerde galvanik anotlu koruma yerine tercih edilebileceği belirtilmektedir. EİH yakınında tesis edilen boru hatlarında katodik korumanın boru hattının işletme ömrünü artırdığı ve boru hattında oluşan korozyon penetrasyon oranı Faraday'ın elektrokimyasal ilişkileri kullanarak hesaplanmaktadır (Adedeji ve diğerleri, 2015).

$$CPR = \frac{M \times J_{ac}}{F \times \lambda} \quad (3.2)$$

CPR : Metal korozyon penetrasyon oranı

M : Atomik kütle

J_{ac} : AC akım yoğunluğu

λ : Metal yoğunluğu

F : Faraday sabiti (96485 C/mol)

Boru hattı ile EİH paralel veya kesiştiği durumlardan oluşan girişim gerilimlerinin etkisini azaltmak amacıyla, potansiyel farkı T/R ünitesinde otomatik kontrol ile -1150 mV seviyesine kadar artırılabilir. Boru hattı ile referans elektrotu arasında potansiyel farkının -1200 mV ve daha negatif değer alması durumunda, boru hattı kaplaması zarar görebilmekte ve boru hattı kaplamasının zarar görmesi korozyona neden olmaktadır (Cigre, 1995).

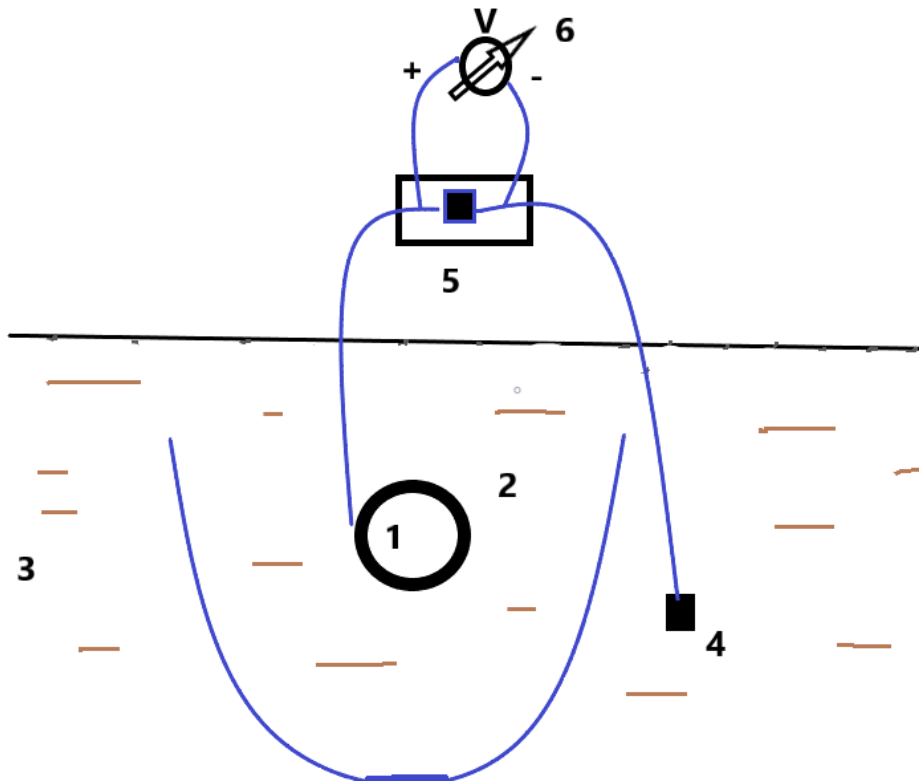
3.2.3. T/R ünitesi

T/R ünitesi korunacak metal yapının referans elektrot yardımıyla koruma akımını artırıp azaltmaktadır. Referans elektrottan ölçülen potansiyel değeri yapının korunması için yeterli

değil ise T/R çıkış akımı yükseltilmekte, istenilen değerden yüksek ise koruma akımı azaltılmaktadır. T/R üniteleri günümüzde uzaktan kontrol edilebilmekte, AC-DC dönüştürücüleri yüksek teknolojiли tristör kullanarak otomatik olarak koruma akımını artırıp azaltabilmektedir. T/R ünitelerinin elektrik şebekesine bağlanamadığı yerlerde ise güneş enerjisi pilleri kullanabilmektedir (Reşitoğlu, 2015).

3.2.4. Akım ölçüm hücresi

Boru hattındaki akım yoğunluğu (AC veya DC), bir seri direnç üzerindeki gerilim düşüşü ile ölçülebilir (bkz. Şekil 3.6.). Hem AC hem de DC akım ölçümleri için, sistemin önemli ölçüde bozulmasını önlemek için seri direncin değeri yeterince düşük olmalıdır. Saha ölçümleri için bu, 1 cm²' lik bir kupon veya prob için tipik olarak 10 Ω seri direnç kullanılır.



Şekil 3.6. Akım ölçüm hücresi

- 1 Boru
- 2 Toprak dolgu
- 3 Mevcut toprak
- 4 Kupon

5 Serisi direnç veya ampermetrenin dâhili şönt direnci
6 Voltmetre

3.3. Değerlendirme

Bu bölümde korozyon hakkında genel bilgiler verilmesi sonrası, korozyona etki eden değişkenler analiz edilmiştir. Devamında korozyonun zararları değerlendirilmiştir. Katodik koruma ve çeşitleri verilerek, katodik korumanın alt bileşenleri devre şemalarıyla gösterilmiştir.

4. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM HESAPLAMA METODLARI

Elektromanyetik girişimleri hesaplamak için literatürde farklı bilgisayar benzetim programları bulunmaktadır. Yıldırım arızasında metal boru hatlarına indüklenen gerilimlerin ölçümü için Isogai, Ametani ve Hosokawa (2004) ile Amer (2007) çalışmalarında Elektromagnetic Transient Program (EMTP) kullanılmaktadır (Shwehdi, Alaql ve Mohamed, 2019). Kim, H. S., Min, Chase ve Kim, C. H.'in (2021) yaptığı çalışmada ise elektromanyetik indüktif girişim gerilimleri yine EMTP programı kullanarak etkin hesaplamalarda bulunmuştur.

Shwehdi ve diğerlerinin (2020) yaptığı diğer bir çalışmada; 380 kV EİH'de işletme koşulunda ve kısa devre arızası esnasında metal su boru hattında oluşan gerilimler, Conduction and Induction (CONIND) programı ile analiz edilmektedir.

Bu tez çalışması hesaplamalarda akım dağılımlı elektromanyetik girişim, topraklama ve toprak yapısı analiz yazılımı (CDEGS) programı kullanılmıştır. Elektromanyetik girişim hesaplamalarında iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler alan yaklaşımı ve devre yaklaşımıdır. Alan yaklaşımı ile yapılan hesaplamalar elektromanyetik alan teorisinde kullanılan denklemler ile gerçekleştirilir. Alan yaklaşımında elektromanyetik girişimlerin incelendiği bölgedeki tüm iletken ağlar CDEGS'e aktarılır ve indüktif, kapasitif ve kondaktif girişimler tek bir defada hesaplanır (Li, Dawalibi ve Ma, 2000). Alan teorisi ile yapılan hesaplamalarda devre yaklaşımına göre daha net sonuçlar elde edilmektedir. Devre yaklaşımı kullanan bilgisayar benzetim programlarının analiz süresi alan teorisi ile yapılan analizlere göre daha kısa süreli olmaktadır (Li ve diğerleri, 2000). Devre yaklaşımı ile alan yaklaşımı arasındaki en büyük farklardan biri, EİH'nin kısa devre arıza konumunda boru hattı uçlarındaki manyetik alan süreksizliği devre analizinde hesaplanamamaktadır (Wang, Liang ve Freschi, 2020). CDEGS'in Electromagnetic Fields Analysis (HIFREQ) programında hesaplamalar elektromanyetik alan teorisini kullanılmaktadır. Elektromanyetik teorisinin hesaplanmasında kullanılan Maxwell denklemleri aşağıda belirtilmektedir.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times H = J \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.3)$$

- E : Elektrik Alan (V/m)
 B : Manyetik Akı yoğunluğu (Wb/m²)
 H : Manyetik Alan Kuvveti (A/m)
 J : Akım Yoğunluğu (A/mm²)

Maxwell eşitlikleri ile bulunan elektrik alan ve manyetik alan frekans bölgesinden zaman bölgesine aşağıdaki eşitlikler ile dönüştürülür.

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4.4)$$

$$H(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (4.5)$$

Boru hatları için devre yaklaşımı ile hızlı, esnek ve karışık güzergâhı olan boru hatlarının analizi yapılabilmektedir. CDEGS'in Right of Way (ROW) programı, EİH ile metal boru hattı arasındaki elektromanyetik girişimleri hesaplamak için kullanılmaktadır. ROW programı, devre yaklaşımını kullanarak elektromanyetik girişim hesaplamalarını yapmaktadır. Devre yaklaşımı, EİH ve yer altına tesis edilmiş boru hatlarının uzun bir rotayı paylaştığı durumlarda işlevseldir. Devre analizi için üç aşama vardır: devre değişkenlerinin hesaplanması, devre kurulumu ve devre analizi (Wang ve diğerleri, 2020). Elektromanyetik girişimleri hesaplamak için boru hattı ve EİH güzergâhı, EİH faz iletkeni ve gerilimi, toprak koruma iletkeni, faz iletkenlerinin sayısı, faz iletkenlerinin ve toprak koruma iletkenlerinin kule üzerindeki konumları, boru hattı kaplama kalınlığı, boru hattı tesis derinliği, toprak direnci, EİH direk ayak direnci ve katodik koruma anodu gibi değişkenler benzetiminde tanımlanabilmektedir.

Li, Dawalibi ve Ma, (2001) tarafından yapılan çalışmada, boru hattı ile EİH paralel ve kesişmelerin bulunduğu koşullarda, alan yaklaşımından elde edilen sonuçlarla, devre yaklaşımından elde edilen sonuçları karşılaştırarak hata seviyesi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 2 km paralel uzunluk için, uzak arıza koşulları altında uzunluk etkisinden kaynaklanan hatanın genellikle %9'dan az olduğunu ve ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. Ancak paralel koridorda meydana gelen bir arıza için, devre yaklaşımının

indüklenen gerilimleri olduğundan fazla tahmin etmekte olup, hata oranı %25'i aşabilmektedir.

EİH ile boru hattı arasındaki açının etkisi, devre yaklaşımındaki hata payı, kesişim bölgesinden uzakta gerçekleşen arızalar için önemsenmeyecek değerlerdedir. Kesişim bölgesinden uzaktaki arızalarda hata oranı %2'den az olmuştur. Bununla birlikte, bir EİH/boru hattı geçişinde bir arıza meydana geldiğinde, hata oranı önemli ölçüde artmaktadır (Li, 2001).

Wang ve diğerleri (2020) tarafından yapılan değerlendirmede, iletim hattının uzunluğu ile toprak öz direncinin, boru hattında indüklenen gerilimin pik değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını bildirilmektedir. Bu nedenle, modelleme sırasında iletim hattının tam uzunluğunda benzetim uygulaması gerekli değildir ve ayrıca kabul edilebilir sonuçların elde edilmesi için homojen zemin modeli kullanılabilmektedir.

Devre yaklaşımı kullanılarak hesaplanan boru hattı indüklenen potansiyeli ile, alan yaklaşımı kullanılarak elde edilen sonuçlar arasındaki fark, paralellik uzunluğunun artması ile azaldığını açıkça göstermiştir (Li, Dawalibi ve Ma, 2001, 2002).

Li ve diğerleri (2002) tarafından yapılan çalışmada; devre yaklaşımıyla hesaplanan indüktif girişim gerilim değerinin, boru hattı ile EİH kesişim açısının bir fonksiyonu olarak nasıl değiştiği incelenmektedir. Devre yaklaşımı, boru hattının EİH altından geçiş yaptığı bölgede meydana gelen bir arıza için indüklenen boru potansiyellerini her zaman olduğundan fazla tahmin ettiği sonucuna varılmaktadır (Li, 2002). Geçiş açısının 0 ila 30 derece aralığında hata payı hem yüzde hem de Volt olarak artar. 30 dereceden büyük açılar için mutlak hata azalır, ancak yüzde hata artar. Aslında, açı büyük olduğunda devre yaklaşımından elde edilen sonuçlar, her iki yöntemle hesaplanan mutlak değer olarak oldukça küçük olsa bile, alan yaklaşımından elde edilen sonuçlardan birkaç kat daha yüksek olabilmektedir.

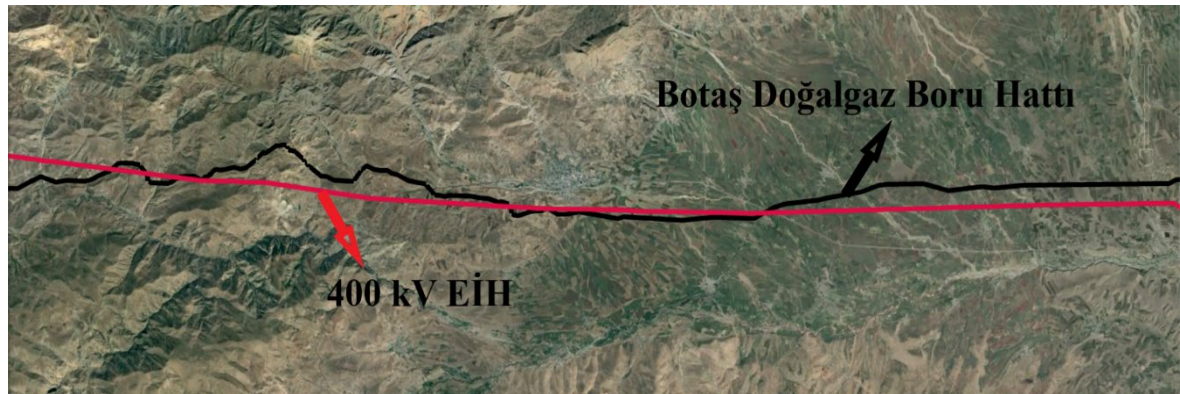
Tezde incelenen doğal gaz boru hattı 48 inç çapında ve 1,5 metre yer altına tesis edilmiştir. Elektromanyetik girişim benzetiminde boru hattı kaplama kalınlığı ve direnci sırasıyla 0,1 cm ve $25.000 \Omega \cdot m^2$ olarak alınmıştır. 400 kV ve 154 kV direk toprak geçiş dirençleri sırasıyla 15Ω ve 20Ω olarak seçilmiştir. 400 kV ve 154 kV EİH'ları sırasıyla tek devre

3x1272 MCM ACSR Pheasant ve tek devre 1272 MCM ACSR Pheasant faz iletkenlerine sahiptir. 1272 MCM iletkenin özellikleri Çizelge 4.1’de verilmektedir.

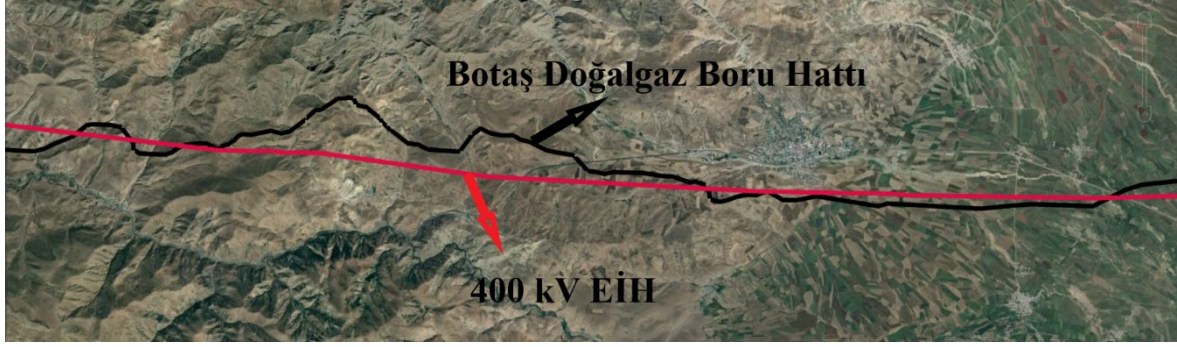
Çizelge 4.1. Pheasant iletken özellikleri

Pheasant İletken Özellikleri	
Kesit AGW cir.mil	1272000
Toplam İletken Kesiti (mm ²)	726,79
Alüminyum	54x3,90
Çelik	19x2,34
Eş değer Bakır Kesiti mm ²	405,7
Anma Çelik Çapı mm	11,7
Anma İletken Çapı mm	35,1
Anma Kopma Yüğü kgf	20357
20°C de DC direnci	0,0499
Anma birim Ağırlığı kg/km	2423,5
Nihai Elastisite Modülü (kg/mm ²)	6800
Ortalama Isıl Uzama Katsayısı (1/°Cx10 ⁻⁶)	19,4
Akım Taşıma Kapasitesi	1000

Harita 4.1.’de 400 kV EİH ile boru hattının paralel güzergâhlar izlediği bölge, Harita 4.2.’de ise 400 kV EİH ile boru hattının 5 kez kesiştiği 42,5 km’lik bölge verilmiştir. EİH ve boru hattı 42,5 km’lik inceleme bölgesinin dışında birbirinden uzaklaştığından, elektromanyetik girişim incelenmemiştir.

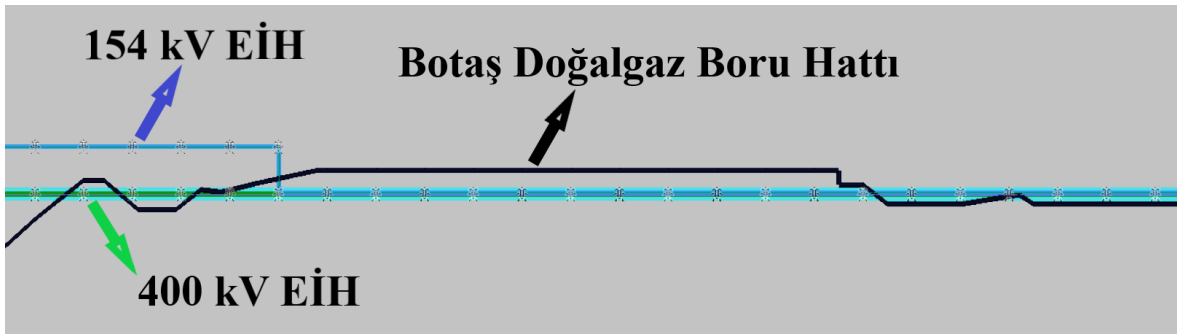


Harita 4.1. 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH ve BOTAŞ boru hattı



Harita 4.2. 400 kV Erzurum III (Horasan) -Ağrı EİH ve BOTAŞ boru hattının kritik kesişim bölgesi

ROW uygulaması elektromanyetik girişim hesaplarını yapabilmesi için ilk olarak CDEGS' in Tools bölümünde yer alan ROWCAD kullanılmaktadır. ROWCAD ile EİH ve boru hattı güzergâhı, EİH direklerin her bir faz ile topraklama iletkenlerinin yerden yatay ve düşey mesafesi, EİH direkleri arası mesafe, her bir fazın gerilim değeri ve açısı, faz ve toprak iletkenlerinin fiziksel özellikleri ve fazlar arası mesafe, faz toprak iletkeni arası mesafe, faz boru hattı arası mesafe, boru hattı koruma sistemleri, boru hattı tesis derinliği, boru hattı çapı, et kalınlığı, kaplama kalınlığı ile kaplama elektriksel özellikleri, incelenen güzergâhın toprak öz direnci ve EİH' nın bağlı olduğu trafo merkezi topraklama değeri uygulamaya yüklenmiştir. ROWCAD programı boru hattı ile EİH arasını farklı bölümlere ayırarak her bir bölümün empedans değerlerini hesaplamaktadır. 400 kV ve 154 kV EİH ile Horasan-Ağrı boru hattının ROWCAD'da hazırlanmış güzergâh benzetimi Şekil 4.1.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. 400 kV ve 154 kV EİH ile doğalgaz boru hattı ROWCAD güzergâhı

4.1. Güvenli Gerilim Sınır Değerleri

Columbia Üniversitesi'nde George Bodier ve diğer araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, yetişkin bir erkek insan vücudu için ortalama elden ele veya el-ayak direncinin 600Ω ile $10\,000 \Omega$ aralığında olduğu belirtilmektedir (NACE SP0177-2014). Vücut akımlarını tahmin etmek amacıyla makul bir güvenli değer, elden ele veya elden ayağa 1500Ω değeri kabul edilmektedir. C.F.Dalziel çalışmasında, elektrik kazalarında kas kasılması üzerine elektrik akım kaynağını serbest bırakmama değeri, yetişkin insanlar için 6 ila 20 mA aralığında gerçekleşmektedir. 10 mA akım elden ele veya elden ayağa genellikle en yüksek güvenli bırakma akımı olarak belirlenir. 1500Ω 'luk bir yüke uygulanan 15 V AC, 10 mA'lık bir akım akışı sağlar; bu nedenle bu standarttaki kıstas 15 V olarak belirlenmiştir. İhtiyatlı tasarım, belirli koşullar altında daha da düşük bir değer önerebilir (NACE SP0177-2014).

OSHA (Occupational Safety And Health Act) yönergesine göre ise normalde maruz kalınmayan ancak sistem operatörleri tarafından maruz kalınabilecek bölümlerde temas gerilimi 50 V değeri olabilir. Elektrik şokuna maruz kalan operatörün vücut akımını 5 mA de sınırlamak için vücut direnci ve toprak direnci kullanarak hesaplamalar yapıp alınacak önlemler ile temas gerilimi sınır değeri buluna bilinir. 50 V değeri, operatörün elektriksel önlemleri aldığı kabul edilerek belirlenmektedir. Analiz hesaplaması teçhizat ve personel güvenliği sağlamak açısından önemlidir (IEEE Std 2746™-2020).

4.2. EİH'nin Boru Hattına Elektriksel Etki Mesafeleri

Boru hattını etkileyen elektromanyetik girişimler, tesis yerinin kırsal veya yerleşim yeri olması durumuna göre farklılıklar göstermektedir. Kırsal bölgelerde, toprak öz direncinin $3000 \Omega.m$ 'nin altında olan bölgelerde EİH ile metalik boru hattı arasında 1000 m'lik bir girişim mesafesi dikkate alınmalıdır. Toprak öz direnç değeri $3000 \Omega.m$ 'den büyük olan bölgelerde, girişim mesafesi toprak öz direnci $\Omega.m$ cinsinden değeri 3 bölünerek bulunur. Örneğin toprak öz direnci $4500 \Omega.m$ olan bir bölgede tesis edilmiş EİH'nin elektromanyetik girişim etkisi 1500 m uzaklığa kadar olmaktadır (BS EN 50443: 2011).

Yerleşim bölgelerinde ise alt yapı tesisleri ve bina temel topraklaması ve benzeri metal yapılar dikkate alındığında, girişim mesafesi azalmaktadır. Toprak öz direnci $3000 \Omega.m$ 'den

az bölgelerde girişim mesafesi 300 m'den az olmamalıdır. Toprak öz direnci $3000 \Omega.m$ 'den büyük olan yerlerde; $\Omega.m$ değerinin onda biri girişim mesafesi olarak dikkate alınmalıdır (BS EN 50443: 2011).

4.3. EİH'nin Boru Hattına Yaklaşım Sınır Mesafeleri

BS EN 50443:2011 standardına göre EİH kısa devre arızasından korunmak için sınır mesafeler;

- İşletme gerilimi 50 kV veya daha altında olan EİH direğine en yakın görünen kısmından 5 m,
- İşletme gerilimi 50 kV veya daha yüksek olan direk topraklama kablosu bulunan EİH'lerinde direğe en yakın görünen kısmından 20 m,
- İşletme gerilimi 50 kV veya daha yüksek olan direk topraklama kablosu olmayan EİH'lerinde, direğe en yakın görünen kısmından 100 m.

Elektrik Tesisleri Kuvvetli Akım Yönetmeliğine (EKAD, 2000) göre EİH kısa devre arızasından korunmak için sınır mesafeler;

170 kV değerine kadar yer altı kabloları

- Paralel veya yakın tesis edilme mesafesi 0,6 metre
- Kesişim Mesafesi 0,4 metre

Havai hatlar

- 0-72 kV paralel veya yakın tesis edilme mesafesi en düşük 4 metre,
- 72-420 kV paralel veya yakın tesis edilme mesafesi en düşük 10 metre,
- 0-72 kV kesişim mesafesi 3 m,
- 72-420 kV kesişim mesafesi 10 m,
- 0-420 kV EİH direği veya trafo merkezi topraklamasına mesafe en düşük 2 m.

EİH paralel veya yakın tesis edilmiş boru hattı vana, pompa istasyonu veya elektriksel olarak kaplamasız olan metal yüzeylerde 0-72 kV en küçük mesafesi 10 metre, 72-420 kV ise 30 metre olarak belirlenmiştir.

Boru Hatları İle Petrol Taşıma A.Ş. Genel Müdürlüğü (BOTAŞ), Ham Petrol ve Doğal Gaz Boru Hattı Tesislerinin Yapımı ve İşletilmesine Dair Teknik Emniyet Ve Çevre Yönetmeliği'ne göre (BOTAŞ, 2021);

- 0-66 kV EİH, trafo merkezi, güneş enerji santrali ve benzer elektrik tesislerine paralel veya yakın tesisi edilme en düşük mesafesi 20 metre,
- 66-420 kV EİH, Trafo Merkezi, Güneş Enerji Santrali ve benzer Elektrik Tesislerine paralel veya yakın tesisi edilme en düşük mesafesi 40 metre,
- EİH ile paralel veya yakınına tesis edilmiş boru hatları BOTAŞ yönetmeliğine göre alınan önlemler ile 0-66 kV için 20 metre olan güvenlik mesafesi 10 metreye, 66-420 kV EİH'de ise 40 metre olan güvenlik mesafesi 30 metre olarak tesis edilebilmektedir.

5. MODELLEME VE BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde Ağrı-Horasan doğal gaz boru hattının modelleme ve benzetim çalışmalarında Google Earth ve CDEGS bilgisayar programları kullanılmıştır. Boru hattı ile 154 kV ve 400 kV EİH koordinatları, Google Earth programına yüklenmektedir. Boru hattı ile 154 kV ve 400 kV EİH'nin, Google Earth programında bulunan güzergâhları, kritik olan paralel ve kesiştiği bölümler dâhil dikkatlice ölçülüp CDEGS'in ROWCAD uygulamasına yüklenmektedir. Müteakiben ROWCAD uygulaması ile EİH'lerinin ve boru hattının mekanik ve elektriksel değişkenleri benzetim çalışmasına aktarılmış ve aktarılan bilgiler ROW programı kullanılarak elektromanyetik girişimler hesaplanmıştır.

Öncelikle 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH ve 154 kV Horasan-Ağrı EİH'lerinde herhangi bir kısa devre arızası olmadığı, faz gerilimlerinin dengeli olduğu, olağan işletme koşullarında ve boru hattının katodik koruma ile korunduğu durumda boru hattında oluşan elektromanyetik girişimler incelenmiştir.

İkinci olarak 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH'inde 3 faz kısa devre arızası olduğu kabul edilip; EİH direklerinin toprak geçiş dirençleri olarak 5 Ω ile 100 Ω arasında farklı değerler verilerek, toprak geçiş direnç değişimi ile boru hattında oluşan dokunma ve adım gerilim değerleri analiz edilmiştir.

Üçüncü kısımda 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH'inde 3 faz kısa devre arızası olduğu kabul edilip; toprak öz direnci olarak 25 Ω .m ile 300 Ω .m arasında farklı değerler verilip, toprak öz direnci değişiminin boru hattında oluşan dokunma ve adım gerilim değerlerine etkisi incelenmiştir.

Dördüncü kısımda 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH'inde 3 faz kısa devre arızası sırasında kesişim bölgesinde oluşan yüksek elektromanyetik girişimleri azaltmak amacıyla iki farklı yöntem uygulaması incelenmiştir. Bu uygulamalardan birincisi kesişim bölgesinde boru hattına paralel bakır kablo kullanımı, ikincisi ise boru hattı üstünde bakır ağ kullanımıdır.

Beşinci kısımda 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH’inde 3 faz kısa devre arızası sırasında EİH direklerinin farklı toprak koruma teli kullanımı ile boru hattında oluşan dokunma, adım ve kaplama gerilimine etkisi analiz edilmiştir.

Son kısımda Ağrı- Erzurum boru hattında katodik korumanın olmaması veya bir nedenden dolayı çalışmaması durumunda boru hattında normal işletme ve üç faz kısa devre arızası sırasında boru hattını etkileyen girişim gerilimleri incelenmiştir.

5.1. 400 kV ve 154 kV EİH’nde Normal İşletme Durumu

Modelleme çalışmasında ilk olarak 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH ile 154 kV Horasan–Ağrı EİH herhangi bir arızanın, dengesiz akımın, dengesiz gerilimin olmadığı ve boru hattında katodik koruma yapıldığı, faz gerilimlerinin mutlak değeri; 400 kV için 231 kV, 154 kV için 89 kV olduğu, A faz açısının 0° , B faz açısının -120° ve C faz açısının -120° olduğu işletme koşulları incelenmiştir. CDEGS programının Right of Way programında Ağrı- Erzurum boru hattında oluşan 1 cm^2 kesit alandaki akım yoğunluğu ve dokunma gerilimi hesaplanmıştır. ROW ile hesaplanan değerler Çizelge 5.1.’de verilmektedir.

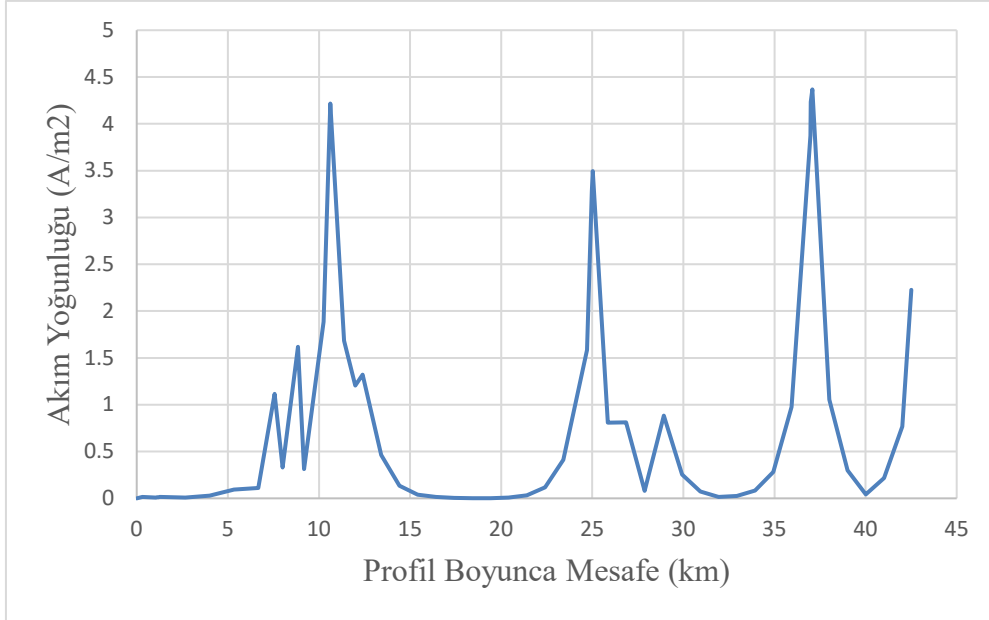
Çizelge 5.1. İşletme durumunda 1 cm^2 kesit akım yoğunluğu ve dokunma gerilimi

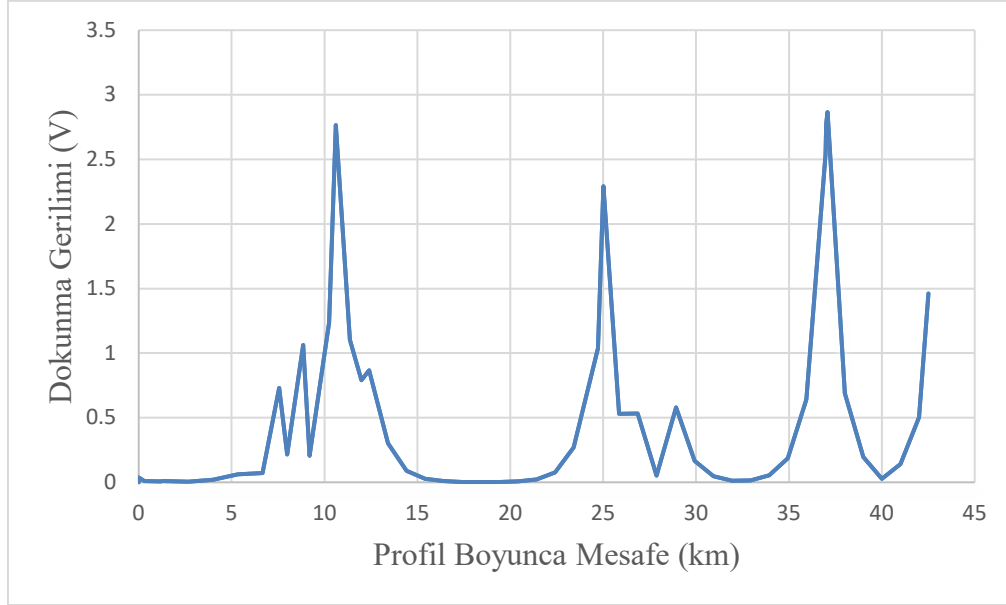
Olağan işletme durumunda boru hattına etki eden girişimler			
	Profil Boyunca Mesafe (km)	1 cm^2 Kesit Akım Yoğunluğu (A/m^2)	Dokunma Gerilimi (V)
1	0	0	0
2	1,06	0,01	0,007
3	5,34	0,094	0,062
4	8,85	1,62	1,062
5	10,62	4,216	2,765
6	13,42	0,462	0,303
7	17,42	0,006	0,004
8	21,42	0,034	0,023
9	25,03	3,497	2,293
10	30,94	0,074	0,048

Çizelge 5.1. (devam) İşletme durumunda 1cm² kesit akım yoğunluğu ve dokunma gerilimi

11	37	4,368	2,864
12	40,02	0,041	0,027
13	42,52	2,228	1,461

1cm² kesit akımı ve dokunma gerilim değerlerinin diğer kısımlara göre yüksek olduğu 8,85 km, 10,62 km, 25,03 km’de boru hattı 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH’in altından geçiş yaptığı ve en yüksek artışın olduğu 37. km’de ise boru hattının geçiş yaptığı bölümde EİH direğine yaklaşık 10 m yakınından geçtiği tespit edilmiştir. Normal işletme koşullarında Şekil 5.1. de 1 cm² kesit akım yoğunluğu, Şekil 5.2’de ise dokunma gerilimi verilmektedir.

Şekil 5.1. Normal İşletme koşulunda 1 cm² kesit akım yoğunluğu



Şekil 5.2. Normal işletme koşulunda dokunma gerilimi

5.2. Kısa Devre Arızasında 400 kV EİH Direk Toprak Direncinin Değişimi

Türkiye'de EİH direk toprak direncinin 10Ω ve altına düşürülmesi hedeflenmektedir (TEİAŞ, 2022). Ancak taşlı ve kayalık alanlar gibi bazı özel topraklarda 10Ω değerine ulaşmak çok zordur. Bu topraklama direncinin nispeten yüksek olduğu dağlık ve taşlık bölgeler Türkiye'de oldukça yaygındır. 10Ω 'dan yüksek toprak geçiş direncine sahip EİH direkleri işletmede bulunmakta olup, EİH direkleri toprak koruma teli ile birbirleriyle irtibatlı olduğundan EİH toplam empedans değerine etkisi, EİH'ndeki direk sayısı arttıkça azalmaktadır. İlk olarak, Ağrı-Horasan bölgesinde 400 kV EİH için farklı direk topraklama dirençlerinde indüklenen gerilimlere etkisi incelenmiştir.

400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH'inde bulunan tüm direklerin toprak geçiş direnci sırasıyla 5Ω , 15Ω , 50Ω ve 100Ω olduğu kabul edilip benzetim çalışmaları yapılmıştır. EİH'nin direk toprak direnci arttıkça, boru hattında oluşan dokunma ve adım voltaj değerleri farklılıklar göstermektedir. EİH'nde kısa devre olduğu zaman kısa devre akımının bir kısmı direk koruma telinden EİH'nin bağlı olduğu trafo merkezlerine, bir kısmı ise direk ayaklarında yapılan topraklama ile toprağa akmaktadır. EİH direk toprak geçiş direnci azaldıkça direktan toprağa akan kısa devre akımı artmaktadır. Bu durumda direk yakınlarında toprak potansiyelinin yükselmesine neden olmaktadır. EİH'inde oluşan kısa devre arızasının etkisi boru hattının direklere olan tesis mesafesi ile ters orantılıdır. Boru

hattı EİH direğinden uzaklaştıkça kısa devre akımının boru hattı yüzeyinde oluşturacağı gerilim ve akım değerleri azalmaktadır. Kısaca özetlenirse; boru hattında oluşan elektromanyetik girişimler kısa devre akım değeri ve direk toprak geçiş direnci ile doğru; boru hattı ve EİH tesis mesafesi ile ters orantılı olarak değişmektedir. EİH kısa devre akımı ile direk toprak geçiş direnci değerinin çarpımı EİH direği yakınındaki toprak gerilim yükselmesi değerini vermektedir. Çizelge 5.2. ve Çizelge 5.3. deki dokunma ve adım gerilimlerini inceler isek, bazı bölgelerde toprak geçiş direnci yüksek olmasına rağmen; dokunma ve adım geriliminin daha da yüksek olduğu görülmektedir. Burada ikinci bir etkinin, boru hattının EİH direğine olan tesis mesafesi olduğu görülmektedir. EİH direklerinde toprak geçiş direnci artması ile toprağa akan kısa devre akımı azalmakta, ancak geçiş direncinin kısa devre akımı ile çarpımı sonucu topraktaki potansiyel yükselmesi, aynı koşullarda toprak geçiş direnci düşük olan direklerin toprak potansiyel yükselmesinden yüksek olmaktadır. Boru hattı kısa devre arızası olan direğin yakınında ise, girişim gerilimleri artmaktadır. Toprak geçiş direncinin artışında girişim gerilimlerinin mutlak değer olarak en fazla artışın olduğu 37. km de boru hattı EİH' nın altından geçiş yapmakta ve geçiş yaptığı kısımda EİH direğine 10 m yaklaşmaktadır. Burada hem dokunma ve hem de adım gerilimleri 37. km'de en yüksek değerde olmuştur (bkz. Çizelge 5.2. ve Çizelge 5.3.).

Çizelge 5.2. Kısa devre arızasında direk toprak direnci değişimine göre dokunma gerilimi

DOKUNMA GERİLİMİ					
	Profil Boyunca Mesafe (km)	Toprak Geçiş Direnci 5 Ω	Toprak Geçiş Direnci 15 Ω	Toprak Geçiş Direnci 50 Ω	Toprak Geçiş Direnci 100 Ω
1	0	0,74	0,66	0,66	0,8
2	1,01	0,17	0,15	0,14	0,12
3	2,01	0,26	0,24	0,2	0,25
4	3,02	0,48	0,43	0,39	0,37
5	4,02	0,41	0,39	0,37	0,35
6	5,03	4,14	3,98	3,77	3,61
7	6,03	16,57	15,93	15,13	14,57
8	7,05	16,39	15,78	15,07	14,69
9	8,01	6,54	5,88	5,46	5,3
10	9,03	5,88	4,85	4,92	5,57
11	10,03	20,59	15,44	11,23	10,82

Çizelge 5.2. (devam) Kısa devre arızasında direk toprak direnci değişimine göre dokunma gerilimi

12	11,03	8,29	7,1	6,68	6,47
13	12,05	16,42	15,8	14,9	14,58
14	13,02	18,16	17,51	16,56	16,23
15	14,03	4,8	4,2	3,96	3,89
16	15,03	6,46	4,04	2,73	2,05
17	16,03	5,9	4,28	2,57	1,96
18	17,03	4,07	4,06	1,98	1,45
19	18,03	6,47	4,33	2,73	2,07
20	19,03	6,02	4,1	2,6	1,97
21	20,03	4,2	4,42	2,04	1,5
22	21,03	6,65	4,18	2,81	2,13
23	22,03	6,85	4,9	3,01	2,23
24	23,03	8,01	7,08	4,15	3,65
25	24,03	21,96	20,03	18,44	17,27
26	26,02	11,53	7,65	7,01	6,61
27	27,02	12,29	9,25	6,1	5,67
28	28,03	10,15	6,69	5,07	5,45
29	29,04	8,85	6,83	6,23	5,83
30	31,04	8,15	6,59	4,17	3,69
31	32,04	10,07	5,75	4,58	4,08
32	33,04	6,98	6,59	4,02	3,61
33	34,04	8,75	6,11	4,14	3,44
34	35,04	13,43	8,7	5,24	3,83
35	36,04	15,45	12,09	10,76	10,02
36	37	137,05	273,42	352,6	439,73
37	38,02	9,62	8,98	8,07	7,51
38	39,02	11,03	7,44	5,54	5,02
39	40,02	6,12	4,51	3,39	3,02
40	41,02	4,15	5,59	2,46	2,37
41	42,02	14,04	11,65	11,00	10,51
42	42,52	95,48	93,78	90,84	86,93

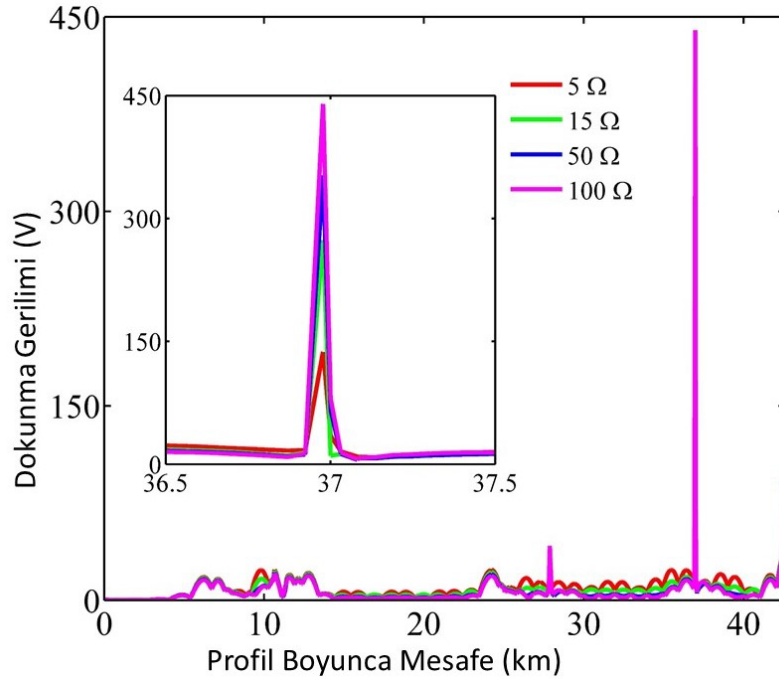
Çizelge 5.3. Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre adım gerilimi

ADIM GERİLİMİ					
	Profil Boyunca Mesafe (km)	Toprak Geçiş Direnci 5 Ω	Toprak Geçiş Direnci 15 Ω	Toprak Geçiş Direnci 50 Ω	Toprak Geçiş Direnci 100 Ω
1	0	0,0057	0,0051	0,0056	0,007
2	1,01	0,0009	0,0007	0,0011	0,0016
3	2,01	0,0006	0,0008	0,0015	0,0022
4	3,02	0,0007	0,0009	0,0018	0,0027
5	4,02	0,0029	0,0028	0,0029	0,0042
6	5,03	0,0101	0,0097	0,0091	0,0085
7	6,03	0,0197	0,0189	0,0177	0,0167
8	7,05	0,0158	0,0152	0,0147	0,017
9	8,01	0,0401	0,0333	0,0317	0,0311
10	10,03	0,0723	0,0694	0,0652	0,0633
11	11,03	0,1541	0,1481	0,1408	0,1379
12	12,00	0,0494	0,0421	0,039	0,0381
13	13,02	0,0289	0,028	0,0269	0,0265
14	14,03	0,0103	0,0101	0,0098	0,0096
15	15,03	0,007	0,0021	0,0024	0,0035
16	16,03	0,0026	0,0033	0,0023	0,0032
17	17,03	0,0047	0,0021	0,0025	0,0031
18	18,03	0,0074	0,0034	0,0027	0,0033
19	19,03	0,0028	0,0022	0,0026	0,0032
20	20,03	0,0049	0,0035	0,0026	0,0031
21	21,03	0,0077	0,0021	0,0026	0,0033
22	22,03	0,0035	0,0049	0,0039	0,0038
23	23,03	0,0144	0,0139	0,013	0,0123
24	24,03	0,0197	0,0187	0,0171	0,016
25	25,03	0,2447	0,2338	0,2168	0,2047
26	26,02	0,0449	0,0425	0,0396	0,0379
27	27,02	0,0444	0,0284	0,0246	0,0228

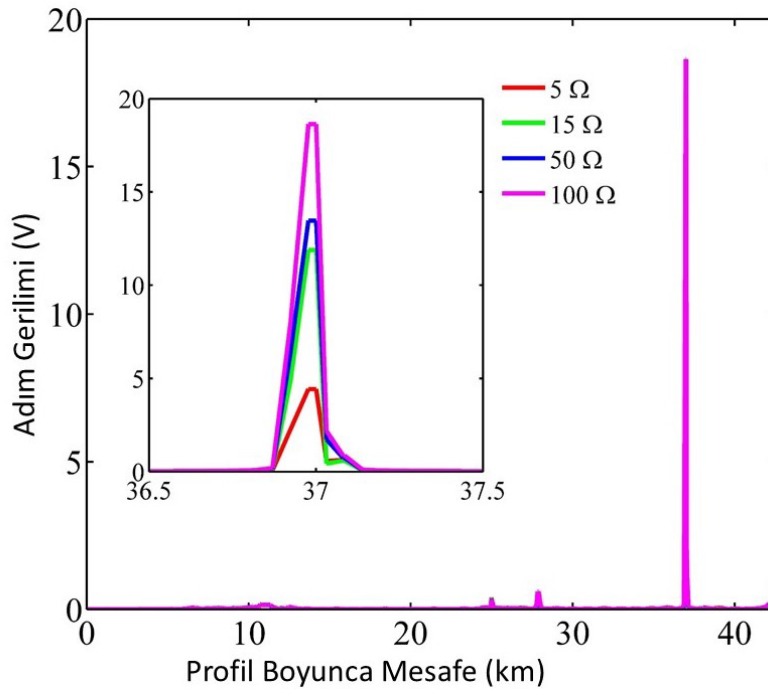
Çizelge 5.3. (devam) Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre adım gerilimi

28	28,03	0,02	0,023	0,0693	0,1098
29	29,04	0,0354	0,033	0,0305	0,0306
30	30,04	0,0262	0,0197	0,0105	0,019
31	31,04	0,0252	0,0153	0,0081	0,0149
32	32,04	0,0365	0,0181	0,0081	0,0176
33	34,04	0,0264	0,0186	0,0085	0,0154
34	35,04	0,033	0,0126	0,0147	0,0202
35	36,04	0,0549	0,0436	0,0387	0,0362
36	37	4,433	11,8873	13,4635	18,6409
37	38,07	0,0586	0,0545	0,0484	0,0456
38	39,02	0,0492	0,0273	0,0126	0,0147
39	40,02	0,0249	0,0169	0,0089	0,0098
40	42,02	0,137	0,14	0,1395	0,1351
41	42,52	0,9531	0,9321	0,9003	0,8605

Topraklama kulesi geçiş direnci 5 Ω ile 100 Ω arasında değişirken, dokunma ve adım gerilimlerinin değişimi sırasıyla Şekil 5.3. ve 5.4.'de gösterilmiştir. Mevcut çalışmada, kararlı hal elektromanyetik girişim analizinde EİH direklerinin toprak geçiş direnci 15 Ω seçilmiştir. Bu direnç 5 Ω olduğunda, indüklenen dokunma ve adım gerilimleri, 15 Ω durumuna göre sırasıyla %49,87 ve %62,74 azalmaktadır. Benzetim sonucuna göre EİH yakınına tesis edilmiş boru hatlarında oluşan elektromanyetik girişim gerilim değerinin güvenlik sınırlarını aştığı durumlarda, söz konusu EİH direğinin toprak geçiş direnç değerini topraklama çalışmaları ile düşürmek çözüm önerilerinden biri olabilmektedir (Çetin ve diğerleri, 2021). Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'de toprak geçiş direnci değişimine göre yukarıda verilen tablolar grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 5.3. Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre dokunma gerilimi



Şekil 5.4. Kısa devre arızasında toprak geçiş direnci değişimine göre adım gerilimi

5.3. Kısa Devre Arızasında Toprak Özdirencinin Değişimi

Bu kısımda toprak özdirenci değişiminin boru hattı dokunma ve adım gerilimine etkisi incelenmektedir. Çizelge 5.4. ve Çizelge 5.5.'de tablo halinde toprak özdirenç değişkeni 25 $\Omega.m$ ile 300 $\Omega.m$ arasında oluşan dokunma ve adım gerilimleri hesaplanmıştır.

Literatürde 3000 $\Omega.m$ 'ye kadar olan değerlerde toprak özdirenci için elektromanyetik girişim analizleri yapılmaktadır (El Gayar ve Abdul-Malek, 2016). Türkiye coğrafyasında 300 $\Omega.m$ 'nin üzerinde toprak özdirenci nadiren rastlandığından çalışmada toprak özdirenci 300 $\Omega.m$ ile sınırlandırılmıştır.

Toprak özdirencini sırasıyla 25 $\Omega.m$, 50 $\Omega.m$, 100 $\Omega.m$ ve 300 $\Omega.m$ olduğu kabul edilerek CDEGS' de analiz ettiğimizde; boru hattı dokunma ve adım gerilimi değişiminin toprak özdirenci ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. En yüksek dokunma ve adım gerilimi değerleri boru hattı ile EİH direğine 10 m yakın geçiş olduğu yine 37. km'de oluşmaktadır.

Çizelge 5.4. Kısa devre arızasında toprak özdirencinin değişimine göre dokunma gerilimi

DOKUNMA GERİLİMİ					
	Profil boyunca mesafe (km)	Toprak özdirenci 25 $\Omega.m$	Toprak özdirenci 50 $\Omega.m$	Toprak özdirenci 100 $\Omega.m$	Toprak özdirenci 300 $\Omega.m$
1	0	0,77	1,62	4,13	23,15
2	1,06	0,35	0,71	1,87	8,82
3	4	12,63	22,71	40,21	92,76
4	7,07	57,52	69,49	75,84	82,82
5	11,07	14,98	17,84	22,54	34,92
6	15,02	4,02	6,99	11,08	24,06
7	18,02	3,98	6,84	10,72	22,86
8	21,02	4,09	7,07	11,36	26,22
9	26,02	21,83	21,66	25,69	44,42
10	30	23,47	25,35	26,78	33,27
11	31	8,97	13,85	19,74	39,08

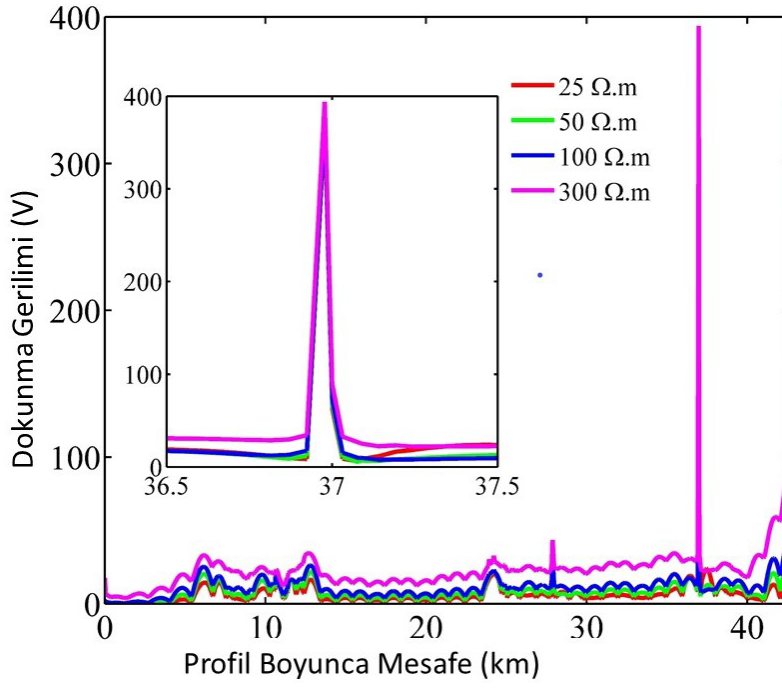
Çizelge 5.4. (devam) Kısa devre arızasında toprak öz direncinin değişimine göre dokunma gerilimi

12	34	9,53	14,09	20,76	45,14
13	37	369	374,46	380,15	393,86
14	42,07	32,13	59,91	95,79	151,97

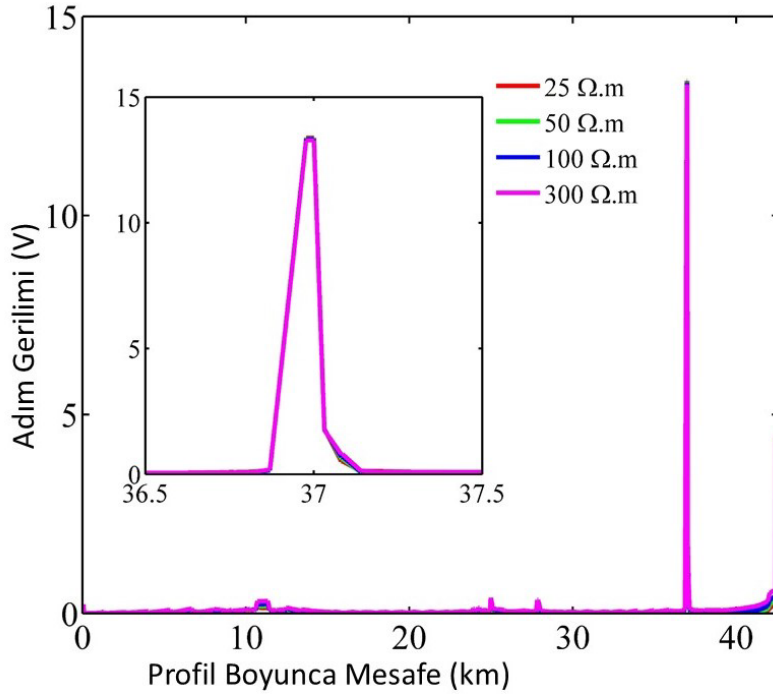
Çizelge 5.5. Kısa devre arızasında toprak öz direncinin değişimine göre adım gerilimi

ADIM GERİLİMİ					
	Profil boyunca mesafe (km)	Toprak öz direnci 25 $\Omega.m$	Toprak öz direnci 50 $\Omega.m$	Toprak öz direnci 100 $\Omega.m$	Toprak öz direnci 300 $\Omega.m$
1	0	0,003	0,006	0,018	0,121
2	1,06	0,002	0,003	0,008	0,044
3	4	0,001	0,001	0,001	0,002
4	8	0,076	0,125	0,179	0,253
5	11,07	0,381	0,468	0,562	0,715
6	15,02	0,008	0,009	0,009	0,026
7	18,02	0,008	0,009	0,011	0,033
8	21,02	0,008	0,01	0,014	0,047
9	24,02	0,017	0,034	0,062	0,12
10	27,02	0,065	0,079	0,091	0,188
11	30	0,028	0,025	0,038	0,067
12	33	0,027	0,025	0,029	0,069
13	36	0,076	0,1	0,12	0,14
14	37	13,37	13,34	13,32	13,27
15	40,07	0,021	0,026	0,051	0,145
16	42,07	0,066	0,137	0,24	0,462

Şekil 5.5. ve Şekil 5.6.'da Kısa devre arızasında toprak öz direncinin değişimine göre dokunma ve adım gerilimi değişimi grafiksel olarak verilmektedir.



Şekil 5.5. Kısa devre arızasında toprak öz direnci değişimine göre dokunma gerilimi



Şekil 5.6. Kısa devre arızasında toprak öz direnci değişimine göre adım gerilimi

5.4. Kısa Devre Arızasında 37. km’de Bakır Kablo ve Bakır Ağ Kullanımı

Tao ve diğerlerinin (2018) yaptığı çalışmada üç adet 500 kV E.İ.H. ve iki adet 220 kV E.İ.H. ile aynı koridoru kullanan metal boru hattında normal işletme ve kısa devre arızası durumlarında gerilim değerlerini düşürmeye çalışmışlardır. Bu boru hattında önlem olarak altı adet topraklama ağı kullanılmıştır. Topraklama ağları boru hattı ile kesişen bölgelerde kullanılmıştır. Topraklama ağının boyutu 60 m x 40 m, ağ göz boyutu 20 m x 20 m olup 0,8 m derinliğe gömülmüştür. Analizleri CDEGS’de gerçekleştirilmiştir. Normal işletme durumunda 15 V seviyesine çıkan boru hattı kaplama gerilimi, alınan önlemler ile 2 V değerine düşürülmüştür.

Bu tezde boru hattında indüklenen gerilimi azaltmak için kullanılan ilk ekranlama yöntemi topraklama kablosudur (Çetin ve diğerleri, 2021). Bu amaçla temas ve adım gerilimlerinin arttığı bölgede boru hattına paralel, yer altında 0,5 m derinliğe gömülü bakır topraklama kablosu kullanılmaktadır. Bu bölge, iletim hatları ile boru hattının paralel tesis edildiği Horasan tarafından Ağrı istikametinde 37 km uzaklıkta ve EİH direğine 10 m yaklaştığı geçiş kısmında uygulanmıştır. Topraklama kablosu 150 m uzunluğundadır ve topraklama kablosu yalıtılmış kablo ile boru hattına bağlanmıştır (Çetin ve diğerleri, 2021). Çizelge 5.6. ve Çizelge 5.7.’de bulunan adım ve dokunma gerilim değerleri incelendiğinde topraklama kablosu veya bakır ağ kullanılan 37. km dışında bulunan bölgelerde gerilim değerlerinin aynı olduğu, ancak 37 km topraklama kablosu kullandığında bölgede adım gerilimi %41, dokunma gerilimi %19,8 azalmıştır. Bakır ağ kullanılması durumunda ise adım gerilimi %64, dokunma gerilimi ise %47,9 azalmıştır.

Çizelge 5.6. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ile bakır ağ kullanımına göre adım gerilimi

Adım Gerilimi				
	Profil boyunca mesafe (km)	Korumasız	Bakır Kablo	Bakır Ağ
1	0	0,005	0,005	0,005
2	1	0,001	0,001	0,001
3	4,01	0,002	0,002	0,002
4	8	0,033	0,033	0,033

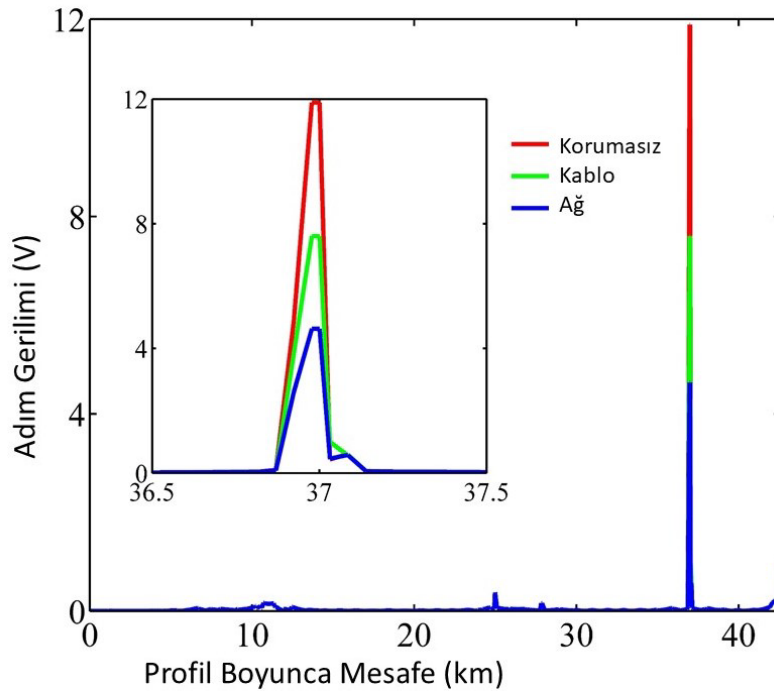
Çizelge 5.6. (devam) Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ile bakır ağ kullanımına göre adım gerilimi

5	12,04	0,039	0,039	0,039
6	16,02	0,003	0,001	0,001
7	20,02	0,003	0,002	0,002
8	23,07	0,015	0,015	0,015
9	27,01	0,028	0,028	0,028
10	31,03	0,015	0,018	0,018
11	37	12,887	7,603	4,631
12	42,51	0,932	0,931	0,931

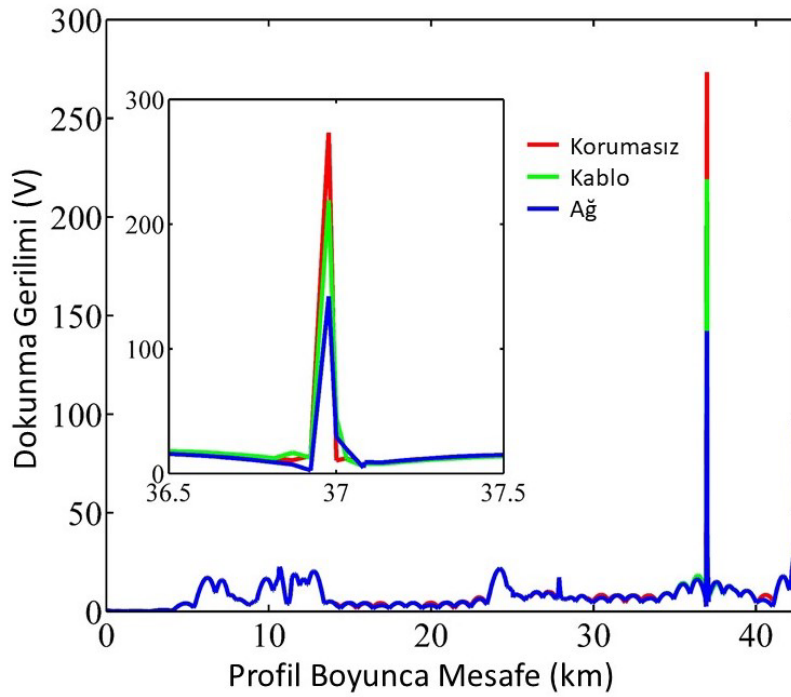
Çizelge 5.7. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ile bakır ağ kullanımına göre dokunma gerilimi

Dokunma Gerilimi				
	Profil boyunca mesafe (km)	Korumasız	Bakır Kablo	Bakır Ağ
1	0	0,65	0,65	0,65
2	4,01	0,38	0,38	0,38
3	8	5,87	5,86	5,86
4	12,04	15,79	15,81	15,81
5	16,02	4,27	4,02	4,02
7	24,02	20,02	20,02	20,02
8	28,02	6,68	6,68	6,68
9	33,03	6,58	5,3	5,3
10	37	273,41	219,17	142,22
11	42,51	93,77	93,73	93,72

Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'de 37. km’de kısa devre arızasında bakır kablo ve bakır ağ kullanımında adım ve dokunma gerilimi değişimi grafiksel olarak verilmektedir.



Şekil 5.7. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ve bakır ağ kullanımında adım gerilimi değişimi



Şekil 5.8. Kısa devre arızasında 37. km’de bakır kablo ve bakır ağ kullanımında dokunma gerilimi değişimi

5.5. Kısa devre Arızasında Çelik Toprak Koruma Yerine Alüminyum Toprak Koruma İletkeni Kullanımı

400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı E.İ.H' da direk toprak koruma iletkeni 96 mm² çelik tel olarak alınmıştır. Normal işletme koşullarında 96 mm² çelik toprak tel yerine 93 mm² alüminyum veya 200 mm² alüminyum koruma iletkeni kullanıldığında, CDEGS' de yapılan analizlere göre önemli bir fark tespit edilmemiştir (Çetin ve diğerleri, 2022). Koruma iletkeni olarak 96 mm² paslanmaz çelik seçildiğinde, dokunma gerilimi ve 1 cm² kaçak akım yoğunluğunun en yüksek değeri sırasıyla 2,864 V ve 4,368 A/m²'dir. GB6830-86 ve IEC61201 standartlarında boru hattında indüklenen voltajın güvenlik sınır değeri sırasıyla 60 V ve 33 V kabul edilmektedir (Çetin ve diğerleri, 2021), dolayısıyla boru hattında işletme sırasında indüklenen gerilim, güvenlik sınırları içinde hesaplanmıştır. Ayrıca 1 cm² kesit akım yoğunluğunun güvenli sınır değeri 30 A/m² nin altında olduğundan, boru hattına EİH kaynaklı korozyon etkisi beklenmemektedir.

400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı havai hattında üç farklı toprak koruma telinin, 3 faz kısa devre arızasında doğal gaz boru hattında oluşan adım, dokunma ve boru hattı kaplama gerilimi değerlerine etkisi incelenmiştir (Çetin ve diğerleri, 2022). Çizelge 5.8. incelediğinde; topraklama kablosu olarak 96 mm² çelik toprak teli yerine, 93 mm² veya 200 mm² alüminyum kaplama iletken kullanıldığında dokunma geriliminin tüm boru hattı boyunca azaldığı görülmektedir. Mutlak değer olarak en fazla azalmanın olduğu 37. km'de dokunma gerilimi 96 mm² paslanmaz çelik iletkenler için 247,57 V, 93 mm² alüminyum iletken için 154,96 V ve 200 mm² alüminyum kaynak iletkenleri için ise 118,21 V'a düşmektedir. Çizelge 5.8.'de dokunma gerilimi benzetim sonuçları tablo halinde verilmektedir.

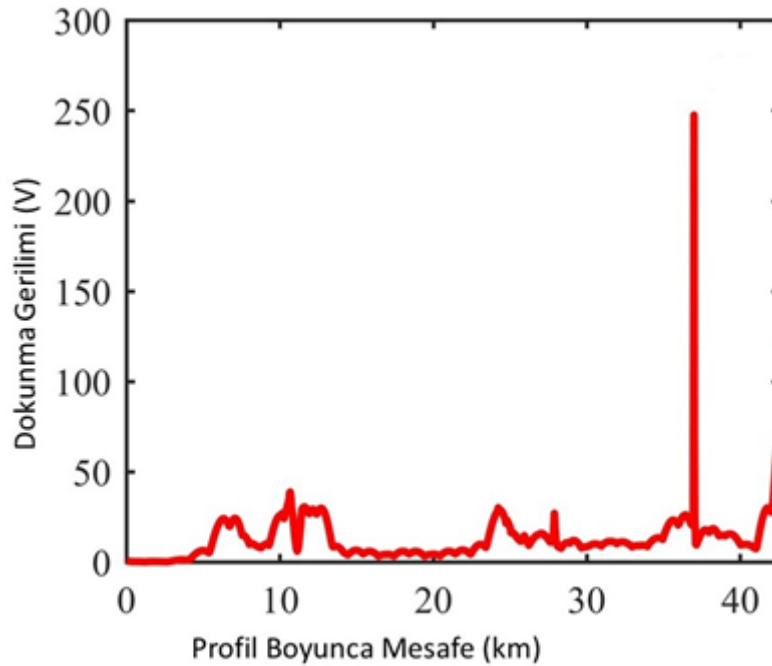
Çizelge 5.8. Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre dokunma gerilimi

Dokunma Gerilimi				
	Profil boyunca mesafe (km)	96 mm ² Çelik Tel	93 mm ² Alüminyum	200 mm ² Alüminyum
1	0	0,79	0,69	0,55
2	1	0,22	0,21	0,18
3	5,02	6,42	6,1	5,07

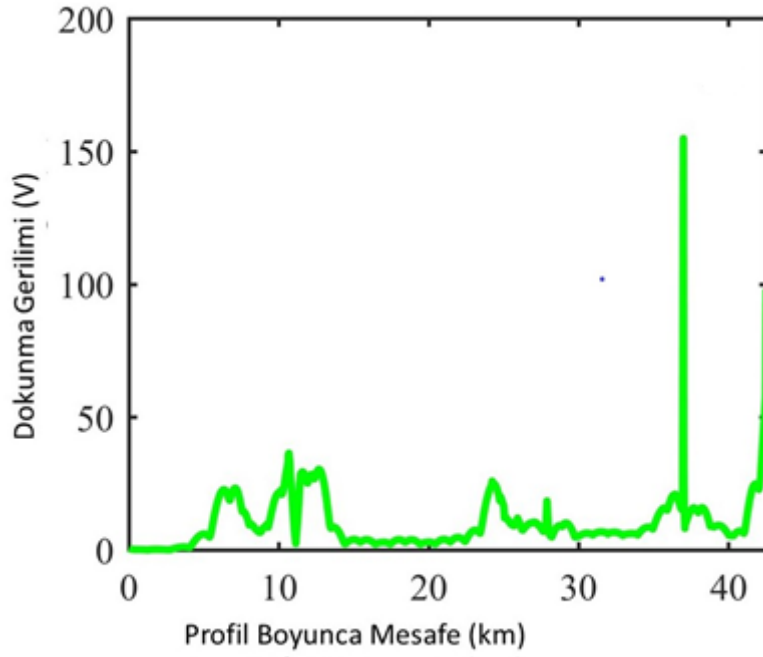
Çizelge 5.8. (devam) Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre dokunma gerilimi

4	10,02	25,89	21,7	17,56
5	12,04	28,94	27,66	23,47
6	13,01	24,48	24,76	21,79
7	17,02	4,32	3,02	2,13
8	21,02	6,05	4,08	2,84
9	24,02	26,03	22,42	17,2
10	25,02	17,32	14,18	11,12
11	29,03	11,79	10,05	7,74
12	32,08	11,03	6,62	4,15
13	37	247,57	154,96	118,21
14	40,01	9,54	5,55	5,93
15	42,51	120,13	98,32	76,58

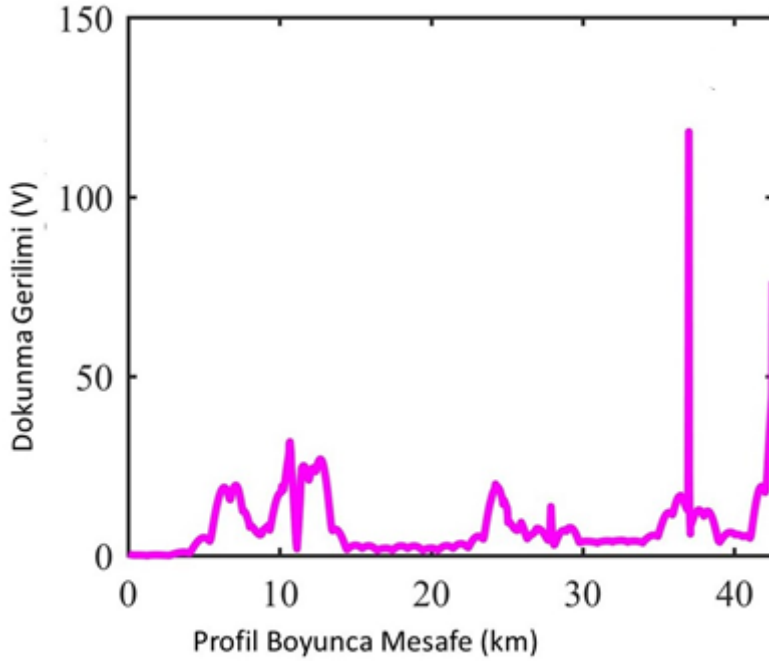
Şekil 5.9., Şekil 5.10. ve Şekil 5.11.'de sırasıyla 96 mm² çelik toprak teli, 93 mm² alumolwed ve 200 mm² alumolwed iletken kullandığımızda kısa devre arızasında, boru hattı boyunca dokunma gerilimi değişimi verilmektedir.



Şekil 5.9. Kısa devre arızasında 96 mm² çelik toprak koruma telli dokunma gerilimi



Şekil 5.10. Kısa devre arızasında 93 mm² alüminyum toprak koruma telli dokunma gerilimi



Şekil 5.11. Kısa devre arızasında 200 mm² alüminyum toprak koruma telli dokunma gerilimi

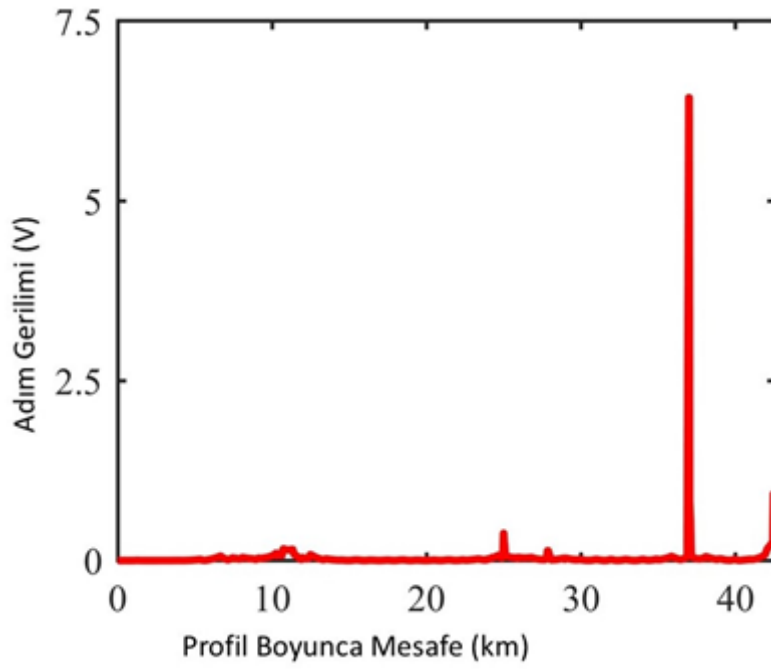
Çizelge 5.9.'u incelendiğinde topraklama kablosunun 96 mm² çelik toprak teli yerine 93 mm² veya 200 mm² alüminyum kaplama iletken kullanıldığında adım gerilimi tüm boru hattı boyunca azalmaktadır. Mutlak değer olarak en fazla azalmanın olduğu 37. km'de adım gerilimi; 96 mm² paslanmaz çelik iletkenler için 6,433 V, 93 mm² alüminyum iletken için

4,814 V ve 200 mm² alüminyum kaynak iletkenleri için 4,161 V' a düşmektedir. Çizelge 5.9' da adım gerilim benzetim sonuçları tablo halinde verilmektedir.

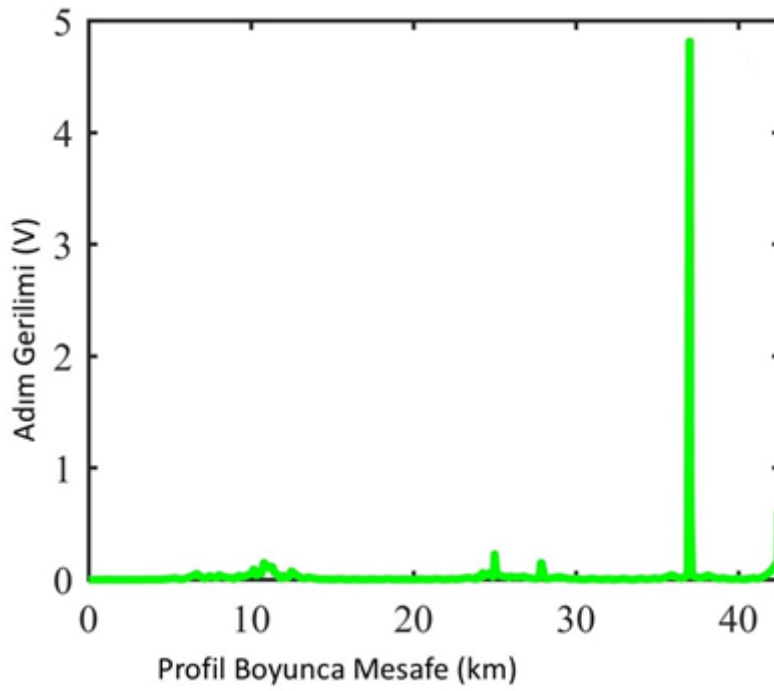
Çizelge 5.9. Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre adım gerilimi

Adım Gerilimi				
	Profil boyunca mesafe (km)	96 mm ² Çelik Tel	93 mm ² Alüminyum	200 mm ² Alüminyum
1	0	0,005	0,003	0,002
2	5,07	0,01	0,01	0,008
3	10,07	0,071	0,057	0,049
4	10,66	0,126	0,091	0,079
5	15,32	0,009	0,006	0,004
7	25,51	0,043	0,029	0,022
8	30,03	0,012	0,008	0,007
9	35,03	0,012	0,007	0,006
10	37	6,433	4,814	4,161
11	400,	0,158	0,105	0,09
11	42,51	0,926	0,592	0,461

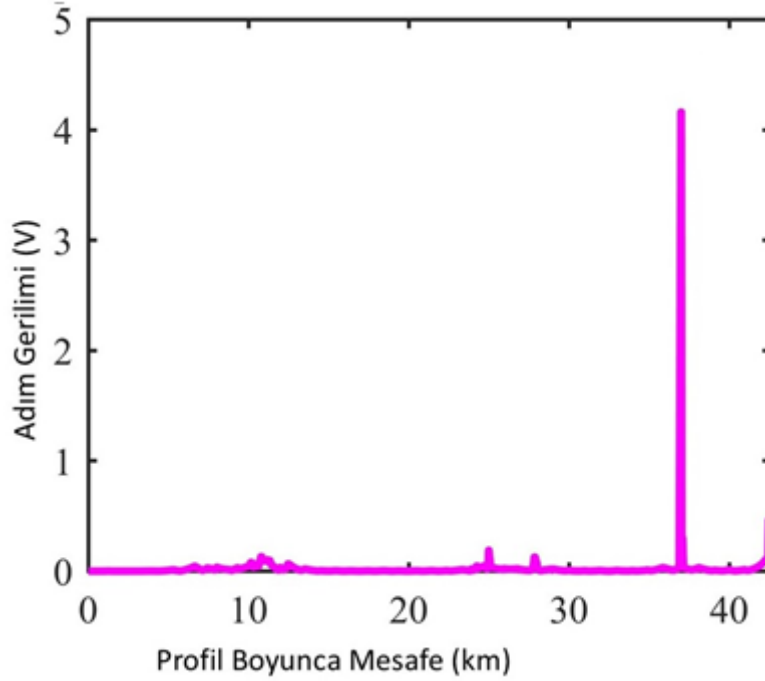
Şekil 5.12., Şekil 5.13. ve Şekil 5.14.'de 96 mm² çelik toprak teli, 93 mm² alüminyum ve 200 mm² alüminyum iletken kullandığımızda boru hattı boyunca adım gerilimi değişimi verilmektedir.



Şekil 5.12. Kısa devre arızasında 96 mm² çelik toprak koruma telli adım gerilimi



Şekil 5.13. Kısa devre arızasında 93 mm² alüminyum toprak koruma telli adım gerilimi



Şekil 5.14. Kısa devre arızasında 200 mm² alüminyum toprak koruma telli adım gerilimi

Çizelge 5.10.'da boru hattı kaplama stres gerilim değerleri verilmektedir. Boru hattı kaplama gerilimi her ne kadar katodik korumanın etkisi ile güvenli sınır değerlerinde olsa da tesis aşamasında kaplamanın zarar görmesi durumunda boru hattında oluşacak gerilim yükselmeleri, kaplama yüzeyine zarar verebilmektedir. Boru hattında oluşabilecek çatlak veya delikler korozyon hızını artırmaktadır. Topraklama kablosunun 96 mm² çelik toprak teli yerine 93 mm² veya 200 mm² alüminyum kaplama iletken kullanıldığında boru hattı kaplama gerilimi tüm boru hattı boyunca azalmaktadır. Mutlak değer olarak en fazla azalmanın olduğu 37. km'de kaplama gerilimi 96 mm² paslanmaz çelik iletkenler için 224,2 V, 93 mm² alüminyum iletken için 140,26 V ve 200 mm² alüminyum kaynak iletkenleri için 68,08 V'a düşmektedir. Çizelge 5.10.'da boru hattı kaplama gerilim benzetim sonuçları tablo halinde verilmektedir.

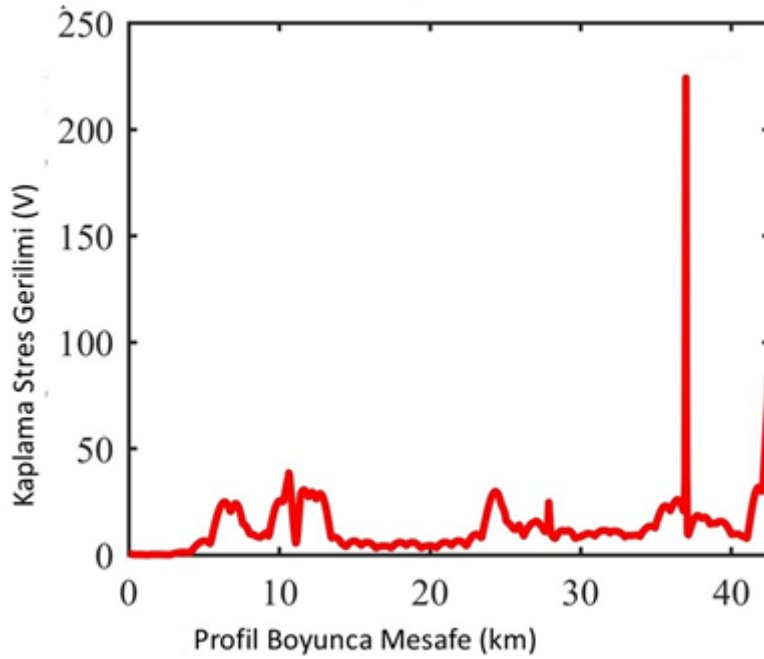
Çizelge 5.10. Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre kaplama gerilimi

Boru hattı kaplama stres gerilimi				
	Profil boyunca mesafe (km)	96 mm ² Çelik Tel	93 mm ² Alüminyum	200 mm ² Alüminyum
1	0	0,63	0,56	0,44
2	1	0,23	0,22	0,18

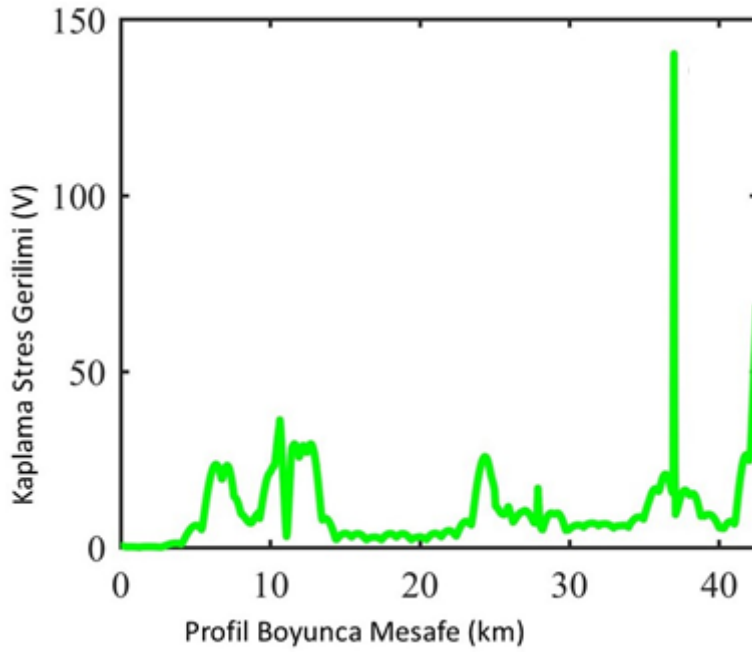
Çizelge 5.10. (devam) Kısa devre arızasında farklı koruma iletkeni kullanımına göre kaplama gerilimi

3	5,02	6,68	6,35	5,28
4	7,04	24,13	23,22	19,54
5	10,02	25,56	21,78	18,8
6	14,02	6,58	6,54	5,62
7	18,02	6,01	4	2,79
8	22,02	6,56	4,77	3,34
9	26,01	12,48	10,24	7,93
10	30,03	8,97	5,52	4,11
11	34,03	10,22	6,73	4,29
12	37	224,2	140,26	68,08
13	40,01	9,73	5,66	6,08
14	42,51	84,37	69,06	53,79

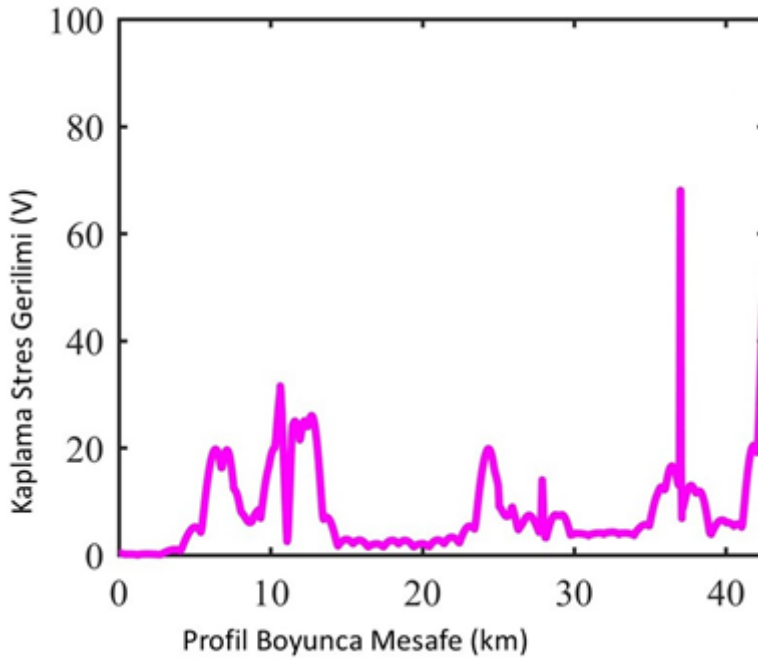
Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17.'de 96 mm² çelik toprak teli, 93 mm² alumolwed ve 200 mm² alumolwed iletken kullanıldığında boru hattı boyunca boru hattı kaplama gerilimi değişimi verilmektedir.



Şekil 5.15. Kısa devre arızasında 96 mm² çelik toprak koruma telli kaplama stres gerilimi



Şekil 5.16. Kısa devre arızasında 93 mm² alüminyum toprak koruma telli kaplama stres gerilimi



Şekil 5.17. Kısa devre arızasında 200 mm² alüminyum toprak koruma telli kaplama stres gerilimi

Aynı koşullar için dokunma, adım ve kaplama gerilimi açısından en yüksek değer 96 mm² paslanmaz çelik iletkenlerde görülmektedir. 200 mm² alüminyum iletken 93 mm² alüminyum iletkenine göre daha düşük dokunma, adım ve kaplama gerilimi değerleri bulunmaktadır. Bu

değerlerden aynı özellikte olan iletkenlerde kesit artıktıkça kısa devre arızasında boru hattında oluşan girişim gerilimleri azalmaktadır.

5.6. Katodik Korumasız İşletme Koşullarında Boru Hattında Oluşan Elektromanyetik Girişimler

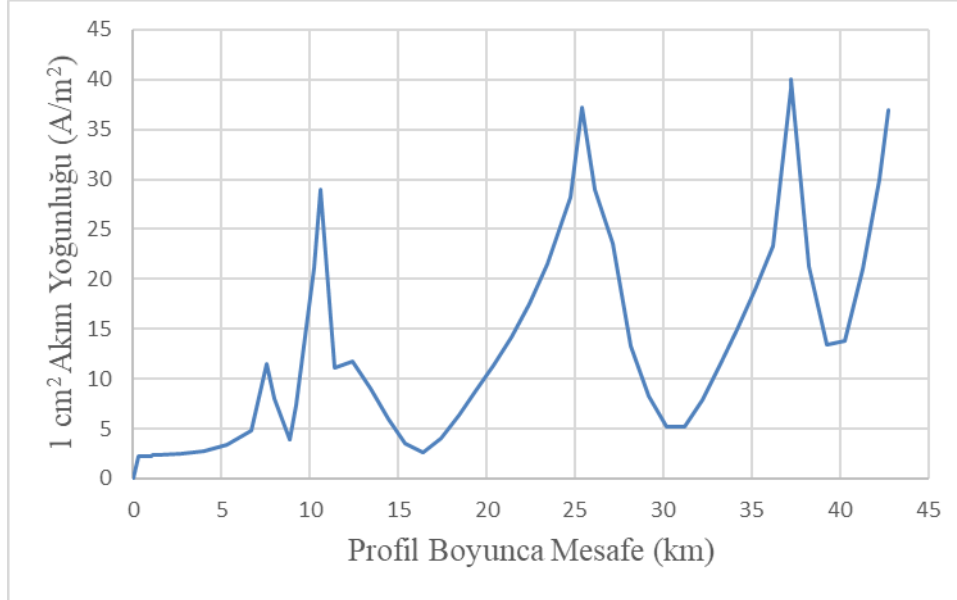
Modelleme ve benzetim çalışmalarında Ağrı- Erzurum doğal gaz boru hattının katodik koruma ile korunduğunu kabul edilerek benzetim çalışmaları yapılmıştır. BOTAŞ tesis ettiği doğal gaz ve petrol boru hatlarını katodik koruma sistemleri ile korunmaktadır. Bu araştırma çalışmasında katodik koruma sistemi bakımlarının düzenli yapılamadığı veya yıldırım ve benzeri doğa olaylarından kaynaklı arızalanması durumlarında boru hattında gerçekleşen girişim gerilim ve akımları incelenmiştir.

Bu çalışmada; 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH ile 154 kV Horasan-Ağrı EİH herhangi bir arızanın, dengesiz akımın, dengesiz gerilim olmadığı ve boru hattının katodik koruma ile korunmadığı işletme koşullarında 1 cm² kesit alandaki akım yoğunluğu ile dokunma gerilim değerleri analiz edilmekte ve söz konusu değerler Çizelge 5.11.'de verilmektedir.

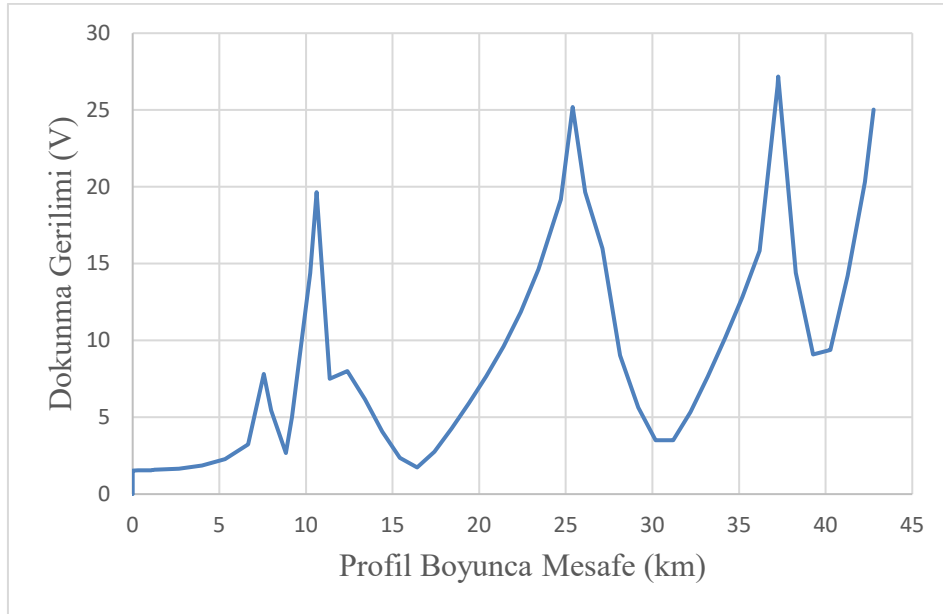
Çizelge 5.11. Katodik korumasız işletme durumunda 1cm² kesit akımı ve dokunma gerilimi

	Profil Boyunca Mesafe (km)	1 cm ² kesit akım yoğunluğu	Dokunma Gerilimi
1	0	0	0
2	1,06	2,29	1,56
3	6,67	4,78	3,24
4	8,85	3,94	2,68
5	10,25	21,21	14,38
6	12,4	11,82	8,02
7	16,42	2,58	1,75
8	24,72	28,28	19,17
9	34,2	14,98	10,16
10	37	40,09	27,18
12	42,27	29,98	20,32

Şekil 5.18.'de katodik korumasız 1 cm² kesit akım yoğunluğu, Şekil 5.19'de ise katodik korumasız dokunma gerilimi verilmektedir.



Şekil 5.18. Normal işletme durumunda katodik korumasız 1 cm² kesit akım yoğunluğu



Şekil 5.19. Normal işletme durumunda katodik korumasız dokunma gerilimi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde ekonomik büyüme ile birlikte sanayi yatırımları artan bir ivme ile süregelmektedir. Ekonomik kalkınma ile birlikte enerji tüketimi de hızla artmaktadır. Enerji tüketimini karşılaştırmak için elektrik iletim ve dağıtım hatları, doğal gaz ve petrol boru hatları ile demir yolu alt yapı çalışmaları paralelinde yapılmaktadır. Söz konusu alt yapı çalışmalarında sürekli artan kamulaştırma bedelleri de göz önüne alırsak tüm bu hatların aynı veya yakın güzergâhlarda yapılması nerdeyse zorunlu olmaktadır.

Bu tez çalışmasında öncelikle 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı ve 154 kV Horasan–Ağrı EİH ile yer altına tesis edilmiş Ağrı- Horasan doğal gaz metal boru hattında oluşan elektromanyetik girişimler incelenmiş ve üç faz kısa devre arızası olması durumunda, boru hattında oluşan dokunma ve adım gerilimleri incelenerek azaltmak amacıyla farklı metotlar araştırılmıştır.

Tez çalışmasının ikinci bölümünde EİH ile metal boru hatları arasında meydana gelen elektromanyetik girişimlerden; kapasitif, indüktif ve kondaktif etkiler incelenmiştir. Kapasitif, indüktif ve kondaktif etkilerin boru hattı ile boru hattında çalışan teknik personel ve yakınında bulunan canlılara verebileceği zararlar detaylıca açıklanmıştır. EİH’ ında muhtemel gelecek kısa devre sonucu boru hatlarında oluşabilecek tehlikeler için (dokunma ve adım gerilimleri) alınabilecek önlemlere değinilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde ise; korozyon ve katodik koruma konusu araştırılmıştır. Korozyon oluşumu ve korozyon hızına etki eden değişkenler ile korozyonun ekonomik zararları değerlendirilmiştir. Son olarak korozyondan korunmak için kullanılan yöntemler analiz edilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde EİH ile boru hattı arasında gerçekleşen elektromanyetik girişimleri analiz etmek için kullanılan Google Earth ve CDEGS programı ROWCAD uygulamasında hazırlanan benzetim çalışmaları kullanılan güzergâh ve hesaplama metotları verilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH' nda meydana gelen kısa devre esnasında oluşan adım ve dokunma gerilimleri incelenmiştir. Boru hattında oluşan dokunma ve adım gerilim artışının en yüksek olduğu 37. km'deki EİH direğine yakın geçiş olan bölümde dokunma ve adım gerilimlerini azaltmak amacıyla farklı yöntemler uygulanmıştır.

Öncelikle EİH'nin normal işletme koşullarında ve boru hattının katodik koruma ile korunduğu koşullarda yapılan benzetim çalışmalarında, boru hattındaki dokunma gerilimi ile 1 cm^2 kesit alanda oluşan A/m^2 değerleri incelenmiş ve CDEGS ile yapılan hesaplamalarda dokunma ve akım değerlerinin güvenlik sınırı olan 15 V ve 30 A/m^2 değerinden düşük olduğu tespit edilmiştir.

İkinci olarak uygulanan benzetim çalışmasında 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH'nde yer alan direklerin toprak geçiş dirençleri sırasıyla; 5Ω , 15Ω , 50Ω ve 100Ω olması durumları analiz edilmiştir. EİH direkleri toprak geçiş direnci değişiminin dokunma ve adım gerilimine olan etkisi, boru hattının EİH direğine tesis mesafesine göre farklılıklar göstermektedir. Çizelge 5.2. ve Çizelge 5.3. incelendiğinde genel olarak direk toprak geçiş direnci arttıkça, boru hattına indüklenen dokunma ve adım gerilimleri azalmaktadır. Bu beklenen bir sonuç olmakla birlikte, EİH direğine yakın tesis edilmiş boru hattı bölümlerinde bu durum farklılık göstermektedir. EİH direğine en yakın geçiş olan 37. km'de, direk toprak geçiş direncinin artmasıyla, direk ayağından toprağa akan kısa devre akımı azalsa da, boru hattı yaklaşık 10 m uzaklıkta bulunduğundan, boru hattındaki elektromanyetik girişim gerilim değerleri artmaktadır. 5Ω yerine 100Ω olma durumunda ise dokunma gerimi 137,05 V değerinden 439,73 V değerine yükselmekte ve % 320'lik bir artış olmaktadır. Adım gerilimi ise 4,433 V değerinden 18,64 V değerine yükselmekte olup, % 420 artış gözlenmiştir. Dokunma ve adım gerilim değerlerini etkileyen önemli değişkenlerden birisi de kısa devre akımlarının büyüklüğüdür. Benzetim sonuçlarına göre, EİH toprak geçiş direnci değişimi ile ilgili Ağrı-Horasan bölgesinde genelleme yapılamamaktadır. Ancak, EİH direk-toprak geçiş direncinin boru hattına etkisi CDEGS, EMPT vb. programları ile benzetim analizlerinin yapılması gelecek çalışmanın konusu olabilecektir.

Üçüncü benzetim çalışması olarak; 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH'nin toprak öz direncinin $25 \Omega.m$, $50 \Omega.m$, $100 \Omega.m$ ve $300 \Omega.m$ olması durumlarında oluşan dokunma

ve adım gerilimi değişimleri incelenmiştir. Önceki benzetimlerde olduğu gibi en yüksek gerilim değerleri yine 37. km'de olduğu gözlenmiştir. 37. km'de toprak öz direnci $25 \Omega.m$ olduğunda, dokunma gerilimi 369 V, $300 \Omega.m$ değerinde ise; dokunma gerilimi 393,86 V değerine yükselmekte ve yaklaşık % 6,6 artmakta; adım gerilimi ise aynı bölgede neredeyse hiç değişmemektedir. Bir önceki benzetimde; EİH direk toprak geçiş direnci boru hattının EİH direğine yakın geçiş yaptığı 37. km bölümde hem mutlak değer, hem de yüzde olarak önemli ölçüde artmakta, benzer durum toprak öz direnci değişiminde ise gözlenmemektedir. Kritik geçişin olduğu 37. km haricindeki boru hattı profili boyunca dokunma gerilimi ve adım gerilimi değeri mutlak değer olarak az ancak yüzdesel olarak daha yüksek oranda artmaktadır. Bu benzetim sonuçlarına göre toprak öz direncinin, dokunma ve adım gerilimi oluşumuna etkisi her yerde eşit değildir. Mutlak değer olarak en yüksek artış 37. km'de olmakla birlikte, yüzdesel artışın mutlak değer artışı olan bölüm dışında oluşmakta olup ilerdeki çalışmalarda daha detaylı araştırma yapılması uygun olacaktır. Gözden kaçırılmaması gereken husus ise toprak öz direnci arttıkça EİH direk toprak geçiş direncinin yükseleceği hususudur.

Dördüncü benzetim çalışmasında ise; EİH ile doğal gaz boru hattının kesiştiği yine yaklaşık 37. km'deki boru hattının paralelinde yer altına 0,5 m gömülü, 150 m uzunluğunda bakır iletken kullanılmış ve bakır iletken boru hattı ile irtibatlandırılmıştır. Bakır iletken kullanılması sonucu dokunma gerilimi 273,41 V değerinden 219,17 değerine %19,8 azalmış ve adım gerilimi 12,88 V değerinden 7,6 V değerine yaklaşık %41 azalmıştır.

Beşinci benzetimde ise yaklaşık 37. km'deki bölgede iki adet 50 m x 50 m bakır ağ kullanılmış ve ağ gözleri ise 10 m x 10 m olarak düzenlenmiştir. Bu uygulamada yapılan benzetim çalışmalarında ise dokunma gerilimi 273,41 V değerinden 142,22 V değerine %47,9 azalmış ve adım gerilimi 12,88 V değerinden 4,63 V değerine yaklaşık %59,7 azalmıştır. Benzetim sonuçlarına göre dokunma ve adım gerilimini azalmak için en uygun yöntemin bakır ağ kullanımı olduğu değerlendirilmiştir. Tesis aşamasında 50 m x 50 m genişliğinde ağ gözleri ise 10 m x 10 m olan ızgara şeklindeki bir bakır ağın maliyeti, aynı bölgede boru hattına paralel bakır kablo tesis edilmesine göre yüksek olmaktadır. Benzetim çalışmalarında ilk olarak boru hattına paralel bakır kablo kullanıldığı durumda adım ve dokunma gerilimleri hesaplanıp, söz konusu gerilim değerlerinin güvenlik sınırları içinde kaldığı müddetçe, boru hattına paralel bakır kablo kullanımı tavsiye edilmiştir. Bakır kablo;

gerek tesis kolaylığı ve gerekse ekonomik nedenlerden uygun bir alternatif çözüm olmaktadır.

Altıncı benzetimde 400 kV Erzurum III (Horasan)-Ağrı EİH 96 mm²'lik iki adet çelik koruma toprak teli yerine alüminyum kaplama (alumolwed) 93 mm² ve 200 mm² kesitli toprak koruma iletkeni kullanılmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarına göre alüminyum kaplama 93 mm² kullanımında boru hattı kaplama gerilimi 224,2 V değerinden 140,26 V değerine %37,4 azalmış ve 200 mm² alumolwed kullanımında boru hattı kaplama gerilimi 224,2 V değerinden 68,08 V değerine %69,6 azalmıştır. Boru hattı dokunma gerilimi 93 mm² kullanımında 247,57 V değerinden 154,96 V değerine %37,4 azalmış ve 200 mm² alumolwed kullanımında boru hattı dokunma gerilimi 247,57 V değerinden 118,21 V değerine %52,2 azalmıştır. Adım gerilimi 93 mm² kullanımında 6,43 V değerinden 4,81 V değerine %21,2 azalmış ve 200 mm² alumolwed kullanımında adım gerilimi 6,43 V değerinden 4,16 V değerine %52,2 azalmıştır.

96 mm² çelik ve 93 mm² alumoweld iletkenleri çok yakın kesitlerdedir, ancak alumoweld koruma iletkeni kaplama stres voltajı, adım voltajı ve dokunma voltajı parametrelerinde çok daha iyi performans göstermiştir. Alumoweld iletkeninin kesitinin 93 mm²'den 200 mm² artması ile boru hattında indüklenen gerilimlerin önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir. Alumoweld koruma iletkenleri çelikten daha yüksek iletkenliğe sahip olduğundan, üç faz kısa devre arıza akımı topraklama koruma iletkeninden daha yüksek değerde trafo merkezi topraklamasına akmaktadır. Bu durumda, EİH direğinden direk topraklaması ile toprağa akan akım azalmaktadır. İletkenliği yüksek olan EİH toprak koruma iletkeni kullanımı ile elektromanyetik girişim gerilim değerleri azalır ve böylece boru hattının kaplamasının zarar görmesi engellenebilecektir.

Yedinci benzetimde, Ağrı-Horasan doğal gaz boru hattında katodik koruma olmaması durumunda ve normal işletme koşullarında, 1 cm² kesit akım yoğunluğunda A/m² ile dokunma gerilim değerleri incelenmiştir. Katodik korumalı işletme koşullarında 1 cm² kesit akım yoğunluğu en yüksek değeri 4,36 A/m² iken, katodik korumasız durumunda yaklaşık 10 kat artarak 40,09 A/m² değerine yükselmiştir. Dokunma gerilimi ise 2,864 V değerinden 27,18 V değerine çıkmıştır. 1 cm² kesit akım yoğunluğu ve dokunma gerilimi güvenlik sınırı olan 30 A/m² ve 15 V değerinden yüksek olmaktadır. Bu benzetim sonuçlarına göre EİH ile boru hattının güzergâhı paralel olması ve/veya bazı bölgelerde kesişmesi

durumunda, boru hattının katodik koruma ile korunması ve katodik koruma sisteminin düzenli bakımlarının yapılması, boru hattının uzun yıllar kullanılması için alınması gereken birincil önlem olarak belirlenmiştir.

Yapılan benzetim çalışmalarında doğal gaz boru hattında, EİH kaynaklı elektromanyetik etkileşimlerin etkisini azaltmak amacıyla farklı yöntemler uygulanmıştır. Uygulanan yöntemler kaplama, dokunma ve adım gerilimlerini önemli ölçüde azaltılmasını sağlamaktadır.

Mevcut tez çalışmasında uygulanan yöntemler ve benzetim çalışması CDEGS' in Right of Way programı kullanılarak yapılmıştır. İleriye dönük yapılacak çalışmalardan biriside; benzetim sonuçları ile saha uygulamalarını karşılaştırmak olacaktır. Benzetim sonuçları ile boru hattında ölçü aletleri ile ölçülen değerler birbirine yakın olması durumunda; gelecekte tesis edilecek yeni boru hatlarında CDEGS veya benzeri benzetim programları kullanılması ile ekonomik önlemlerin alınması sağlanacaktır.

Mevcut durumda TEDAŞ, TEİAŞ ve BOTAŞ hatlarının kesişim ve geçiş yerlerinde boru hattının üstünde bakır hasır ağ kullanılmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar sonucunda bakır ağ yerine bakır kablolar ve/veya alüminyum alaşımlı toprak koruma teli kullanılması ekonomik olarak alternatif bir çözüm olacağı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Gawad, N. M. K., Shaalan, E. M., Darwish, M. M. F. and Basuny, M. A. M. (2019). *Influence of Fault Locations on the Pipeline Induced Voltages Near to Power Transmission Lines*. 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, 761-767.
- Adedeji, K. B., Ponnle, A. A., Abe, B. T. and Jimoh, A. A. (2015). *Effect of Increasing Energy Demand on the Corrosion Rate of Buried Pipelines in the Vicinity of High Voltage Overhead Transmission Lines*. 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), Side, 299-303.
- Abu-Hamet, T. (1998). *Çeliğin Zemin İçindeki Korozyonu*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Amer, M. G. (2007, Jan.). Novel technique to calculate the effect of electromagnetic field of HVTL on the metallic pipelines by using EMTP program. *International Journal For Computation And Mathematics In Electrical and Electronic Engineering*, (26), 75-85.
- Bıyık, G. (2013). *Katodik Koruma Sistemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- BS EN 50443 (2011). Effects of electromagnetic interference on pipelines caused by high voltage a.c. electric traction systems and/or high voltage a.c. power supply.
- Cetin, O., Duzkaya, H. and Taplamacioglu, M. C. (2021). *Analysis of transmission line electromagnetic interference on touch and step voltages on buried gas pipeline under different shielding and resistivity conditions*. 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Pitesti, 1-4.
- Cetin, O., Duzkaya, H. and Taplamacioglu, M. C. (2022). *Electromagnetic interference investigation of two overhead lines with a natural buried gas pipeline: An investigation on the Agri-Horasan Region in Turkey.*, CIGRE Paris, Session.
- CIGRE, (1995) Guide On The Influence Of High Voltage Ac Power Systems On Metallic Pipelines. “*Electromagnetic Compatibility with telecommunication circuits, low voltage networks and metallic structures*”
- DIN 50900-1, (1982). Corrosion Of Metals; Terminology; General Concepts
- Dushimimana, G., Simiyu, P., Ndayishimiye, V., Niringiyimana E. and Bikorimana, S. (2019). *Induced electromagnetic field on underground metal pipelines running parallel to nearby high voltage AC power lines.*, International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering (ICSREE 2019) 107, Beijing, 73-77.
- El Gayar, A. I. and Abdul-Malek, Z. (2016). Induced Voltages on a Gas Pipeline Due to Lightning Strikes on Nearby Overhead Transmission Line. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* 6(2), 495-503.

- El-Refaie, El-S, M., Ahmed, A.- I. S., Mohamed, S. M. and Gaber, H. M. (2017). *Electromagnetic Field Interference between High Voltage Transmission Lines and Nearby Metallic Gas Pipelines*. 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)., Shebeen El-Kom, 332-336.
- İnternet: Boru Hatları İle Petrol Taşıma A.Ş. Genel Müdürlüğü (BOTAŞ-2021). Ham Petrol ve Doğal Gaz Boru Hattı Tesislerinin Yapımı ve İşletilmesine Dair Teknik Emniyet ve Çevre Yönetmeliği. Web: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/08/20210813-1.htm>. Son Erişim Tarihi: 15.12.2022
- İnternet: Elektrik Kuvvetli Akım Yönetmenliği (EKAD) Web: <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=9949&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5> Son Erişim Tarihi: 10.01.2023.
- İnternet: Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. (PHMSA) Web: <https://www.phmsa.dot.gov/> Son Erişim Tarihi: 19.01.2023.
- İnternet: Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Topraklama Sistemi Şartnamesi, Web: <https://webim.teias.gov.tr/file/7ca1eb6a-3971-41e4-b662-e2bfccdfad6?download> Son Erişim Tarihi: 25.01.2023.
- IEEE Std 2746™ (2020). IEEE Guide for Evaluating AC Interference on Linear Facilities Co-Located Near Transmission Lines.
- Ismail, R., Hasibuan, A., Isa, M., Abdurrahman, F., and Islami, N. (2019). Mitigation of high voltage induction effect on ICCP system of gas pipelines: a field case study. *Telkomnika*, 17(6), 3226-3231.
- Isogai, H., Ametani, A. and Hosokawa, Y. (2004). Basic investigation of induced voltages to a buried gas pipeline from an overhead transmission line. *Electrical Engineering in Japan*, 164(1), 361-365.
- Isogai, H., Ametani, A. and Hosokawa, Y. (2008). An Investigation of Induced Voltages to an Underground Gas Pipeline from an Overhead Transmission Line. *Electrical Engineering in Japan*, 164(1), 43-51.
- Karataş, E. (2019). *Yüksek Gerilim Hatlarının Boru Hatları Üzerindeki Etkileri Ve Belirli Bir Bölgedeki Ac Korozyonunun Giderilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Kim, H. S., Min, H. Y., Chase, J. G. and Kim, C. H. (2021). Analysis of induced voltage on pipeline located close to parallel distribution system. *Energies*, (14), 147-159.
- Kopsidas, K. and Cotton, I. (2008). Induced Voltages on Long Aerial and Buried Pipelines Due to Transmission Line Transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(3), 1535-1543.

- Li, Y., Dawalibi, F. and Ma, J. (2000). *Electromagnetic Interference Caused by a Power System Network on a Neighboring Line*. *Proceedings of the 62nd Annual Meeting of the American Power Conference*, Chicago, 311-316
- Li, Y., Dawalibi, F. and Ma, J. (2001). *Effect of Conductor Length and Angle on the Accuracy of Inductive Interference Computations*. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Atlanta, 433-437.
- Li, Y., Dawalibi, F. and Ma, J. (2002). *Effect of Conductor Angle between Transmission Line and Neighboring Utilities on the Accuracy of Inductive Interference Computations*. *International Conference on Power System Technology*, Kunming, 2477-2481.
- Liu, B. (2016). *Study on simulative crevice corrosion of common metals on submarine pipeline*. Master's Thesis, Civil Aviation University of China, Tianjin.
- Liu, X., Wang, W. and Yu H. (2017). *Electromagnetic Effect on Undergroud Pipeline of the Lightning Strike 330kV Transmission Lines*. *4th International Conference on Information Science and Control Engineering*, Changsha, 1487-1491.
- Lu, D., Liu, C., Qi, L. and Yuan, H. (2012). *Mitigation of Electromagnetic Influence on the Buried Metal Pipeline near Overhead AC Transmission Line*. *Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications*, Dalian, 543-546.
- Luo, Y., Lin, N., Zhou, S., Li, S. and Wang, H. (2020). *Effects of electromagnetic interference and crevice on corrosion of natural gas pipelines*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Jakarta, 784-790.
- Metin, E. (2007). *Katodik Koruma Sistemleri, Yeni Uygulamalar Ve Ekonomik Analiz*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Micu, D. D., Czumbil, L., Christoforidis, G. C., Ceclan A. and Ştet, D. (2012). Evaluation of induced AC voltages in underground metallic pipeline. *The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*. 31(4), 1133–1143.
- Mousa, M. I., Abdul-Malek, Z., Ibrahim, V. M., Elgayar, A. I, Nawawi, Z., Sidik, M. A. B. and Jambak, M. I. (2017). *Evaluation and Mitigation of Underground Gas Pipeline Coating Stress Due to Nearby Lightning Stroke*. *International Conference on Electrical Engineering and Computer Science*, Palembang, 275-279.
- NACE SP0177 (2014). *Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems*.
- Papadopoulos, T. A., Apostolidis, A. K., Chrysochos, A. I. and Christoforidis, G. C. (2019). *Frequency-Dependent Earth Impedance Formulas Between Overhead Conductors and Underground Pipelines*. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Genova, 356-361.

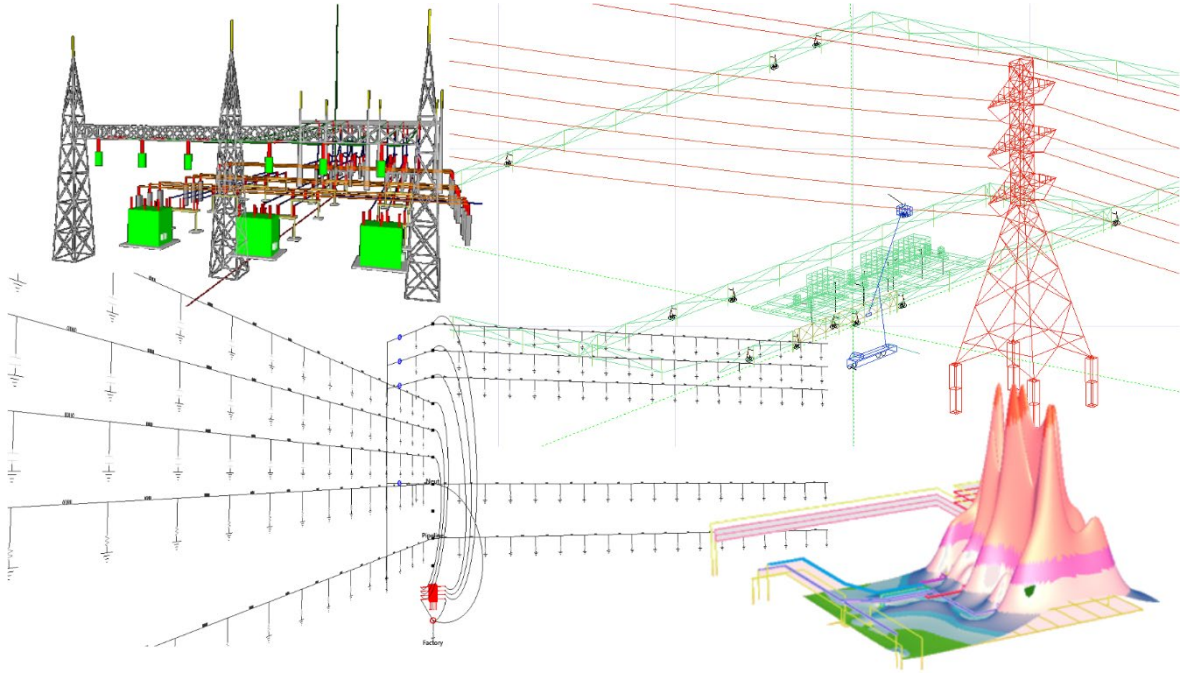
- Qi, L., Yuan, H., Li, L., and Cui, X. (2013). Calculation of Interference Voltage on the Nearby Underground Metal Pipeline due to the Grounding Fault on Overhead Transmission Lines. *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, 55(5), 965-974.
- Reşitoğlu, M. S. (2015). *Batman Şartlarında Güneş Enerjili Katodik Koruma Sisteminin Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Revie, R. W. and Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. (4rd Ed.), Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 490.
- Shabangu, T. H., Shrivastava, P., Abe, B. T., and Olubambi, P. A. (2018). Stability Assessment of Pipeline Cathodic Protection Potentials under the Influence of AC Interference. *Progress In Electromagnetics Research*, (66), 19–28.
- Shwehdi, M., H., Alaql, M. A and Mohamed, S. R. (2020). EMF Analysis for a 380 kV Transmission OHL in the Vicinity of Buried Pipelines. *IEEE Access*, (8), 3710-3717.
- Tao, Q., Suna, B., Tao, Y., Yunfei, V. and Xinliang, Y. (2018). *Analysis of electromagnetic influence between high-voltage AC transmission lines and buried oil and gas*. 2018 China on Electricity Distribution, Tianjin, 1099-1104.
- TS EN ISO 18086 (2021). Metallerin ve alaşımların korozyonu - AC' nin belirlenmesi korozyon koruma kriterleri
- Wang, C., Liang, X. and Freschi, F. (2020, April). Investigation of factors affecting induced voltages on underground pipelines due to inductive coupling with nearby transmission lines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1266-1274.
- Yuan, H., Yang, G., Jiang, M., Wang, X., Wang, S. and Yuan, K. (2018). *A Detailed Study of AC Interference on Metal Pipelines due to Double Circuit Power Lines*. 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Beijing, 1254-1259.
- Zhang J (2013) *Crevice corrosion behavior of 5083 and 6061 aluminum alloys*. Master's Thesis, Harbin Engineering University, Harbin.

EKLER

EK-1. CDEGS

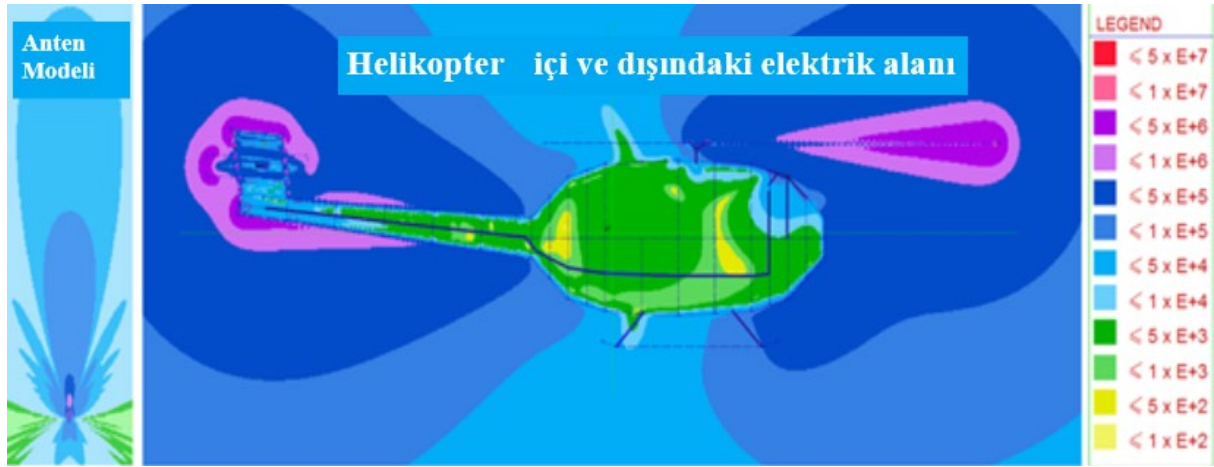
Piyasadaki ticari olarak mevcut topraklama (topraklama) ve elektromanyetik analiz yazılım paketlerinden biri olan CDEGS ile topraklama, elektromanyetik girişim, elektromanyetik alanlar ve geçici olayları içeren çeşitli sorunları çözmek için kullanılır.

CDEGS kısaca (Akım Dağılımı, Elektromanyetik Girişim, Topraklama ve Toprak Yapısı Analizi), elektrik şebekeleri içeren tüm endüstrilerde karşılaşılan çeşitli problemleri doğru bir şekilde analiz etmek için tasarlanmış güçlü ve entegre bir yazılım programıdır. Uzun yıllardır National Grid (İngiliz Elektrik İletim Operetörü.) tarafından kullanılan program, ülkemizde 2019'dan itibaren TEİAŞ tarafından kullanılmaya başlanmıştır. Bu programın kullanım alanı ve yetenekleri ile ilgili temel görseller Şekil 1.1., Şekil 1.2. ve Şekil 1.3.'de verilmektedir.

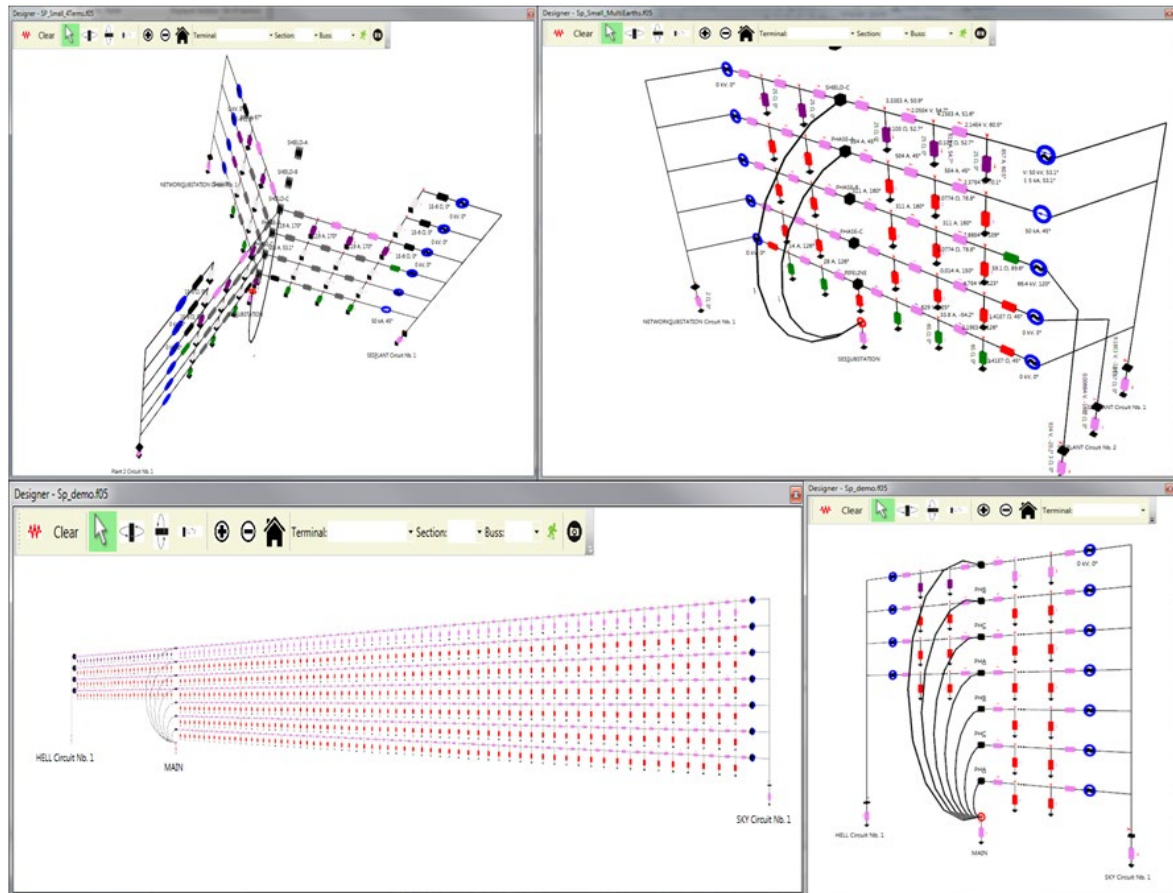


Şekil 1.1. CDEGS'in genel kullanım alanları

EK-1. (devam) CDEGS



Şekil 1.2. Maxwell denklemleri ile helikopter içi ve dışındaki elektrik alan büyüklüğü



Şekil 1.3. Devre analizi ile çözümler



Gazili olmak ayrıcalıktır