

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBESİNİN YÜKSEK GERİLİM
HATLARI İLE DOĞRUDAN VE DOLAYLI ETKİLEŞİMİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Turan ÇAKIL

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

AĞUSTOS 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBESİNİN YÜKSEK GERİLİM
HATLARI İLE DOĞRUDAN VE DOLAYLI ETKİLEŞİMİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Turan ÇAKIL

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

AĞUSTOS 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBESİNİN YÜKSEK GERİLİM
HATLARI İLE DOĞRUDAN VE DOLAYLI ETKİLEŞİMİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Turan ÇAKIL
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez .../...../2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Şükrü ÖZEN (Danışman)
Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN
Prof. Dr. Selçuk HELHEL
Doç. Dr. H. Feza CARLAK
Dr. Öğr. Üyesi Gürkan BİLGİN

ÖZET

YILDIRIM ELEKTROMANYETİK DARBESİNİN YÜKSEK GERİLİM HATLARI İLE DOĞRUDAN VE DOLAYLI ETKİLEŞİMİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Turan ÇAKIL

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Ağustos 2024; 121 sayfa

Güç sistemlerinin kritik unsurları olan yüksek gerilim enerji tesisleri ve iletim hatları, yıldırım elektromanyetik darbeleri (YEMD) nedeniyle ciddi arızalar ve harmonik bozulmalarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu arızalar, enerji tüketiminde aksamalara ve ekonomik kayıplara yol açmakta olup, önleyici tedbirlerin alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, yüksek gerilim (YG) sistemlerinin simülasyon programları kullanılarak modellenmesi ve analiz edilmesi, alınacak tedbirlerin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Çalışmada, MATLAB, EMTP ve CDEGS gibi simülasyon programları kullanılarak enerji iletim hatlarında ve bu hatlarla ilişkili tesislerde YEMD kaynaklı elektriksel arızaların analiz edilmesi ve bu arızaların etkilerinin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu alanda uluslararası literatürde çalışmalar bulunmasına rağmen, ulusal düzeyde kapsamlı araştırmalar yetersiz kalmaktadır. Çalışmanın özgün değeri, klasik koruma tedbirlerinin (parafudr ve paratoner) yanı sıra elektromanyetik ekranlama yöntemleri ile yeni korunma stratejileri geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. YEMD'in doğrudan ve dolaylı etkilerini (kubla etkisi) minimize etmek amacıyla elektromanyetik uyumluluk (EMC) açısından ekranlama metotları önerilmiştir. Bu bağlamda, enerji iletim hatları ve ilgili tesislerde YEMD'in neden olduğu arızaların analiz edilmesi, bu arızaların konumlarının belirlenmesi ve etkilerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada analitik yöntemler ve gerçek hat verilerine dayanan simülasyonlar kullanılarak, YEMD kaynaklı arızaların çözümüne yönelik basit ve pratik matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, ulusal şebekede YEMD kaynaklı arızaların çözümüne önemli derecede kolaylık sağlamaktadır. Çalışmada, Türkiye'nin Batı Akdeniz ve Ege bölgelerinde yoğun YEMD düşüşlerinin yaşandığı enerji iletim hatları üzerinde analitik hesaplamalar yapılmış ve gerçek zamanlı veriler Türkiye Meteoroloji Genel Müdürlüğü ile Türkiye Elektrik İletim A.Ş.'den sağlanmıştır. Çalışmada Türkiye'de kullanılan 380, 154 kV ve 34.5 kV'lık kablo ve havai hatlar incelenmiş, farklı direk tipleri değerlendirilmiş ve çeşitli bölgelerde (özellikle Antalya, Burdur, Isparta, Muğla ve Denizli) analitik hesaplamalar ve yazılım geliştirmeleri yapılmıştır. Bu veriler, hatların ve tesislerin YEMD karakteristikleri, topraklama ve koruma iletkeni özelliklerini içermektedir. YEMD kaynaklı arızaların ve kubla etkilerinin analizi, matematiksel modeller ve bilgisayar simülasyonları ile gerçekleştirilmiş ve yeni korunma yöntemleri önerilmiştir. Çalışmada ayrıca, hat kulelerinin yeraltındaki topraklama yapısına yeni bir bakış açısı kazandırılmış ve Faraday kafesi şeklinde topraklama modelleri oluşturularak geleneksel topraklama modelleri ile karşılaştırılmıştır. Uluslararası literatürde genellikle YEMD'in doğrudan hatta düşmesi sonucu oluşan durumlar incelenmişken, bu çalışmada dolaylı düşüşler de kapsamlı olarak

ele alınmıştır. Ayrıca, enerji tesislerinin ve iletim hatlarının YEMD'e karşı performansını iyileştirmenin bir yolu olarak parafudr kullanmanın faydaları da incelenmiştir. Parafudrların optimal ve uygun maliyetli yerleşimini belirlemek için EMTP-ATP simülasyon analizleri yapılmış ve farklı konfigürasyonlar değerlendirilmiştir. Çalışmada, iletim hatlarını YEMD'den korumak için iki farklı tasarım düşünülmüştür: her kulenin seçilen fazına hat parafudr takmak ve seçilen kulelerin tüm fazlarına hat parafuduru takmaktır. Hat izolatörlerinin geri atlama gerilim (flashover) değerleri eşik voltajı olarak kullanılarak farklı parafudr kurulum konfigürasyonları değerlendirilmiştir. Ayrıca, hatların karakteristik empedansı YEMD performansı açısından incelenmiş ve sadece topraklama direncine değil, hattın karakteristik empedansına da dikkat edilmesi gerektiği önerilmiştir. Bu tez çalışması, YEMD'in etkisini toprak koşulları, topraklama tasarımı ve YEMD akımının enjeksiyon noktasının konumu gibi parametreler üzerinden simülasyon ve numerik metotlarla tespit etmektedir. MATLAB/Simulink ve EMTP-ATP benzetim programları ile TEİAŞ Genel Müdürlüğü ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınacak veriler sayesinde gerçek zamanlı transient analizler yapılmıştır. Çalışma, ulusal şebekede YEMD kaynaklı arızaların çözümüne yönelik basit ve pratik matematiksel modellemeler geliştirilmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak, YEMD analizi sonucu elde edilen benzetim modellerinin, gelişmekte olan yapay zekâ tabanlı şebeke çalışmalarına da katkı sağlaması beklenmektedir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar, ulusal ve uluslararası literatüre önemli katkılar sunmakta ve ileri araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Elektromanyetik darbeler, Elektriksel indüksiyon, Elektromanyetik uyumluluk, Emtip-Atp, Güç sistemleri, Güç sistemlerinde korunma, Kublaj etkisi, Manyetik indüksiyon, Matlab, Transient analiz, YEMD

JÜRİ: Prof. Dr. Şükrü ÖZEN

Prof. Dr. Mesud KAHRİMAN

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. H. Feza CARLAK

Dr. Öğr. Üyesi Gürkan BİLGİN

ABSTRACT

MODELING AND ANALYSIS OF THE DIRECT AND INDIRECT INTERACTION OF LIGHTNING ELECTROMAGNETIC PULSES WITH HIGH VOLTAGE LINES

Turan ÇAKIL

PhD Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sukru OZEN

August 2024; 121 pages

High voltage energy facilities and transmission lines, critical elements of power systems, are prone to serious faults and harmonic distortions due to lightning electromagnetic pulses (LEMP). These faults lead to disruptions in energy consumption and economic losses, necessitating the implementation of preventive measures. In this context, the modelling and analysis of high voltage (HV) systems using simulation programs such as MATLAB, EMTP and CDEGS are of paramount importance in determining the necessary measures to be taken. The aim of this study is to analyse electrical faults caused by LEMP in energy transmission lines and associated facilities using simulation programs and to minimize the effects of these faults. Despite existing studies in the international literature, comprehensive research at the national level is insufficient. The originality of this study focuses on the development of new protection strategies using electromagnetic screening methods, in addition to classical protective measures (surge arresters and lightning rods). Electromagnetic compatibility (EMC) screening methods have been proposed to minimize the direct and indirect effects (coupling effect) of LEMP. In this context, the analysis of faults caused by LEMP in energy transmission lines and associated facilities, determination of the locations of these faults, and minimization of their effects are targeted. Simple and practical mathematical models for solving faults caused by LEMP have been developed based on analytical methods and simulations using real-world data. These models significantly facilitate the resolution of faults caused by LEMP in the national grid. Analytical calculations have been conducted on energy transmission lines with intense lightning strikes in the Western Mediterranean and Aegean regions of Turkey, and real-time data has been obtained from the Turkish State Meteorological Service and the Turkish Electricity Transmission Corporation. Cable and overhead lines of 380 kV, 154 kV, and 34.5 kV used in Turkey have been examined, different pole types have been evaluated, and analytical calculations and software developments have been made in various regions, especially Antalya, Burdur, Isparta, Mugla, and Denizli. These data include the lightning characteristics of the lines and facilities, grounding, and protection conductor properties. The analysis of faults caused by LEMP and coupling effects has been carried out using mathematical models and computer simulations, and new protection methods have been proposed. Additionally, a new perspective on the grounding structure of pole towers has been provided, and grounding models in the form of Faraday cages have been created and compared with traditional grounding models. While the international literature has generally focused on situations resulting from direct lightning strikes on the line, this study comprehensively addresses indirect strikes as well. Furthermore, the benefits of

using surge arresters to improve the performance of energy facilities and transmission lines against LEMP have been examined. EMTP-ATP simulation analyses have been conducted to determine the optimal and cost-effective placement of surge arresters, and different configurations have been evaluated. Two different designs have been considered to protect transmission lines from LEMP: installing line surge arresters on selected phases of each tower and installing line surge arresters on all phases of selected towers. Different surge arrester installation configurations have been evaluated using the flashover values of line insulators as threshold voltages. Additionally, the characteristic impedance of the lines has been examined in terms of LEMP performance, and it has been suggested that attention should be paid not only to the grounding resistance but also to the characteristic impedance of the line. This thesis aims to determine the effect of LEMP on parameters such as ground conditions, grounding design, and the location of LEMP current injection through simulation and numerical methods. Real-time transient analyses have been performed using MATLAB/Simulink and EMTP-ATP simulation programs with data obtained from the Turkish Electricity Transmission Corporation and the State Meteorological Service. The study has facilitated the development of simple and practical mathematical models for solving faults caused by LEMP in the national grid. In conclusion, it is expected that the simulation models obtained because of LEMP analysis will contribute to developing artificial intelligence-based network studies. In this context, the results obtained significantly contribute to the national and international literature and lay the foundation for further research.

KEYWORDS: Coupling effect, Electromagnetic pulses, Electrical induction, Electromagnetic compatibility, Emt-p-atp, Magnetic induction, LEMP, Matlab, Power systems, Protection in power systems, Transient analysis

COMMITTEE: Prof. Dr. Sukru OZEN

Prof. Dr. Mesud KAHRIMAN

Prof. Dr. Selcuk HELHEL

Assoc. Prof. Dr. H. Feza CARLAK

Asst. Prof. Dr. Gurkan BILGIN

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, yıldırım elektromanyetik darbeleri (YEMD) üzerine yapılan analizler ve bu analizlerin sonucunda elde edilen bilgiler sunulmaktadır. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinin ana nedeni, uluslararası literatürde YEMD'in dolaylı düşüşü üzerine yapılan çalışmaların eksikliğidir. Ayrıca, ulusal düzeyde önerilen kapsamda detaylı bir araştırma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalarda analitik yöntemler ve deneysel kaynaklar referans gösterilerek kullanılmış, ancak reel hat verilerine dayanan model ve benzetim çalışmaları yetersiz kalmıştır. Bu tez, YEMD'in elektrik tesislerine verdiği zararın boyutları göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır. Elde edilen matematiksel ve blok modellerin, topraklama yöntemleri ve elektromanyetik uyumluluk alanındaki ileri araştırmalara ışık tutması beklenmektedir. Ayrıca, bu çalışmada geliştirilen benzetim modellerinin, yapay zekâ tabanlı akıllı şebeke çalışmalarına da önemli katkılar sağlayacağı öngörülmektedir. Bu tez çalışması, pek çok değerli kişinin katkılarıyla hazırlanmıştır ve bu katkılar sayesinde bilim dünyasına ve ilgili araştırma alanlarına değerli bir kaynak olması hedeflenmiştir.

Bu çalışmanın her aşamasında beni yönlendiren, bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan, değerli zamanlarını esirgemeyen ve akademik alanda gelişime büyük katkı sağlayan hocam Sayın Prof. Dr. Şükrü Özen'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, beni yetiştiren, hayatımın her aşamasında koşulsuz destekleyen ve emeklerini ödeyemeyeceğim anneme, babama ve kardeşime minnettarım. Çalışma ortamını sağlayan Gelir İdaresi Başkanlığı Başkan Yardımcısı Sayın Abdullah Karaboyacı'ya, Gelir İdaresi Başkanlığı Daire Başkanı Sayın Mustafa Akpınar'a, akademik desteğini her zaman esirgemeyen hocam Sayın Doç. Dr. H. Feza Carlak'a, tezimin oluşmasında katkıları olan hocam Sayın Prof. Dr. Selçuk Çömlekci'ye, Sayın Dr. Mehmet Çakır'a ve bu zamana kadar üzerimde emeği olan tüm hocalarıma teşekkür ederim. Buna ilaveten teknik bilgilerini paylaşan TEİAŞ Genel Müdürlüğü'nden arkadaşım Sayın Müh. Mehmet Şahan, arkadaşım Sayın Müh. İbrahim Ezer'e ve Sayın Müh. Mustafa Taşçı'ya, Antalya'ya her geldiğimde desteğini eksik etmeyen arkadaşım Sayın Müh. Ekin Tunçbilek'e, arkadaşım Sayın Müh. Selami Ataş'a, arkadaşım Sayın Yük. Müh. Kemal Ü. Akdemir'e, arkadaşım Sayın Müh. Dr. Atalay Kocakuşak ve arkadaşım Sayın Yük. Müh. Kayhan Ateş'e sonsuz sevgi ve saygılarımla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
3. MATERYAL VE METOT	10
3.1. Elektromanyetik Alan Kavramı.....	10
3.2. Yıldırım Elektromanyetik Alan (YEMD) Teorisi.....	14
3.2.1. YEMD tipleri	14
3.2.2. YEMD oluşum süreci	15
3.2.2.1. Elektrostatik indüksiyon	16
3.2.2.2. Elektromanyetik indüksiyon.....	17
3.2.3. YEMD kanalı.....	17
3.3. Doğrudan ve Dolaylı YEMD Etkileri Arasındaki Fark.....	18
3.3.1. YEMD'in doğrudan etkisi	18
3.3.2. YEMD'in dolaylı etkisi	18
3.4. YEMD'in Neden Olduğu Sorunlar.....	18
3.4.1. Enerji iletim hatlarında YEMD kaynaklı oluşan gerilimler	18
3.4.1.1. YEMD'in eih'ye düşmesi sonucu oluşan aşırı gerilim.....	19
3.4.1.2. YEMD'in koruyucu iletkenine veya direğe düşmesi sonucu	19
3.4.1.3. YEMD'in faz iletkenine düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı gerilim.....	19
3.5. YEMD Kaynaklı Aşırı Gerilimi Etkileyen Faktörler.....	19
3.5.1. Çok iletkenli yapılar	19
3.5.2. Topraklama kablosu ve koruma iletkeni.....	19
3.5.3. Zemin (Yer) iletkenliği	20
3.5.4. YEMD'in düştüğü noktanın konumu	20
3.5.5. Enerji iletim hatlarının yüksekliği	20

3.5.6. Enerji iletim hatlarının uzunluğu	20
3.5.7. Korona etkisi.....	20
3.6. YEMD Parametreleri.....	20
3.6.1. Başlangıç zamanı	20
3.6.2. Sönümleme zamanı.....	20
3.6.3. Akım genliği	20
3.6.4. YEMD filiz hızı	21
3.7. YEMD'in Güç Hatlarında Oluşturduğu Aşırı Gerilimin Analitik Olarak İncelenmesi.....	21
3.7.1. Yıldırım elektromanyetik darbe akım modelleri	21
3.7.2. Değişken iletim hattı modeli.....	21
3.7.3. YEMD kanalının akım tespiti için kullanılan modeller.....	22
3.7.3.1. Heidler akım modeli	22
3.8. Kublaj Modelleri.....	23
3.9. Kublaj Modellerine Genel Bakış.....	25
3.10. YEMD'in Etkisinin Hesaplanması.....	25
3.10.1. Belirli bir alandan-iletim hattı kublaj denklemleri (Agrawal Modeli)	26
3.10.2. Belirli bir alandan iletim hattına kublaj durumun FDTD çözümü	29
3.10.3. Dolaylı düşen YEMD kaynaklı aşırı gerilim hesaplamaları.....	31
3.11. YEMD Verilerinin Birikimli Olasılık Analizi ve İstatistikleri.....	33
3.12. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları.....	37
3.12.1. Dört kazık Mesh tipi metodu	38
3.12.2. Dört kazık + hasır + humus tipi metodu	38
3.12.3. Counterpoise + hasır + humus metodu	39
3.12.4. Uydu topraklama metodu	40
3.12.5. Guy wires (sadece belirli hatlarda yapılacak uygulama).....	40
3.12.6. Underbuilt wire metodu.....	41
3.12.7. Downlead (tek koruma iletkeni sistemi) metodu.....	41
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	43

4.1. Yıldırım Elektromanyetik Darbelerinin Havai Enerji İletim Hatlarındaki Elektrostatik, Elektromanyetik Alanlar ve İndüklenmiş Gerilimler Üzerindeki Dolaylı Etkisi.....	43
4.1.1. Doğrudan YEMD düşüşü	43
4.1.2. Dolaylı YEMD düşüşü	44
4.1.3. YEMD'in kublaj etkisi ile EİH'ler üzerindeki etkisi.....	44
4.1.4. Rusck kapalı formülasyonu	45
4.1.5. Rusck kublaj modeli	45
4.1.6. Rusck formülasyonu	47
4.1.7. Rusck modeline göre alan ve hat arasındaki ilişki.....	51
4.1.8. YEMD filizinin başlangıçta yüksüz kanalındaki elektrik alan değişimi	52
4.1.9. YEMD filizinin başlangıçta yüklü kanalındaki elektrik alan değişimi	52
4.2. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları için Sahada Tespit Edilen Bulgular	59
4.2.1. Kazıkların yatay-dikey ve içeri-dışarı çakılması farkı.....	65
4.3. Hat Parafudrları ile Yıldırım Elektromanyetik Darbelerine Karşı Koruma: Gerçekçi Yüksek Gerilim Güç Hattı Bölgesi İçin Bir Simülasyon Çalışması.....	67
4.3.1. Teorik analiz ve incelenen iletim hattı bölgesi	68
4.3.2. Atp-Emtp modelinin bileşenleri ve YEMD çalışması için YG enerji iletim hattının sayısal modellemesi.....	69
4.3.2.1. Atp-Emtp'de enerji iletim hattı modeli.....	69
4.3.2.2. Atp-Emtp'de izolatör modeli.....	69
4.3.2.3. Atp-Emtp'de parafudr modeli.....	69
4.3.3. Simülasyon bulguları	70
4.4. Topraklamanın iyileştirilmesi ile Yıldırım Elektromanyetik Darbelerine Karşı Koruma: Gerçekçi Yüksek Gerilim Güç Hattı Bölgesi İçin Bir Simülasyon Çalışması.....	75
4.4.1. Teorik analiz ve bulgu literatürü.....	75
4.4.2. Bulgu değerlendirilmesi	76
4.4.3. Simülasyon bulguları	77
4.4.3.1. İletim hattının topraklama değerlerine göre açma sayısı ve minimum akım etkisi.....	78

4.4.3.2. İletim hattında izolatör etkisi	79
4.4.3.3. İletim hattında koruma iletkeni sayısının etkisi	80
4.4.3.4. İletim hattında direk yüksekliğinin etkisi	80
4.5. 400 kV Elektrik İletim Sisteminde YEMD' e Karşı Yeni Bir Koruma Yöntemi Olan Underbuilt Wire Yapısının Gerçek Bir Hat için Modellenmesi	82
4.5.1. Simülasyon bulguları	84
5. SONUÇLAR	89
6. KAYNAKLAR	93
7. EKLER	107
7.1. 154 kV'luk Tek Devre Enerji İletim Hattı Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri...	107
7.2. 154 kV'luk Çift Devre Enerji İletim Hattı Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri...	108
7.3. 154kV Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direk Ağırlık Değerleri	109
7.4. 400kV Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direk Ölçüt Değerleri	110
7.5. CP1 Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direk Ölçüt Değerleri	111
7.6. Enerji İletim Hatlarında Yeni Kullanılmaya Başlanan PA ₁ Tipi Direklerinin Hat Görüntüsü	112
7.7. Enerji İletim Hatlarında Yeni Kullanılmaya Başlanan PA ₁ Tipi Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri	113
7.8. Enerji İletim Hatlarında Yeni Kullanılmaya Başlanan PA ₁ Tipi Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri-2	114
7.9. Enerji İletim Hatlarında Yeni Kullanılmaya Başlanan PB ₁ Tipi Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri	115
7.10. Enerji İletim Hatlarında Yeni Kullanılmaya Başlanan PB ₁ Tipi Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri-2	116
7.11. Enerji İletim Hatlarında Yeni Kullanılmaya Başlanan PB ₁ Tipi Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri-3	117
7.12. 154 kV Sincan-Balgat Hattına Yakın Düşen YEMD'in Büyüklük, Zaman ve Konum Ölçütleri	118
7.13. Enerji İletim Hatlarında Uluslararası Radyasyondan Korunma Birliği- Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyon Komitesi (IRPA/INIRC) Tarafından 50/60 Hz için Elektrik ve Elektromanyetik Alanlar İçin Sınır Değerleri	119

7.14. Doktora Döneminde Tez Konusuyla İlgili Uluslararası Yapılan Çalışmaların Katılım ve Onay Sertifikaları.....	120
7.15. Doktora Döneminde Tez Konusuyla İlgili Uluslararası Yapılan Çalışmaların Katılım ve Onay Sertifikaları-2.....	121
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yıldırım Elektromanyetik Darbesinin Yüksek Gerilim Hatları ile Doğrudan ve Dolaylı Etkileşiminin Modellenmesi ve Analizi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

...../...../2024

Turan ÇAKIL



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Işıık hızı
c'	: Birim uzunluk başına kapasitans değeri
d	: YEMD kanalı ile iletim hattı arasındaki yatay uzaklık.
E_r	: Elektrik alanın radyal komponenti
E_x	: Elektrik hattının x eksenindeki elektrik alan komponenti
E_z	: Elektrik alanın dikey bileşeni
H_y	: Manyetik alanın y eksenindeki bileşeni
H_ϕ	: Manyetik alanın açısıl bileşeni
$i(x, t)$	: Hat boyunca akan akım
I_0	: YEMD akımı
L', l'	: Hat boyunca birim uzunluk başına düşen endüktans değeri
L	: Hat uzunluğu
Q	: Yük dağılımı
R	: Kaynak noktasına olan uzaklık
T	: Zaman
$u(t)$	: Birim fonksiyon
v	: YEMD filizinin hızı
$v(x, t)$	: Hat boyu bulunan gerilim seviyesi
$u(x, t)$	: Hat boyu bulunan gerilim seviyesi
z'	: Kaynak noktasına dikey uzaklık
Z_c	: Örneklendirilen hattın karakteristik empedansı
β	: bağıl hız
γ	: bozunma sabiti
δ	: zaman sabiti

δ_1	: x mesafesine bağılı zaman sabiti
ϵ_0	:Dielektrik sabiti (8.85×10^{-12} F/m)
μ_0	: Boşluğun (uzay) manyetik geçirgenliği ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
τ	: akım zaman değeri
τ_m	: akımın alçalma zaman değeri
τ_p	: akımın yükselme zaman değeri
ζ_0, Z_0	: Boşluğun (uzay karakteristik) empedansı
c_1	: Hat ve bulut arasındaki kapasite değeri
c_2	: Toprak ile hat arasındaki kapasite değeri
V	: Zemindeki potansiyel artışı
x	: YEMD'in düştüğü yere olan mesafe
RLC	: YEMD filizinin yansıyan akımı için dağıtılmış devre modelinde, rezistans, indüktans ve kapasitans
$i(z',t)$	: YEMD kanalı boyunca akan akım
z'	: YEMD kanalı boyunca herhangi bir noktada yükseklik
t	: Zaman
I_u	: Uniform yapıda akım
i_p	: Hataya neden olan darbe akımı
λ_p	: Hataya neden olan darbe akımının bozunma sabiti
λ_c	: Korona sonucu oluşan akımın bozunma sabiti
λ	: Bozunma sabiti
i_c	: Korona sonucu oluşan akım
z''	: Korona kaynağından belirli bir noktadaki uzaklık
i_{cs}	: Korona sonucu oluşan akım
v^*	: Akımını yayılma hızı

ϕ : Darbenin düştüğü bölgedeki skaler potansiyel

ϕ^i : Toplam uyarılmış skaler potansiyel

E_z^i : Elektrik alanının dikey bileşeni

B_y^i : Transvers kaynaklı manyetik indüksiyon alanı

E_x^i : Elektrik alanının yatay bileşeni

u^s : Dağılan potansiyel

E_z^s : Dağılan elektrik alanının dikey bileşeni

u^i : Analiz sonucu oluşan gerilim

i^s : Dağılan akım

Tezde ondalık yazımlarda “1.01” şeklinde nokta ayracı kullanılmıştır. Tezde verilen eşitliklerde aksi belirtilmediği sürece “**B**” şeklindeki kalın harfler vektörel büyüklükleri temsil etmektedir.

Kısaltmalar

ATP : Alternatif Transient Programı

BG : Bruce ve Golde Modeli

DEİH : Değiştirilmiş Enerji Nakil Hattı Modeli

DTL : Direk Tipi Listesi

DU : Diendorfer-Uman Modeli

EA : Elektrik Alan

EİH : Enerji İletim Hattı

ENH : Enerji Nakil Hattı

EM : Elektromanyetik

EMA : Elektro Manyetik Alan

EMTP : Elektromanyetik Transient Programı

ENH : Enerji Nakil Hattı (İletim Hattı)

GFD : Ground Flash Density

GIS : Gaz İzoleli Transformatör Merkezi (Gas Insulated Substation)

HAK : Hareketli Akım Kaynağı Modeli

ICLRT: International Center For Lightning Research And Testing

ICLRT: Uluslararası Yıldırım Araştırma ve Test merkezi (International Center for
Lightning Research and Testing)

IEC : Uluslararası Elektroteknik Komisyonu

IEEE : Institute Of Electrical And Electronics Engineers

INIRC : Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyon Komitesi

IRPA : Uluslararası Radyasyondan Korunma Birliği

LEMP : Lightning Electromagnetic Pulses

MCM : Million Circular Mile

MGM : Meteoroloji Genel Müdürlüğü

MOV : Metal Oksit Varistör

NEMD: Nükleer Elektromanyetik Darbe

OG : Orta Gerilim

PC : Pierce ve Cianos Modeli

TEDAŞ: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi

TEİAŞ: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

TES : Termik Enerji Santrali

TM : Transformatör Merkezi

TPA : Toprak Potansiyel Artışı

YEMD: Yıldırım Elektromanyetik Darbe

YG : Yüksek Gerilim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Doğa olayı olarak yıldırımın oluşumu ve yıldırımın düşme anı.....	1
Şekil 3.1. Kayıplı bir iletim hattı kesiti için genel devre gösterimi	13
Şekil 3.2. Farklı sıcaklıkta oluşan yükler	15
Şekil 3.3. Elektrik potansiyelinin hesaplanmasını gösteren kapasitans yapısı	16
Şekil 3.4. YEMD'in oluşumunda enerji iletim hatlarındaki ilk yüklenme öncesi.....	16
Şekil 3.5. YEMD'in deşarj olayının gerçekleşmesi.....	16
Şekil 3.6. Elektromanyetik indüksiyonun oluşum sürecinin gösterimi	17
Şekil 3.7. YEMD kanalının oluşumu.....	17
Şekil 3.8. YEMD filizinin vuruş ve iletim hattının geometrisi.....	18
Şekil 3.9. Heidler modeline göre YEMD kanalının temelindeki akım formunun şekli .	23
Şekil 3.10. Heidler akış modeline göre YEMD kanalının tabanında oluşan akış.....	23
Şekil 3.11. Kublaj Modeli a) Kublaj modellerinin geometrik yapısı	
b) YEMD'in ENH'lere olan kublaj etkisi.....	24
Şekil 3.12. Tipik düşey elektrik alan yoğunluğu ve yatay manyetik akı yoğunluğunu gösteren dalga biçimleri	24
Şekil 3.13. Problemin geometrisi.....	25
Şekil 3.14. Harici bir elektromanyetik alan varlığında çok iletkenli bir hattın kesit geometrisi	26
Şekil 3.15. Örnek bir ETL üzerinde bir YEMD'in dolaylı düşüşü.....	32
Şekil 3.16. 1 km uzunluğunda ve 10 m yüksekliğindeki bir havai hat üzerinde dolaylı olarak düşen YEMD kaynaklı aşırı gerilimler	32
Şekil 3.17. Çalışmaya dahil edilen bölgenin harita gösterimi	33
Şekil 3.18. Yıllara göre YEMD akımı genliği birikimsel dağılımı	33
Şekil 3.19. Yıllara göre YEMD akımı genliği birikimsel dağılımı	35
Şekil 3.20. 4kazık + Mesh Uygulaması	38

Şekil 3.21. 4 kazık + Hasır + Humus Uygulaması.....	38
Şekil 3.22. Counterpoise ve Hasır Uygulaması	39
Şekil 3.23. Counterpoise ve Hasır İletken Uygulaması	39
Şekil 3.24. Uydu Topraklaması	40
Şekil 3.25. Guy Wires Topraklaması.....	40
Şekil 3.26. Underbuilt Wire Topraklaması	41
Şekil 3.27. Downlead Topraklaması.....	42
Şekil 4.1. YEMD'lerin EİH'ler üzerine doğrudan düşmesi.....	43
Şekil 4.2. Kublaj modelinin geometrik yapısı	44
Şekil 4.3. YEMD'lerin belirli bir iniş açısından (θ) kaynaklanan EİH'ler üzerindeki kublaj etkisinin geometrik bir gösterimi	45
Şekil 4.4. Bir iletim hattı kesitinin Rusck kublaj modeli	47
Şekil 4.5. Rusck modeline göre YEMD'in matematiksel modeli.....	48
Şekil 4.6. Rusck formülasyonuna göre problemin geometrisi	48
Şekil 4.7. Düz ve dikey bir YEMD akımının yukarı yönlü hareketi	51
Şekil 4.8. YEMD kanalı boyunca yük dağılımına bağlı olarak $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için dikey elektrik alanı.....	54
Şekil 4.9. YEMD kanalı boyunca yük dağılımına bağlı olarak $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için (vektörel bileşen)	54
Şekil 4.10. YEMD kanalı boyunca yük dağılımına bağlı olarak $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için manyetik alan bileşeni	55
Şekil 4.11. Rusck formülüne göre $x = 0$ 'da indüklenen voltaj grafiği.....	56
Şekil 4.12. Rusck denklemine göre $x = 0$ 'da indüklenen gerilim değerleri.....	56
Şekil 4.13. YEMD kanalı başlangıçta yüksüz olduğunda elektrik alan değişimi.....	57
Şekil 4.14. YEMD kanalı başlangıçta yüklendiğinde elektrik alan değişimi	57

Şekil 4.15. 154 kV Sincan-Balgat hattına 289.12 m uzaklıkta boş arsaya düşen YEMD'in kublaj etkisi.....	58
Şekil 4.16. 154 kV Adatoprakpınar-Konya hattına 333.67 m uzaklıkta boş arsaya düşen YEMD'in kublaj etkisi	58
Şekil 4.17. 154 kV Sincan-Balgat hattına 289,12 m uzaklıkta boş arsaya düşen YEMD'in kublaj etkisine	59
Şekil 4.18. Yapılan saha çalışması ve ölçüm tespiti	61
Şekil 4.19. Direklerin topraklama direncinin ölçüm tespiti.....	61
Şekil 4.20. ATP-EMTP'de çatal pilon kule modeli ile iletim hattı modeli	69
Şekil 4.21. ATP-EMTP'de EGLA tipi hat tutucu (parafudr) modeli ile direk modeli ...	70
Şekil 4.22. Yeniköy-Yatağan TES YG hattı simülasyon modeli.....	70
Şekil 4.23. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü.....	71
Şekil 4.24. Yeniköy- Yatağan TES YG hattının YEMD geriliminde simülasyon bulgusu	71
Şekil 4.25. 45 nolu direğe YEMD'in düşmesi sonucu Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu.....	72
Şekil 4.26. 45 nolu direğe YEMD'in düşmesi sonucu Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu.....	72
Şekil 4.27. 44 nolu direkte YEMD etkisinde Yeniköy- Yatağan TES YG Hattı simülasyon bulgusu.....	73
Şekil 4.28. Yeniköy TM YEMD etkisinde Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu.....	73
Şekil 4.29. Yeniköy YEMD etkisinde Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu (Hat parafudrları aktif)	74
Şekil 4.30. Yatağan YEMD etkisinde Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu (Hat parafudrları aktif)	74

Şekil 4.31. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü.....	77
Şekil 4.32. Keçiörlü TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinde topraklama iyileştirmesi ile 10 ohm'a düşürülmesi sonucu	78
Şekil 4.33. Keçiörlü TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinde izolatör boyu a) İzolatör boyu 1.21m b) İzolatör boyu 1.35m olması durumu	79
Şekil 4.34. Keçiörlü TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinde koruma iletkeni durumu	80
Şekil 4.35. Keçiörlü TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinin tipi değişmesi durumu	81
Şekil 4.36. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü.....	82
Şekil 4.37. Yeniköy-Yatağan TES 400 kV YG hattı simülasyon modeli.....	83
Şekil 4.38. Underbuilt Ground Wires yapısının detaylı bağlantı şeması.....	84
Şekil 4.39. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 19 km gerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim.....	84
Şekil 4.40. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 1 km ilerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim.....	85
Şekil 4.41. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 21 km ilerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim.....	85
Şekil 4.42. YEMD koruma iletkenine düşmesi sonucu hat boyunca UGW iletkeninde indüklenen gerilim.....	86
Şekil 4.43. YEMD'in direk tepesine düşmesi sonucu hatta indüklenen gerilim	86
Şekil 4.44. YEMD'in direk tepesine düşmesi sonucu hatta absorbe edilen enerji büyüklüğü.....	87
Şekil 4.45. Tek koruma iletkenine sahip direkte YEMD'in direk tepesine düşmesi sonucu fazında indüklenen.....	87

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yüzdesel ifadesi karşılığındaki YEMD akım değerleri	34
Çizelge 3.2. Yıl boyunca düşen YEMD sayısı	34
Çizelge 3.3. Yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerleri...	35
Çizelge 3.4. Yüzdesel ifadesi karşılığındaki YEMD akım değerleri.....	36
Çizelge 3.5. Yıl boyunca düşen YEMD sayısı (Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)	36
Çizelge 3.6. Yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerleri...	37
Çizelge 4.1. Sistemde bir kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişim	60
Çizelge 4.2. Sistemde iki, üç ve dört kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişim	62
Çizelge 4.3. Sistemde iki, üç ve dört kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişim	62
Çizelge 4.4. Sistemde bir, iki, üç ve dört kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişim	63
Çizelge 4.5. Bir kazık ve yatay iletken serildiğinde (0.5m derinliğe), 1cm çapında (İşletme İçin)	64
Çizelge 4.6. Bir kazık ve yatay iletken serildiğinde (2.5m derinliğe), 1cm çapında (Tesis İçin)	64
Çizelge 4.7. Dört kazık ve yatay iletken serildiğinde (2.5m derinliğe), 1cm çapında....	64
Çizelge 4.8. Dört kazık ve yatay iletken serildiğinde (2.5m derinliğe), 1cm çapında ve Counterpoise uygulaması (İki tarafa 5m iletken serilmesi ve 1m ² levha).....	65
Çizelge 4.9. Kazıkların Çakılma Durumlarına göre topraklama empedansı	65

1. GİRİŞ

Yıldırım, medeniyetin başlangıcından bu yana insanları şaşırtan doğa olaylarından biridir. 1847’de Benjamin Franklin, yıldırımın elektrik yüklerinin hareketinin sonucu olduğunu göstermek için uçurtma deneyini ilk kez önerdi. O zamandan bu yana bilim camiası, çeşitli deneyler yoluyla yıldırımın fiziksel mekanizmalarını ve etkilerini anlamaya çalıştı. Şu anda, güç sistemi sektöründeki yıldırım faaliyeti, güç dağıtım kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olan periyodik bozulmaların ana nedenlerinden biridir. Yıldırım, insanlık tarihi boyunca toplumu etkileyen, korkutan, yönlendiren ve çeşitli anlamlara sahip olan doğa olaylarından biridir. Yıldırım gücünün insanlar ve doğa üzerinde büyük etkisi oldu. Bu etki öyle noktalara ulaşmış ki mitolojilere bile girmiştir. Yunan tanrısı olarak bilinen Zeus, hem de İskandinav mitolojisinde yıldırım tanrısı olan Thor’un özelliği insanları cezalandırmak için yeryüzüne yıldırım düşürmeleri idi.

İnsan ölümleri, orman ve bina yangınları, toplu hayvan ölümleri gibi pek çok alanda hayatımızı etkiliyor. Meteoroloji Genel Müdürlüğü’ne göre, bir kişiye yıldırım çarpması ihtimali 600.000’de 1 olup, yıldırım çarpması ciddi ölüm veya yaralanmaya neden olacaktır. Örneğin Mayıs 2018’de yalnızca Türkiye’de yıldırım düşmesi sonucu 9 kişi öldü, 26 kişi yaralandı, 120’den fazla hayvan telef oldu. Yıldırım çarpması sonucu dünya çapında her yıl ortalama 6.000 kişi ölmekte, 240.000 kişi ise yaralanmaktadır.



Şekil 1.1. Bir doğa olayı olan yıldırımın görünümü ve yıldırımın düşme anı (Mudanya/Türkiye)

Yıldırım tarih boyunca bilim adamlarının ilgisini çekmiş ve üzerinde çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yıldırımın yapısına bakmak istersek, Amerikalı kimyager Harold C. Urey ve Stanley Miller, organik moleküllerin oluşumunda yıldırımın rolünü simüle ederek bu teoriyi destekleyen önemli bilgiler elde ettiler. Benjamin Franklin’in 18. yüzyıldaki ünlü uçurtma deneyi, yıldırımın elektriksel bir olay olduğunu gösterdi ve

paratonerin icadına yol açtı. Dünya üzerinde en çok yıldırıma maruz kalan bölgeler NASA verilerine göre, Ekvator bölgeleri, Amerika'nın Florida eyaleti ve İskandinav ülkeleri dünyanın yıldırıma en çok maruz kalan bölgeleri arasında yer alıyor ve burada yapılan araştırmalar, yıldırımın etkilerinin ve korunma yöntemlerinin anlaşılmasına önemli katkı sağlıyor.

Bu çalışmaların öncüleri M. A. Uman ve Vladimir A. Rakov, Florida Üniversitesi'nde yıldırımın elektromanyetik alanı üzerine çalışmaya devam ettiler. Yıldırım yeryüzüne düştüğünde elektrik ve manyetik alanlar oluşturur. Bu çalışmanın amacı da oluşan yıldırım elektromanyetik darbeleri (YEMD) ile ilgili literatüre katkı sağlamaktır. YEMD'in oluşturduğu dalgalanmalar orta ve yüksek gerilim sistemlerinde ciddi hasara neden olabilir. Orta ve yüksek gerilim şebekelerinde yeterli koruma garanti edilmezse sistemler ve pahalı cihazlar zarar görebilir. YEMD'in neden olduğu dalgalanmalar ve akımlar güç kalitesini, tedarik güvenliğini ve sistem güvenilirliğini doğrudan etkiler. Bu çalışma orta ve yüksek gerilim iletim hatlarına odaklanmaktadır.

Bu çalışmada YEMD'in enerji dağıtım ve iletim şebekelerinde neden olduğu bozulmalar, patlamalar ve elektrik kesintilerinin yanı sıra dolaylı olarak düşen YEMD'in enerji iletim hatları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. YEMD'e maruz kalınması durumunda güç sisteminin ek koruma yöntemleriyle korunması gerekir. Korunma yöntemlerinden biri olan parafudr takılması durumunda kule temelinin direnci YEMD'in performansına olumlu veya olumsuz etki yapabilir. Bu tez çalışmasında, çeşitli durumlarda her iki etkiyi de özel olarak incelenmiştir. İletim hatlarının YEMD'den korunması için iki farklı tasarım düşünülmüştür. Birincisi her direğin seçilmiş fazlarına parafudr takılması, ikincisi ise seçilen direklerin tüm fazlarına parafudr takılmasıdır. Parafudr'ların farklı kurulum konfigürasyonları, eşik gerilimi olarak hat izolatörlerinin atlama gerilimi değeri kullanılarak ve parafudr'larla donatılmış direklerde fazlara takılan parafudr sayısı değiştirilerek değerlendirilmiştir. Çalışmada her hat bölümü için en uygun parafudr konfigürasyonunun nasıl belirleneceği açıklanmaktadır. Ayrıca uluslararası literatür, iletim hatlarının YEMD performansının genellikle (direk) kule temel direncinin düşürülmesiyle iyileştirilebileceğine işaret etmektedir. Çalışmada bu durum dikkate alınmıştır. Ayrıca ulusal literatürde yaygın olarak yapılan çalışmalarda hattın karakteristik empedansının YEMD performansı ile ilişkisi araştırılmamıştır. Tez çalışmasında hattın karakteristik empedansı da analizlere dahil edilmiştir. Bu durum sadece YEMD'in ait olduğu hattın topraklama direncinin değil aynı zamanda hattın karakteristik empedansının da dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

YEMD'in etkinliği, zemin koşulları, topraklama tasarımı ve YEMD akımının enjeksiyon noktalarının konumu gibi çeşitli parametrelerin simülasyonu ve sayısal yöntemlerinin incelenmesi yoluyla belirlenir. Bu çalışmanın benzersiz değeri, bu yazıda TEİAŞ Genel Müdürlüğü ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden elde edilen veriler üzerinde MATLAB/Simulink ve EMTP-ATP simülasyon programları kullanılarak gerçek zamanlı transient (geçici) analizi yapılmasıdır. (Darbe etki süresi ölçülemediğinden eşit alınmıştır.)

Bu çalışma sayesinde daha basit ve pratik bir matematiksel modelleme geliştirilecek ve ortaya çıkan modelleme, ulusal elektrik şebekesinde YEMD kaynaklı bozuklukların çözümünü önemli ölçüde kolaylaştıracaktır. Ortaya çıkan matematiksel ve blok modeller bu alanda daha sonraki araştırmalara ışık tutacak, ancak aynı zamanda

bulguların uluslararası literatürde yayınlanma potansiyeli açısından da yenilikçi kabul edilebilir. Son olarak tezin amacı, yıldırım elektromanyetik darbesinin düşmesi sonucu oluşacak aşırı gerilimleri incelemek, bu gerilimlerin topraklama dirençleriyle olan ilişkisini araştırmak, YEMD'in doğrudan ve dolaylı olarak (kublaj etkisi) hatta veya enerji tesisine düşmesi sonucu oluşan zararların en aza indirgenmesi için elektromanyetik uyumluluk (EMC) açısından incelenerek ekranlama metotları ile yeni bir korunma metodu geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu temelde, tez çalışması ile enerji iletim hatlarında ve bu hatlarla ilişkili tesislerde YEMD kaynaklı oluşabilecek elektriksel arızaların analizi, konumlarının tespiti ve etkilerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır.



2. KAYNAK TARAMASI

Yıldırım ile ilgili bugüne kadar pek çok çalışma yapıldı. Ancak bu literatürün şekillenmesine öncelik veren önemli çalışmalar da mevcuttur. 1908 yılında K.W. Wagner enerji nakil hatlarına yıldırım düşmesinin neden olduğu ilk teorik çalışmayı gerçekleştirdi. Bu çalışma, yıldırım dalgalarının neden elektrik hatlarına çarptığı konusunda teorik bir açıklama sunmaktadır (K.W. 1908).

1929'da Bewley, Wagner'in teorisiyle yıldırımın neden olduğu indüklenmiş alanın hemen yok olamayacağını gösterdi (L. Bewley 1929). Aigner'in 1935 tarihli makalesi, literatürde güncel konuyla ilgili olarak yıldırım çarpması nedeniyle zemin üzerindeki dikey yıldırım yollarının tetikleyici etkisinin dikkate alınması gerektiğini belirten ilk makale olmuştur (V. Aigner 1935). 1942'de C. F. Wagner ve Bay Mc Cann, yansıyan dalgalanmalarla ilgili bir bildiri yayınladı. Bu makalede Aigner'in çalışmasına ek olarak, yansıyan darbelerin de yıldırım kanallarında akım etkileri ürettiği gösterilmiştir. Gök gürültülü sağanak yağışların oluşmasında ortam sıcaklığının önemli bir parametre olduğunu da açıkladı (C. F. Wagner vd. 1942).

Simpson ve Lomonosov'un teorisine göre yıldırım bulutundaki elektrik yükü, atmosferdeki sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan hava akımlarının yer değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Hava akımlarının hareketi buluttaki su parçacıklarını etkiler. Bu durum dinamik bir hareketi ortaya çıkarmaktadır. Elster ve Geitel'e göre buluttaki negatif ve pozitif yük merkezleri arasındaki mesafe 2 ila 3 km'dir. Negatif yükler altta, pozitif yükler ise üsttedir (Wagner vd.1942). Yıldırım kaynağını temsil eden negatif yükün merkezi ile Dünya arasında 500 metre ila 10 km kadar mesafe vardır. Negatif yük merkezi etrafındaki elektrik alanı 10 kV/cm'ye ulaştığında (10 kV/cm, büyük su damlacıkları içeren havanın kırılma voltajıdır) buluttan yere doğru iyonizasyon kanalları oluşmaya başlar. İyonlaşma kanallarında elektronların hızı ışık hızının 1/10'u kadardır (Wagner vd. 1942). Aynı yıl Wagner ve arkadaşları geri dönüş akımı denilen (return stroke current (RSC)) terimi ve yapıyı buldular. İlk deşarjdan 40 µs sonra ikinci şarj merkezi de aynı kanal üzerinden deşarj yapar. İkinci boşalma, ilk boşalma gibi aşamalar halinde gerçekleşmek yerine, birinciden on kat daha uzun sürede, yani neredeyse ışık hızında gerçekleşir. Bu deşarj sırasında RSC tekrar ortaya çıkar (Wagner ve McCain 1942).

1948'de yayınlanan bir makalede Szpor, Wagner ve McCann'den farklı olarak dikey yıldırım çarpmalarının neden olduğu gerilimleri hesaplamak için daha karmaşık varsayımlar kullandı. Szpor hem manyetik indüksiyonu hem de elektrostatik indüksiyonu dikkate aldığını söyledi. Bu sonuçların yıldırım düşmesine yakın alanlar için geçerli olduğunu açıkladı. (Spoll 1948). 1954 yılında Golde, indüklenen voltajın enerji nakil hatlarının arıza oranına etkisi üzerine bir çalışma yayınladı. İndüklenen gerilimleri hesaplamak için kullanılan varsayımlar Wagner ve McCann'in varsayımlarından biraz farklıdır. Ancak farklı varsayımlar altında indüklenen gerilimlerin maksimum değerleri arasındaki farkın küçük olduğunu buldu. Analitik teknikler kullanılarak gerçekleştirilen Golde hesaplamaları, skaler bir potansiyel hesaplamasıdır. (R. Golde 1954). 1955 yılında R. Lundholm, kısa ve uzun mesafeli yüksek gerilim iletim hatlarında indüklenen gerilimleri yaklaşık olarak hesaplamak için Wagner ve McCann varsayımlarını kullandı. Lundholm, indüklenen voltajı formüle ederken manyetik alanı göz ardı etti. Bunun tatmin edici olmayan bir teorik sonuç olduğu gösterilmiştir. (R. Lundholm, 1955). 1958'de

Rusck, kısa ve uzun mesafeli alçak gerilim iletim hatlarında indüklenen gerilimleri hesapladı. Önemli bir uluslararası standart olmaya devam eden ve bugün hala kullanılan kapalı formulu bir gösterim ortaya çıkarmıştır. (S. Rusck 1958). 1967’de Chowdhuri ve Gross, Rusck’ın hipotezinin neden olduğu aşırı gerilimi hesaplamak için iki farklı denklem biçimi önerdiler ve farklı sonuçlar elde ettiler (P. Chowdhuri 1967).

1986 yılında Chowdhuri-Brüt yaklaşımını değiştiren Liew ve Mar, kapalı bir çözüm önermişlerdir (A.C. Liew vd. 1968). Düşme noktası yakınında indüklenen gerilim, çoklu iletken direğin yapısından etkilenir. Bu etki, dikey hat konfigürasyonları da dahil olmak üzere hat konfigürasyonlarına oldukça bağlıdır. Ancak yatay hat konfigürasyonunda iletkenler arasındaki mesafeye ve düşme noktasının mesafesine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir (Chowdhuri 1990). İletken sayısının artırılması, hat sonlandırma noktasında indüklenen aşırı gerilimin azalma hızını artırır. İletken sayısı arttıkça indüklenen aşırı gerilim azaldığını ilk olarak tespit etmeye çalışmışlardır (Idone 1982; Rachidi 1997). Topraklanma (koruma) iletkenleri üzerine de birçok çalışma yapılmıştır. Topraklanmış bir iletkenin kullanılması, indüklenen aşırı gerilimleri azaltır. Bu azalma, topraklama iletkeninin faz iletkenine veya topraklanmamış iletkenine göre konumuna bağlı olarak değiştiğini öne sürmüştür (Chowdhuri 1990). Koruma kablolarının etkinliği genellikle iki bitişik topraklama noktası arasındaki boşluklardan etkilenir (Paolone vd.2004). Cooray yapmış olduğu çalışma ile Yıldırım Elektromanyetik Darbesinin (YEMD) düşme noktası ile iletim hattı ile arasındaki bağlantının iki km’den fazla olduğu uzaklıklarda ihmal edilebilir olduğunu savunmuştur (Cooray 2003). Korona etkisi üzerine de birçok çalışma yapılmıştır. Ancak literatüre bu durumu ilk kez söyleyen Silva’dır. Silva’nın görüşüne göre koronadan etkilenen indüklenmiş aşırı gerilim, yıldırım darbesinin türüne bağlıdır (doğrudan veya dolaylı darbe). Dolaylı darbeye indüklenmiş aşırı gerilim genliği artar. Ancak, doğrudan hatta düşmesi durumunda indüklenmiş aşırı gerilim genliği azalır. İndüklenen aşırı gerilimin artışı, korona ile artırılan hat kapasitansı arttıkça açıklanabilir. Bu yüzden yıldırım kaynaklı aşırı gerilim yayılma hızı azaldıkça, indüklenen toplam aşırı gerilimi artırır. Genel olarak, korona, sonlu toprak iletkenliği durumunda indüklenen aşırı gerilim üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ancak doğrudan düşen bir yıldırım darbesinde korona etkisi, indüklenen aşırı gerilimi sonlu toprak iletkenliğinden daha fazla etkiler. Buna ilaveten korona etkisi, indüklenen aşırı voltajın yükselme süresini artırır ve ön eğimi ve dolayısıyla çıkış eğimini azaltır (Silva 2002). 2001 yılında Hoidalen, sonlu fark zaman alanı (FDTD) yöntemini kullanarak sonlu toprak iletkenliğini tanımlamak için kapalı bir form önerdi (H. Hoidalen 2003).

Günümüzdeki literatüre bakacak olursak, R. Batista, P.E.B.B. Louro ve J.O.S. Paulino, yaptıkları çalışmada derin dikey elektrotlardan oluşan topraklamaya sahip 230-kV iletim hattına yıldırım düşmesi sonucu oluşan etkileri incelemişlerdir (R. Batista vd. 2021). Frederico S. Almeida, Fernando H. Silveira, Alberto De Conti ve Silverio Visacro ise iletim hatlarının kule modeline göre negatif yıldırım darbelerinin düşmesi sonucu yansıyan darbelerin büyüklüklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada 138, 230 ve 500 kV’larda kullanılan kule modelleri ele alınmıştır (F. Almedia vd. 2021).

Mario Paolone, Farhad Rachidi, Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, Marcos Rubinstein, Vladimir A. Rakov ve Martin A. Uman, yıldırım elektromanyetik darbesinin havai hatlara düşmesini teorik, sayısal simülasyon ve deneysel olarak doğrulamaya çalışmışlardır (M. Paolone vd. 2009). Leonid Grcev ve Blagoja Markovski, yıldırım

darbesinin topraklama ızgaralarının empedansına bağlı olarak analizini yapmışlar ve topraklama modeli olarak kullanılan ızgara tipi yapıların etki alanı ve empedansına bağlı olarak oluşan indüklenmiş gerilimi tespit etmeye çalışmışlardır (L. Grcev vd. 2022). Yichong Li, Qi Zhang, Xiaojun Luo, Qing Si, Yuzhou Ran, Jianbao Wang, Shangchen Fu, Zheng Sun ve Lihua Shi, bir çalışma grubu olarak örnek bir havai hattına yakın düşen yıldırım darbesinin oluşturduğu akımı ölçmüş ve akım üzerindeki geri dönüş hızını analiz etmeye çalışmışlardır (Y. Li vd. 2021). K. Ishimoto, F. Tossani, F. Napolitano, A. Borghetti ve C. A. Nucci, dağıtım hatlarındaki koruma iletkeni dikkate alınarak yıldırım elektromanyetik darbesinin düşmesi sonucu oluşan gerilim seviyelerini incelemişlerdir (F. Tossani vd. 2021).

Daniele Mestriner, Massimo Brignone, Renato Procopio, Martino Nicora, Elisabetta Fiori, Alexandre Piantini ve Farhad Rachidi, havai hatların yıldırım düşmesine göre performansının değerlendirilmesi için efektif bir metodoloji önermişlerdir (D. Mestriner vd. 2021). Rafael M. Gomes, Fernando H. Silveira ve Silverio Visacro, enerji iletim hatlarının açıklık faktörüne göre yıldırım darbesinin düşmesi sonucundaki durumları incelemişlerdir (R. M Gomes vd. 2022). Erika Stracqualursi, Rodolfo Araneo, Jose Brand, Faria B ve Amedeo Andreotti, havai elektrik dağıtım hatlarının doğrudan yıldırım darbelerine karşı toprak altı telleri ile korunmasını araştırmışlardır (E. Stracqualursi vd. 2023). Yin Zhang, Cheng Liao, Yuping Shang, Xuanming Zhong ve Weiping Cao, havai iletim hatlarında yıldırımdan kaynaklanan gerilimlerin hızlı değerlendirilmesi için yeni bir yöntem geliştirmeye çalışmışlardır (Y. Zhang vd. 2021). Vernon Cooray, Gerald Cooray, Marcos Rubinstein ve Farhad Rachidi, geri dönüş vuruşlarının elektromanyetik alan bileşenlerinin görünürdeki eşitsizliği üzerine yeni bir inceleme türü önermişlerdir (V. Cooray vd. 2023). Jinxin Cao, Yaping Du, Yuxuan Ding, Ruihan Qi, Binghao Li, Mingli Chen ve Zhe Li, 10 kV dağıtım hatları için yıldırımdan korunma şemalarının kapsamlı değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır (J. Cao vd. 2021).

Wen Cao, Haoming Miao, Qian Liu, Wei Shen ve Hao Yang, trafo merkezinin sekonder tarafındaki kablolarda yıldırım düşmesi sonucu etkiler ve korunma yöntemleri üzerine çalışmışlardır (W. Cao vd. 2021). Yang Zhang, Hongcai Chen ve Yaping Du, bir iletim hattına yıldırım düşmesi sırasında fotovoltaiik sistemlerindeki geçici olayları incelemişlerdir (Y. Zhang vd. 2021). Michele N. N. Santos ve Alexandre Piantini, eşleştirilmiş deneysel bir havai hat üzerinde yıldırımdan kaynaklanan gerilimlerin analizini incelemişlerdir (M. N. N. Santos vd. 2022). Li Cai, Qiang Hu, Jianguo Wang, Jiehua Li, Mi Zhou, Quanxin Li ve Yadong Fan, yıldırım sonucu oluşan yakın elektrik alan dalga formlarının karakterizasyonunu incelemişlerdir (L. Cai vd. 2021). Li Cai, Qiang Hu, Mi Zhou, Yifeng Ke, Quanxin Li, Jianguo Wang ve Yadong Fa, yıldırım yer tespit sistemi tarafından tahmin edilen yıldırım akımında toprağa ve dağıtım hattına tetiklenen yıldırım arasındaki farkı incelemişlerdir (L. Cai vd. 2021).

Xiao Lei, Tao Cui, Xiaohui Wu, Hong Zeng, Qiang Liu ve Linhuan Li, yıldırım çarpması nedeniyle yüksek gerilim iletim hatlarında oluşan rezonans aşırı gerilimi üzerine bir araştırma yapmışlardır (X. Lei vd. 2021). Fabio Tossani, Fabio Napolitano, Kazuyuki Ishimoto, Alberto Borghetti ve Carlo Alberto Nucci, değişken geri dönüş hızını dikkate alan yeni bir yıldırım elektromanyetik alanı hesaplama yöntemi geliştirmişlerdir (F. Tossani vd. 2019). Edison Soto, Ernesto Perez ve Diego del Rio, havai hatların yıldırım performansını hesaplamak için Rusck formülü ve çoklu doğrusal olmayan regresyon

kullanımı ile transient olayları açıklamaya çalışmışlardır (E. Soto vd. 2020). Nutthaphong Tanthanuch, Savinee Ludpa ve Peerawut Yutthagowith, sinir ağı yöntemine dayalı yıldırım darbe geriliminin dalga biçimini tespit etmeye çalışmışlardır (N. Tanthanuch vd. 2020). Fabio Tossani, Alberto Borghetti, Fabio Napolitano, Alexandre Piantini ve Carlo Alberto Nucci, kentsel alanlarda havai enerji dağıtım hatlarının yıldırım performansını incelemişlerdir (F. Tossani vd. 2018). Hongcai Chen, Yaping Du, Mengqing Yuan ve Qing Huo Liu, bir dağıtım hattında yıldırım kaynaklı gerilimleri hibrit FDTD-SPICE yöntemi kullanan parafudrlar ile analiz etmeye çalışmışlardır (H. Chen vd. 2021).

F. Tossani, F. Napolitano, A. Borghetti ve C. A. Nucci, radyal elektrik alanın yıldırım kaynaklı aşırı gerilimler üzerindeki etkisinin istatistiksel değerlendirmesini yapmışlardır (F. Tossani vd. 2019). Osman Kurnaz ve Serkan Aksoy, yıldırımın geri dönüşü ile yayılan elektromanyetik alanların kaya formasyonlu kayıplı zemin üzerine düşmesi sonucu olayları incelemişlerdir (O. Kurnaz, S. Aksoy 2021). K. Ishimoto, F. Tossani, F. Napolitano, A. Borghetti ve C. A. Nucci, dağıtım hatlarının doğrudan koruma iletkenine yıldırım düşmesi sonucu LEMP etkisini incelemişlerdir (K. Ishimoto vd. 2020). Alberto Borghetti, Kazuyuki Ishimoto, Fabio Napolitano, Carlo Alberto Nucci ve Fabio Tossani, yıldırım elektromanyetik darbenin doğrudan havai dağıtım hatlarına düşmesi sonucu etkilerini incelemişlerdir (A. Borghetti vd. 2018).

Akiyoshi Tatematsu, Farhad Rachidi ve Marcos Rubinstein, kayıplı dielektrik malzemeler içindeki ince hatların FDTD tabanlı yıldırım elektromanyetik darbesinin simülasyonu çalışması ile etkilerini incelemişlerdir (Tatematsu vd. 2019). Vegard Steinsland, Lasse Hugo Sivertsen, Emil Cimpan ve Shujun Zhang, karmaşık topraklama sistemlerinin bulunduğu bir tesiste yıldırım geçici olaylarına ve EMI değerlendirmelerine dahil etmek için yeni bir yaklaşım önermişlerdir (Steinsland V vd. 2019). Daniele Mestriner, Massimo Brignone, Renato Procopio, Alexandre Piantini ve Farhad Rachidi, yeni bir kanal tabanlı yıldırım akımı formülünü analitik olarak ayarlanabilir parametrelerle çözümünü önermişlerdir (Daniele M. vd. 2020). Jianguo Wang, Yating Zhao, Li Cai, Yuqian Fang, Quanxin Li, Rui Su, Shoupeng Wang ve Mi Zhou, doğrudan düşen yıldırımın 10 kV güç dağıtım hattının faz teline düşmesi nedeniyle yıldırım düşme noktasında üç fazlı aşırı gerilimi incelemişlerdir (Jianguo W. Vd. 2020). Jinxin Cao, Yaping Du, Yuxuan Ding, Ruihan Qi, Mingli Chen, Zhe Li, Xiangen Zhao ve Amedeo Andreotti, bir dağıtım şebekesinde farklılaştırılmış parafudr konfigürasyonu ile yıldırımdan korunma yöntemlerini araştırmışlardır (Jinxin C. Vd. 2022).

Celio Fonseca Barbosa ve José Osvaldo Saldanha Paulino, Rusck Yaklaşımının dolaylı düşen yıldırımın hava elektrik hatlarında oluşturduğu etkileri incelemişlerdir (C.F. Barbosa, J. Osvaldo vd. 2021). Riccardo Aramini, Massimo Brignone, Daniele Mestriner, Matteo Pastorino, Renato Procopio, Andrea Randazzo ve Marcos Rubinstein, yıldırım düşmesi sonucu oluşan elektrik alan değerlerinin Fourier dönüşümü ile çözümünü yapmaya çalışmışlardır (R. Aramini vd. 2022). Akiyoshi Tatematsu ve Ryota Mori, üç boyutlu FDTD yöntemi kullanılarak çok noktalı topraklanmış kalkan telli ve parafudrlu bir dağıtım hattının düzlem-dalga kuplaj analizini yapmışlardır (A. Tatematsu, R. Mori 2022). Pengkang Xie ve Zhen Fang, parafudrlarla donatılmış korumasız 220 kV iletim hatlarının yıldırım performansını incelemişlerdir (P. Xie, Z. Fang 2022). Zacharias G. Datsios, Pantelis N. Mikropoulos, Thomas E. Tsovilis, Emmanuel Thalassinakis ve Grigorios Pagonis, 150 kV sistemine hat parafudr uygulamasını incelemişlerdir (Z.G. Datsios vd. 2022). Jun Guo, Wei-Chen Xie, Yan-Zhao Xie ve Sergey V. Tkachenko,

kayıplı zemin varlığında çok iletkenli iletim hatlarına yüksek frekanslı elektromanyetik alan kuplajının bir modelini incelemişlerdir (J. Guo vd. 2021).

Leonid Grcev, Blagoja Markovski ve Mirko Todorovski, iletim hattı topraklanmasında kullanılan counterpoise yapısının yıldırım düşmesi sonucu performansını incelemişlerdir (L. Grcev vd. 2022). Vernon Cooray, Gerald Cooray, Marcos Rubinstein ve Farhad Rachidi, yıldırım elektromanyetik darbesinin düşmesini Rusck Alan-İletim Hattı kublaj modeli ile incelemişlerdir (V. Cooray vd. 2023). André M. de Moraes, Rodrigo M. S. de Oliveira ve Marcus V. A. Nunes, yıldırım düşmesi sonucu oluşan aşırı gerilimlerin azaltılması için paralel bağlı alçak gerilim parafudurlarının kullanılması önerisinde bulunmuşlardır (A. M. Moraes vd. 2023). Mi Zhou, Weihang Zhao, Shengquan Zheng, Yongming Guo, Zehong Yang, Jianguo Wang, Li Cai ve Yadong Fan, paralel kabloların yıldırım endüktif kuplaj özelliklerini hesaplamaya ve ölçüm doğrulaması yapmaya çalışmışlardır (M. Zhou vd. 2022). Senaa Kaouche ve Bachir Nekhoul, bir kule (direk) kaskatlarının topraklama sistemi üzerindeki yıldırım dalgalanmalarının modellenmesini göstermeye çalışmışlardır (S. Kaouche, B. Nekhoul 2023).

Akiyoshi Tatematsu ve Akifumi Yamanaka, trafo merkezlerinde topraklama şebekeleri üzerindeki korumalı kontrol kabloları ile sekonder devrelerde yıldırım kaynaklı dalgalanmaların üç boyutlu FDTD tabanlı simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir (Tatematsu A., Yamanaka A. 2023). Bo Zhang, Chaoran Li, Zhuoran Liu ve Jinliang He topraklama şebekesine doğrudan yıldırım çarpması sonucu sekonder kablolardaki oluşan transient analizini yapmışlardır (B. Zhang vd. 2023). Erika Stracqualursi, Rodolfo Araneo, Nagananthini Ravichandran, Amedeo Andreotti ve Salvatore Celozzi ise enerji hatlarında iletkenlerin doğrudan ve dolaylı yıldırımlardan kaynaklanan dalgalanma yayılımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Akifumi Yamanaka, Kazuyuki Ishimoto ve Akiyoshi Tatematsu, EMT simülasyonunda yıldırım kanalından ve çarpılan direkt kaynaklanan YEMD'leri dikkate alan dağıtım hatlarının doğrudan yıldırım dalgalanma analizini yapmışlardır. Aynı araştırmacılar (A.Yamanaka vd. 2023) başka bir çalışmada ise yıldırım dalgalanması üzerindeki YEMD etkisinin EMT simülatörlerinde iletim hatlarının analizine dahil edilmesi ile EMT simülasyonlarını kullanmaya başlamışlardır.

Turan Cakil, Hamza Feza Carlak ve Sukru Ozen, yıldırım elektromanyetik darbelerinin havai enerji iletim hatlarındaki elektrostatik, elektromanyetik alanlar ve indüklenmiş gerilimler üzerindeki dolaylı etkisini incelemişlerdir (T. Çakıl vd. 2024). Alexandre Piantini, ise alçak gerilim dağıtım hatlarında yıldırım kaynaklı gerilimlerin incelenmesini sağlayan bir çalışma yapmıştır (A. Piantini 2024). Li Cai, Wenchao Fan, Ruisheng Yan, Muzi Li, Mi Zhou, Jinxin Cao ve Jianguo Wang ise süreksiz empedans modeli ile rüzgâr türbinlerine yıldırım dönüş darbesinin elektromanyetik alanlarını incelemişlerdir (L. Cai vd. 2024). Weihang Zhao, Jianguo Wang, Mi Zhou, Li Cai, Jingkang Huang ve Jinxin Cao ise trafo merkezindeki sekonder taraftaki koruma iletkenin endüktif kuplaj etkisi üzerinde yıldırım akımının etkisini incelemişlerdir (W. Zhao vd. 2024). Celio Fonseca Barbosa, José Osvaldo ve Saldanha Paulino ise kısa döngülerde yıldırımla indüklenen gerilim için kapalı bir ifade önermişlerdir (C. F. Barbosa vd. 2016).

Bu araştırmalar, yıldırımın elektrik iletim ve dağıtım sistemleri üzerindeki etkilerini geniş bir perspektiften ele alarak, çeşitli analiz ve yöntemlerle bu etkileri azaltmayı hedeflemektedir. Bu tez çalışmasında farklı olarak yıldırımın düşmesi sonucu

oluşan Yıldırım Elektromanyetik Darbesi'nin oluşturduğu elektromanyetik alanların, indüklenmiş gerilimlerin ve koruma yöntemleri üzerinde yapılan analizler sonucu enerji iletim hatlarının ve sistemlerinin bu alanda elektromanyetik uyumluluk yöntemleri açısından uyumluluğunu artırmak ve tesislerin elektriksel güvenliğini artırmayı amaçlamaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yıldırım elektromanyetik darbesinin enerji iletim hatlarına olan etkisinin matematiksel olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Elektromanyetik alanlar ve dalgalar, enerji iletim hatları, kublaj modelleri, yıldırım elektromanyetik darbe modelleri ve enerji iletim hatlarında kullanılan topraklama ve korunma yöntemleri hakkında kuramsal bilgiler sunulmuştur. Ayrıca çalışma kapsamında kullanılan, benzetim programları modelleri, darbe modelleri ve kublaj modeli hakkında detaylı bilgiler sunulmuştur.

3.1. Elektromanyetik Alan Kavramı

On dokuzuncu yüzyılın başlarında James Maxwell, daha sonra Maxwell denklemleri olarak bilinecek olan elektromekanik fiziğinin denklemlerini (2.1), (2.2), (2.3) ve (2.4) tanımlama girişiminde diğer araştırmacılar ve bilim insanları tarafından üretilen önceki çalışmalardan yararlanarak elektrik ve manyetizma yasalarını birleştirdi (J.C. Maxwell, 1865). Bu kanunlar Oliver Heaviside tarafından yeniden yazılmıştır (O. Heaviside, 1893, B. J. Hunt, 2012, S. Ramo vd. 1997). Bugün Maxwell'in diferansiyel formdaki denklemleri olarak bilinmektedir ve şu şekilde verilmiştir:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathbf{J}_m - \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J}_e - \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E} = \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \mu \mathbf{H} = \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.4)$$

$\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{J}_m$ ve $\mathbf{J}_e$ zaman ve uzayda reel fonksiyonlardır, örneğin $\mathbf{E}$ ($x, y, z; t$), sırasıyla (V/m) cinsinden elektrik alan vektörünü, $\mathbf{H}$ (A/m) cinsinden manyetik alan vektörünü, $\mathbf{B}$ (Wb/m²) cinsinden manyetik akı yoğunluğu vektörünü, $\mathbf{D}$ (C/m²) cinsinden elektrik akı yoğunluğu vektörünü, $\mathbf{J}_m$ (V/m²) cinsinden manyetik gerilim yoğunluğu vektörünü ve $\mathbf{J}_e$ (A/m²) cinsinden elektrik akımı yoğunluğu vektörünü temsil eder. " ε " (F/m) cinsinden elektrik geçirgenliği, " μ " (H/m) cinsinden manyetik geçirgenlik ve " v " (C/m³) cinsinden birim hacim başına yük yoğunluğudur.

Elektrik akımı yoğunluğu elektrik alanıyla doğru orantılıdır ve Ohm yasası kullanılarak değerlendirilir. $\vec{J}_e = \sigma_e \cdot \vec{E}$, burada " σ_e " (S/m) cinsinden elektrik iletkenliğidir. Benzer şekilde, manyetik voltaj yoğunluğu manyetik alanla doğru orantılıdır ve $\vec{J}_m = \sigma_m \cdot \vec{H}$ kullanılarak değerlendirilir, burada " σ_m " cinsinden manyetik (Ω /m) dirençtir (S. Ramo vd. 1997).

Uzaydaki herhangi bir noktada Maxwell denklemleri çözülerek tam bir alan gösterimi elde edilebilir. Denklem (3.1) ve (3.2)'deki elektrik ve manyetik alanlar için vektör işlemlerini Kartezyen koordinatlarda genişletmek aşağıdaki denklem setine yol açar.

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = J_{e_x} + \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = J_{e_y} + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = J_{e_z} + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (3.10)$$

Denklem (3.11) ile (3.14)'deki elektrik alan bileşenlerini Ohm yasasını kullanarak karşılık gelen akım yoğunluğu bileşeniyle değiştirirsek;

$$-\frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (3.11)$$

$$-\frac{\partial H_x}{\partial z} = J_{e_y} + \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} \quad (3.12)$$

$$-\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (3.13)$$

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = J_{e_x} + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \quad (3.14)$$

Denklem (3.11) ila (3.14) olur:

$$-\frac{\partial J_y}{\partial z} = -\mu \sigma_e \frac{\partial H_x}{\partial t} \quad (3.15)$$

$$-\frac{\partial H_x}{\partial z} = J_{e_y} + \frac{\varepsilon}{\sigma_e} \frac{\partial J_y}{\partial t} \quad (3.16)$$

$$-\frac{\partial J_x}{\partial z} = -\mu\sigma_e \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (3.17)$$

$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = J_{e_x} + \frac{\varepsilon}{\sigma_e} \frac{\partial J_x}{\partial t} \quad (3.18)$$

Denklem (3.11) ile (3.12) ve Denklem (3.13) ile (3.14) birleştirildiğinde, kayıplı bir ortamdaki akım yoğunluğu aşağıdaki Denklem (3.19) gibi elde edilebilir:

$$\frac{\partial^2 E_{x,y}}{\partial z^2} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 J_{x,y}}{\partial t^2} + \mu\sigma_e \frac{\partial J_{x,y}}{\partial t} \quad (3.19)$$

Elektrik alan bileşenleri E_x ve E_y 'nin aşağıdaki şekilde aynı şekilde değerlendirilebileceği gösterilebilir.

$$\frac{\partial^2 E_{x,y}}{\partial z^2} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 E_{x,y}}{\partial t^2} + \mu\sigma_e \frac{\partial E_{x,y}}{\partial t} \quad (3.20)$$

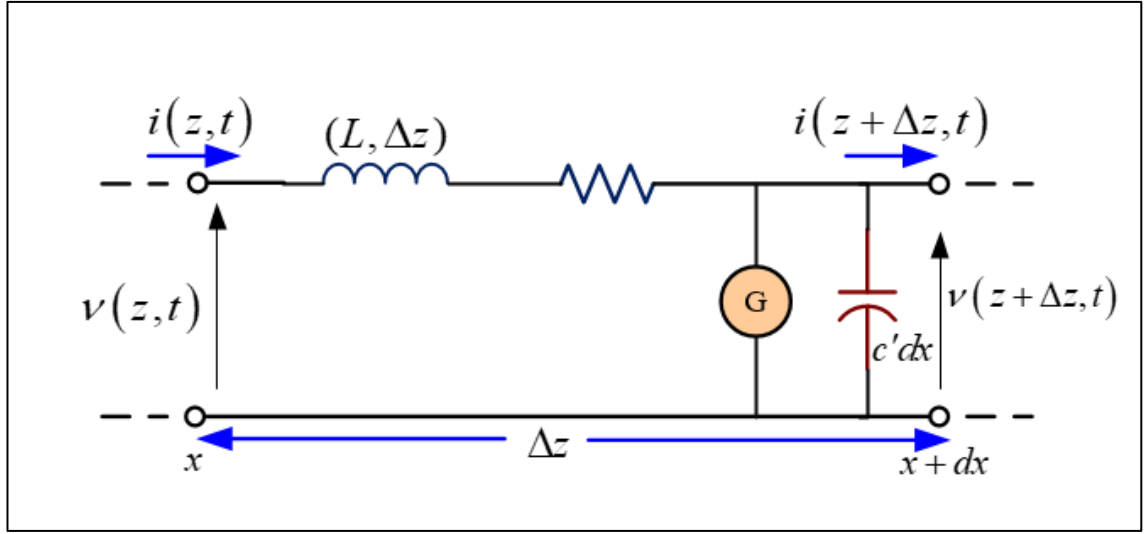
Denklem (3.19)'un sağ tarafındaki ilk terim dalga benzeri (yayılm) bir davranışı tanımlarken, ikinci terim difüzyon benzeri davranışı tanımlar (C. Christopoulos, 1990). Denklem (3.19), malzeme zayıf bir iletken ise, yani ($\sigma_e=0$) ve yüksek frekansta, yani dalga denkleminin genel bir formu ise daha da azaltılabilir (C. Christopoulos, 1990, D. H. Staelin, 2011). Diğer taraftan, eğer malzeme yüksek iletkenliğe sahipse ve dalga formu düşük frekanstaydı, Denklem (3.20), difüzyon benzeri bir davranışı temsil eden ve düşük frekanslı problemleri veya ısı iletimi gibi diğer fiziksel sistemleri tanımlamak için daha uygun olan eşitliğe indirgenir (C. Christopoulos, 1995).

$$\frac{\partial^2 J}{\partial z^2} = \mu\varepsilon \frac{\partial^2 J}{\partial t^2} \quad (3.21)$$

Bu bölümde, Denklem (3.21) ile tanımlanan EM olaylarının modellenmesine odaklanmıştır. Burada dalga Denklemi (3.21) ve devre teorisi arasındaki ilişki kullanılarak yapılır. Bu, tek boyutlu (1D) durum için kısa bir geçiş iletim hattı ile temsil edilir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi görev hattı, burada L, R, C ve G seri endüktanslardır. Bobin (H) cinsinden, direnç (Ω) cinsinden, şönt kapasitans (F) cinsinden ve admintans (S) cinsinden gösterilir. Kirchhoff'un gerilim ve akım yasalarının Şekil 3.1'de gösterildiği gibi z uzunluğundaki bir iletim hattının eşdeğer devresine uygulanması ile:

$$\Delta z \frac{\partial v}{\partial z} = -L \frac{\partial i}{\partial t} - iR \quad (3.22)$$

$$\Delta z \frac{\partial i}{\partial z} = -C \frac{\partial v}{\partial t} - Gv \quad (3.23)$$



Şekil 3.1. Kayıplı bir iletim hattı kesiti için genel devre gösterimi

Burada $v(z, t)$ ve $i(z, t)$ zamanın (t) ve uzayın (z yönü) bir fonksiyonu olarak gerilim ve akımdır. Denklem (3.22) ve Denklem (3.23)'ün birleştirilmesinin iletim hattı devresinin gerilim ve akımı için bir çift denkleme yol açtığı gösterilebilir:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{G \cdot R}{(\Delta z)^2} v + \frac{1}{(\Delta z)^2} (G \cdot L + R \cdot C) \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{L \cdot C}{(\Delta z)^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.24)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial z^2} = \frac{G \cdot R}{(\Delta z)^2} i + \frac{1}{(\Delta z)^2} (G \cdot L + R \cdot C) \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{L \cdot C}{(\Delta z)^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (3.25)$$

$G=0$ (hat admintans) varsayımı yapılırsa, Denklem (3.24) şu hale gelir:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{1}{(\Delta z)^2} R \cdot C \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{L \cdot C}{(\Delta z)^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (3.26)$$

Denklem (3.26) ve Denklem (3.20) arasındaki izomorfizm kullanılarak, elektromanyetik alan aşağıdaki eşitlikler (3.27) kullanılarak eşdeğer devrelerde gerilim ve akım tespiti kolaylıkla yapılabilir.

$$E \leftrightarrow \frac{v}{\Delta z}, H \leftrightarrow \frac{i}{\Delta z}, \varepsilon \leftrightarrow \frac{C}{\Delta z}, \mu \leftrightarrow \frac{L}{\Delta z}, \sigma_e \leftrightarrow \frac{G}{\Delta z} \quad (3.27)$$

Bu inceleme, doğru parametre eşlemesini kullanarak ve modelde en yüksek çalışma frekansının dalga boyu olan $\Delta z \ll \lambda/10$ temel kuralını izleyerek ayrıklaştırma hatasını en aza indirerek, 1D elektromanyetik dalga yayılımının çözümünün basit bir iletim hatları devresini çözerek elde edilebileceğini göstermektedir. Bu kublaj modelinin temelini oluşturur. Uzunluğu Δz olan bir iletim hattı kesitinde yayılan bir sinyal, iletim hattı kesiti boyunca yayılma hızı " u " ile yayılan dalga için bir Δt zamanı gerektirir. Eşitlik (3.20) kullanılarak,

hareket eden bir dalganın yayılma hızının değerlendirildiği gösterilebilir:

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3.30)$$

Elektromanyetik yayılım ve devre teorisi arasında türetilen inceleme kullanarak, bir iletim hattı kesitindeki hız, Denklem (3.31)'e indirgeyecektir.

$$u = \frac{1}{\sqrt{\frac{C}{\Delta z} \cdot \frac{L}{\Delta z}}} \quad (3.31)$$

Dalga'nın düğüm boyunca ilerlemesi için gerekli olan zaman adımı malzeme parametreleri ve uzunluğa şu şekilde bağlıdır:

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{u} = \Delta z \times \sqrt{\frac{L}{\Delta z} \cdot \frac{C}{\Delta z}} = \sqrt{LC} \quad (3.32)$$

İletim hattı devrelerinin Şekil 3.1'de gösterildiği gibi çözülmesi, hesaplanan karakteristik empedansın bilinmesini gerektirir.

$$Z_{TL} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.33)$$

Burada Z_{TL} iletim hattının karakteristik empedansıdır ve L ve C sırasıyla empedans ve kapasitanstır.

3.2. Yıldırım Elektromanyetik Alan (YEMD) Teorisi

Yıldırım Elektromanyetik Darbe (YEMD), fırtınalar sırasında elektrostatik boşalmalar nedeniyle meydana gelen ve elektromanyetik radyasyon üreten doğal bir olaydır. YEMD, yıldırım kanallarından geçen akım nedeniyle bazen yıldırımla ilişkilendirilir.

3.2.1. YEMD tipleri

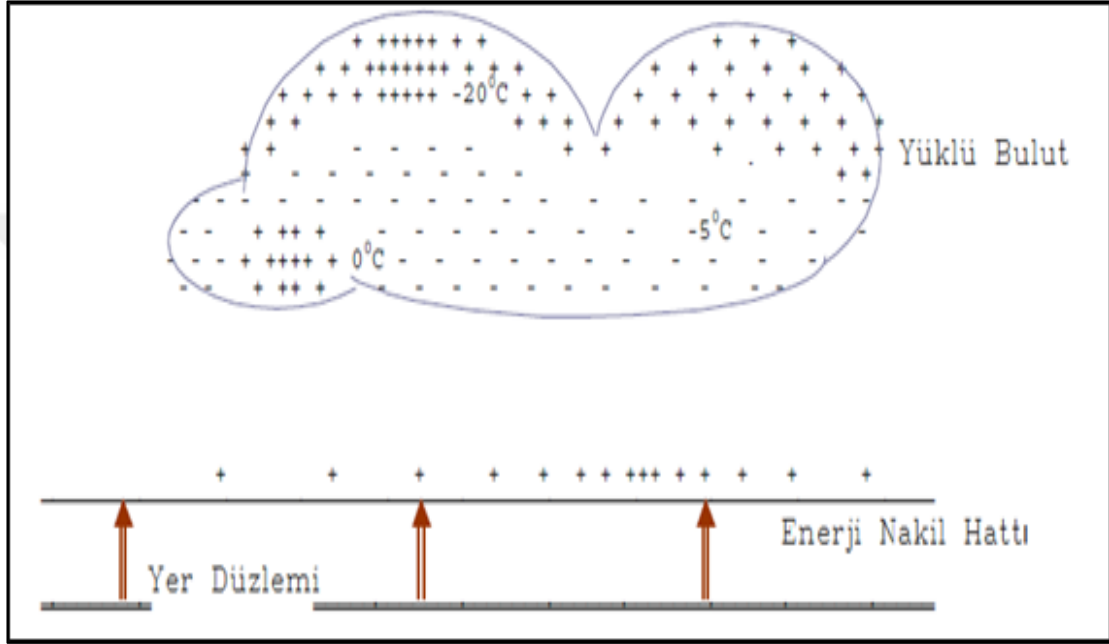
YEMD deşarjları üç tipte meydana gelir (T.T., 2004; IEEE St., 2004):

- Bulut içi deşarj
- Bulut-bulut deşarjı
- Buluttan yüzeye deşarj

Elektrik şebekeleri açısından, buluttan yeryüzüne boşalmalar, havai hatlarda dalgalanmalara neden olan en yaygın elektrik boşalma türüdür.

3.2.2. YEMD oluşum süreci

Şekil 3.2, bir enerji iletim hattı (ETL) üzerindeki yüklü bir bulutun endüktif yükünü göstermektedir. Şekilde, yüklü buluttaki negatif ve pozitif yüklerin farklı sıcaklık değerlerindeki dağılımı gösterilmiştir. Yüklü bulutun tabanında, -5°C sıcaklıkta negatif yükler bulunur ve bu yükler bulutun alt kısmına dağılmıştır. Daha yüksek irtifalarda, -20°C 'nin altındaki sıcaklıklarda pozitif yük merkezleri yer alır. Ayrıca, bu yüklü bulutların tabanında, kısmen pozitif yüklerin oluşturduğu bir bölge bulunur ve bu bölgenin sıcaklığı 0°C 'dir (J.R., 2001).



Şekil 3.2. Farklı sıcaklıkta oluşan yükler (T. Çakıl, 2017)

Şekil 3.3, bulut ile enerji nakil hattı (ENH) arasında bir kapasitör boşluğu olduğunu varsaymaktadır. Bu örnek kapasitör gösteriminde, indüklenen yük, boşaltılırken ENH boyunca neredeyse ışık hızıyla hareket eder. İndüklenen yükler hat boyunca yayıldığında hattın her iki tarafında dalgalanma dalgaları üretilir. Bu aşırı gerilim aşağıdaki denklemle ifade edilir:

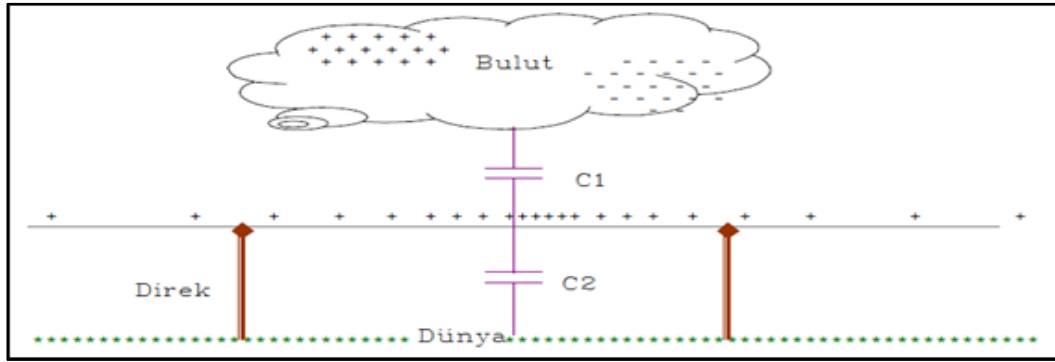
$$e_i = -E \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{q}{C} \quad (\text{V}) \quad (3.34)$$

E: Hat boyunca oluşan gerilimin tepe (maksimum) değeri

C: Yol birim uzunluğu başına kapasite

C_1 : Bulut ve yol arasındaki kapasite

C_2 : Yol ve yer arasındaki kapasite

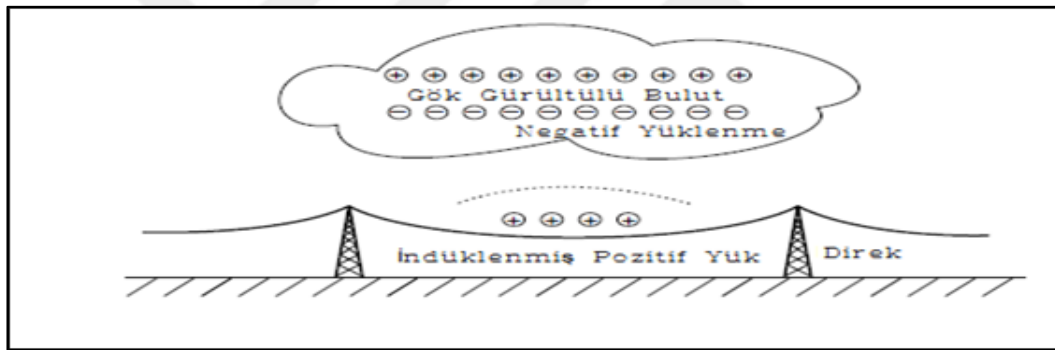


Şekil 3.3. Elektrik potansiyelinin hesaplanmasını gösteren kapasitans yapısı (Çakıl, 2017)

YEMD'in neden olduğu aşırı gerilim bazı kuramlara bağlıdır. Bu kuramlar aşağıda sunulmaktadır.

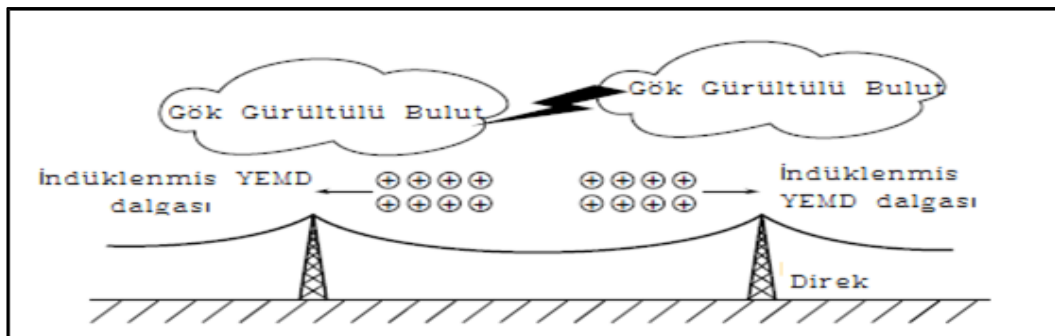
3.2.2.1. Elektrostatik indüksiyon

Şekil 3.4'te, pozitif yüklerin hat üzerinde elektrostatik indüksiyona neden olduğu, negatif yüklerin ise yüklü bulutun alt kısmında yükseldiği gösterilmektedir.



Şekil 3.4. YEMD'in oluşumunda enerji iletim hatlarındaki ilk yüklenme öncesi (Çakıl, 2017)

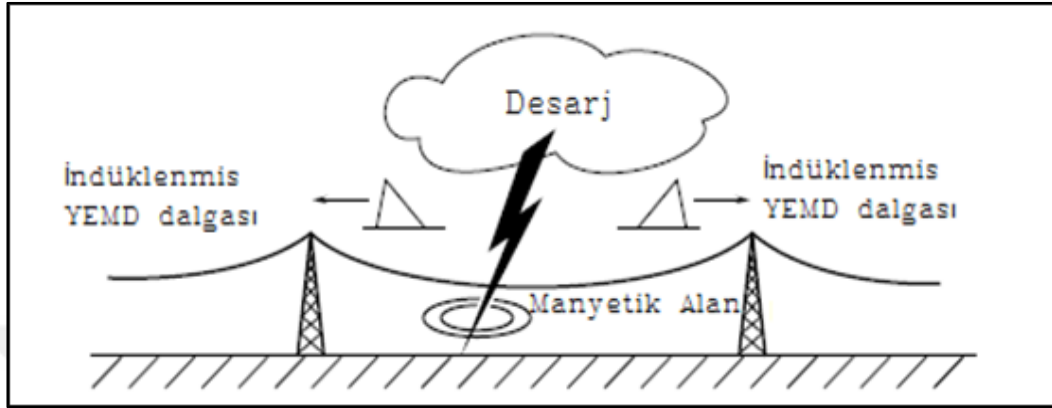
Bulut ile yer veya bulutlar arasında bir boşalma meydana geldiğinde, bulutun tabanındaki negatif yük kaybolur. Deşarjın ardından darbe, Şekil 3.5'te gösterildiği gibi hat boyunca her iki yönde hareket etmeye başlar.



Şekil 3.5. YEMD'in deşarj olayının gerçekleşmesi (T. Çakıl, 2017)

3.2.2.2. Elektromanyetik indüksiyon

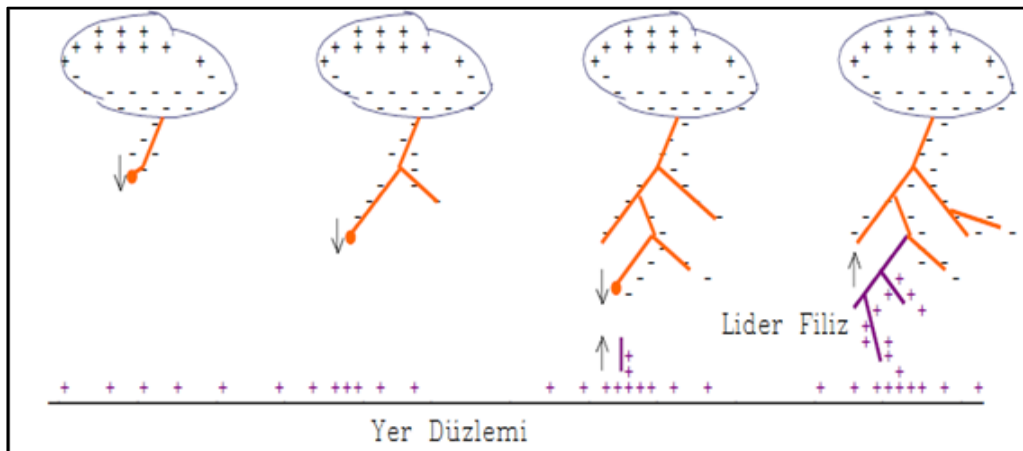
Elektromanyetik indüksiyonun dinamik süreci Şekil 3.6’da gösterilmektedir. YEMD düştüğü bölgede manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, deşarj işlemiyle ilişkili akım dalgalanması tarafından üretilir. Bu tür elektromanyetik alanlar oluştuğunda çok yüksek voltajlar üretilir. Ortaya çıkan aşırı gerilim hat boyunca yayılabilir.



Şekil 3.6. Elektromanyetik indüksiyonun oluşum sürecinin gösterimi (T. Çakıl, 2017)

3.2.3. YEMD kanalı

Negatif yüklü merkezin elektrik alanı 10 kV/cm 'ye ulaştığında yüklü buluttan yerde YEMD tomurcukları oluşur. Bu yeni filizler hızla büyüyecek (ışık hızının $1/10$ 'u). İlk filiz oluşuktan sonra ikinci filiz de birinciyle aynı yolu izler ve bu iyonizasyon kanallarını biraz daha açar. Bu işlem aynı şekilde birkaç kez devam eder ve iyonizasyon kanalı her seferinde 10 ila 100 m artar. Yatay çizginin uzunluğu Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Son lider Dünya’ya 15 ila 50 metre yaklaştığında, yer ile bulutlar arasındaki hava iyonize olur. Yer ile bulutlar arasında iletimi sağlamak için uygun elektrik alan değerleri üretilir. Öndeki dal, yükü nötralize etmek için kanaldan akan yüksek bir akım üretir. Bu akıma ters akım denir ve değeri 200 kA ’e kadar ulaşabilir. Ancak istatistiksel olarak ortalama 20 kA olarak verilmektedir. Türkiye’de bu değer yaklaşık $10\text{-}300 \text{ kA}$ arasında çok geniş bir aralıkta ölçülmektedir.



Şekil 3.7. YEMD kanalının oluşumu (IEEE St. 2004)

3.3. Doğrudan ve Dolaylı YEMD Etkileri Arasındaki Fark

Yıldırım Elektromanyetik Darbesi (YEMD), doğrudan (direkt) veya dolaylı (endirekt)deşarjlarla aşırı gerilime neden olabilir, bu da enerji nakil hatlarında elektrik kesintilerinin artmasına yol açabilir. Doğrudan darbelerde, oluşan darbeli akım bitişik hatlarda bir elektromanyetik alan yaratır ve YEMD aşırı voltaj üretir (Viscaro, 2007).

3.3.1. YEMD'in doğrudan etkisi

YEMD'in doğrudan etkisi, elektrik şebekesinin herhangi bir kısmına doğrudan düşmesi olarak tanımlanabilir. Dağıtım hatlarındaki izolasyon atlamaları, ters akım küçük olsa bile, aşırı voltajın izolasyon seviyesini aşması nedeniyle sıklıkla meydana gelir. Örneğin, YEMD'in 30 kA darbeli akım kullanarak ürettiği voltaj 6000 kV olabilir. Bu durum, hatta doğrudan bir şok verilmesi sonucu oluşan aşırı gerilimin, yalıtım malzemesinin hasar görmesine veya tahrip olmasına yol açabilir (Viscaro, 2005).

3.3.2. YEMD'in dolaylı etkisi

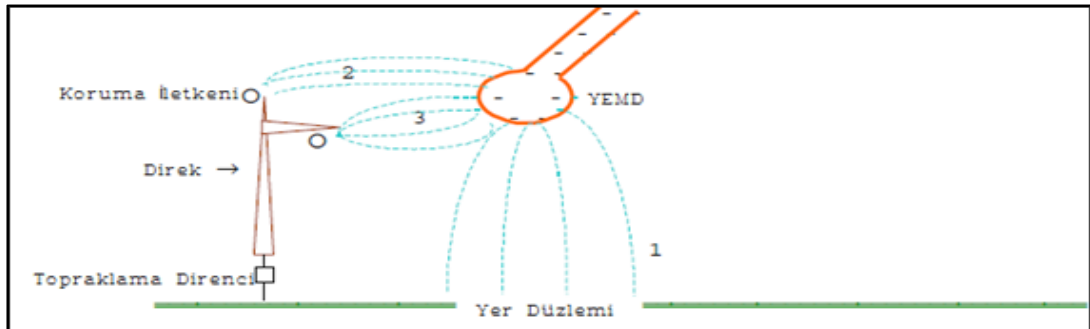
Dolaylı YEMD darbeleri, elektrik şebekesinin herhangi bir bölümünü doğrudan etkilemeyen YEMD darbeleri olarak tanımlanabilir. Bu durumda, indüklenmiş bir aşırı gerilim üretilir ve ağ boyunca yayılır. Bu tür darbeler, zayıf yalıtılmış hatları kesintiye uğratabilir. Çoğu dolaylı YEMD darbesi 300 kV'dan daha düşük dalgalanmalar oluşturur. Dolaylı darbeler, doğrudan darbelerden daha küçük indüklenen voltajlar üretir, ancak genellikle havai hatların performansını etkiler. Örneğin, orta gerilim dağıtım hatlarında kaydedilen arızaların ana nedeni dolaylı darbelerdir.

3.4. YEMD'in Neden Olduğu Sorunlar

YEMD'in kendiliğinden boşalmadan kaynaklandığı bilinmektedir. Bu,deşarj sırasında aşırı gerilimler yaratır. Bu aşırı gerilimler, enerji nakil hatlarında çeşitli problemlere yol açar ve bir sonraki alt bölümde tartışılmaktadır.

3.4.1. Enerji iletim hatlarında YEMD kaynaklı oluşan gerilimler

Enerji iletim hattında oluşan pozitif yük, yüklü bir bulutun dibinde negatif yükün varlığından kaynaklanır. YEMDdeşarjı, hat üzerindeki bu pozitif yüklerin hareketli olmasını ve hat boyunca ilerlemesini sağlar. Şekil 3.8, hatta dalgalanmalara neden olan farklı yolları göstermektedir. Aşırı gerilimler üçdeşarj yolu aracılığıyla üretilir.



Şekil 3.8. YEMD filizinin vuruş ve iletim hattının geometrisi (IEEE St. 2004)

3.4.1.1. YEMD'in eih'ye düşmesi sonucu oluşan aşırı gerilim

Şekil 3.8'de gösterilen Yol 1, okuyucunun toprağa deşarjıdır. Bu rota hızlıdır. Ancak YEMD, topraklama kablosu ile iletken arasındaki yalıtım şeridinde voltaj dalgalanmalarına neden olur. Bu gerilim, hat boyunca ilerleyen bir dalga gibi davranır.

3.4.1.2. YEMD'in koruyucu iletkeni veya direğe düşmesi sonucu

Şekil 3.8'de gösterilen Yol 2, koruyucu bir iletken veya direğe düşen bir YEMD deşarjıdır. Bu durumda izolatör arasında voltaj farkı olacaktır. Bu, direk ve iletken arasında aşırı gerilim darbesi oluşturur.

3.4.1.3. YEMD'in faz iletkenine düşmesi sonucu indüklenmiş aşırı gerilim

Aşırı gerilimler, YEMD'in faz iletkenlerine düşmesiyle indüklenir. Şekil 3.8'de gösterilen Yol 3, doğrudan faz iletkenine bağlanan bir YEMD deşarjıdır. Bu tür boşalma en tehlikeli olanıdır ve hatta çok yüksek bir aşırı gerilime neden olur. Deşarj yolu sadece direk içinden değil, aynı zamanda enerji sisteminin parafudurun da geçebilir.

3.5. YEMD Kaynaklı Aşırı Gerilimi Etkileyen Faktörler

3.5.1. Çok iletkenli yapılar

Çevredeki YEMD düşüşlerinden kaynaklanan aşırı gerilimler, çok iletkenli direkler üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu etki, hat konfigürasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterir; dikey hat konfigürasyonlarında daha belirgin olurken, yatay hat konfigürasyonlarında iletkenler arasındaki ayırma mesafesi ve anahtarlama noktasının mesafesi önem kazanmaktadır. Çok iletkenli bir hattın bir iletkenindeki aşırı gerilim, diğer iletkenlerin etkisiyle azaltılır. Bu azalma, tek bir sıra için gözlenen azalmadan daha düşük seviyelerde olabilir. Yapılan benzer çalışmalar, birden fazla iletkenin varlığının, tek bir iletkeni kıyasla her bir iletkeni indüklenen aşırı gerilimi yaklaşık %10 oranında azalttığını göstermektedir (Cooray, 2003, Rachidi vd. 1997). İletken sayısının artırılması, indüklenen aşırı gerilimleri azaltma eğilimindedir (Perez ve diğerleri, 2003). Ancak, iletken sayısı arttıkça karşılıklı ekranlama meydana gelmekte ve aşırı gerilimler oluşabilmektedir. Bu etki, YEMD etkisine dik olarak indüklenen aşırı potansiyeller için geçerli değildir (Kannu vd. 2005).

3.5.2. Topraklama kablosu ve koruma iletkeni

YEMD'den kaynaklanan aşırı gerilimler, koruyucu iletken veya topraklama kablosu kullanılarak azaltılabilir. Bu azaltma işlemi, topraklama kablosunun faz iletkenine veya topraklanmamış iletkeni göre konumuna bağlıdır. Koruyucu iletkenler, aşırı gerilimi yaklaşık %1.5 oranında azaltmaktadır. Koruyucu iletkenlerin etkinliği, esas olarak iki bitişik topraklama noktası arasındaki mesafeden etkilenir (Paolone ve diğerleri, 2004). Bu mesafe, yalıtkanın adım gerilimini etkileyen önemli bir faktördür (Uman vd. 1969, Rusck, 1958, Yokoyama, 1984).

3.5.3. Zemin (Yer) iletkenliği

İndüklenen aşırı gerilimler, hattın ortasında artış gösterirken uçlarına doğru azalma eğilimindedir. Toprağın iletkenliğinin artırılması, bu indüklenen aşırı gerilimlerin azalmasına katkıda bulunabilir (Razzak vd. 2004).

3.5.4. YEMD'in düştüğü noktanın konumu

İndüklenen aşırı voltajın büyüklüğü, YEMD'in yere düşme açısına bağlı olarak değişir. Açı arttıkça indüklenen gerilim azalır. Ayrıca, indüklenen aşırı voltajın büyüklüğü, düşme noktasından uzaklaştıkça azalır ve mesafe arttıkça darbe gecikmesi de artar (Razzak vd. 2004).

3.5.5. Enerji iletim hatlarının yüksekliği

İletim hattının yüksekliği arttıkça indüklenen aşırı gerilim de artış gösterir. Tamamen topraklanmış bir iletim hattında, indüklenen aşırı gerilimin büyüklüğü ile hat yüksekliği arasında doğrusal bir ilişki vardır (Razzak vd. 2004).

3.5.6. Enerji iletim hatlarının uzunluğu

Hat uzunluğunun 2 km'den az olması durumunda YEMD ile ENH arasındaki bağlantı göz ardı edilebilmektedir. Kayıpsız hatlar için maksimum indüklenen aşırı gerilim hat uzunluğuna bağlıdır (S. Guerrieri vd. 1997).

3.5.7. Korona etkisi

Korona nedeniyle yaşanan artış YEMD'deki düşüşün türüne (doğrudan veya dolaylı) bağlı olarak değişir. Dolaylı etki, indüklenen aşırı gerilimi artırır. Ancak direkt darbelerde korona etkisinden dolayı indüklenen aşırı gerilim azalır. Korona etkisi iletkenlerin birbirini etkilemesini engeller. (Bağlantı Etkisi) Koronaya en çok maruz kalan iletkende indüklenen aşırı voltajın büyüklüğünü artırır.

3.6. YEMD Parametreleri

3.6.1. Başlangıç zamanı

YEMD kaynaklı voltajın gücü, görev döngüsünün artmasıyla azalır (E. Perez vd. 2003). Çizginin ortasında daha büyük bir etki yaratır. Genel olarak indüklenen aşırı gerilim, açık kalma süresiyle ters orantılıdır (Silva vd. 2002, M. Jordan vd. 1983).

3.6.2. Sönümleme zamanı

Sönümleme süresinin değiştirilmesi ve açık kalma süresinin 1 μ s'nin altına düşürülmesi, indüklenen aşırı voltajın genliğini etkilemez. Ayrıca YEMD dönüş akımı üzerinde de çok az etkisi vardır.

3.6.3. Akım genliği

YEMD tarafından indüklenen aşırı gerilim, diğer parametrelerin sabit olduğu varsayılarak, tüm hat boyunca akım genliğiyle doğru orantılıdır.

3.6.4. YEMD filiz hızı

YEMD filizinin hızı, indüklenen aşırı voltajın büyüklüğünü, açık kalma süresini ve bozulma süresini etkiler. Etkiler genel olarak farklılık gösterir. Bu, YEMD düşme konumuna ve toprak iletkenliğine bağlıdır. Toprağın iletkenliği düşükse indüklenen aşırı gerilim artacaktır. YEMD basamağının hızı yalnızca dalga biçimini değil aynı zamanda indüklenen aşırı gerilim değerini de etkiler. Özellikle dalgaların ön eğiminde etkilidir. YEMD düşme noktasından uzakta indüklenen aşırı voltajın maksimum değeri, YEMD tomurcuk hızıyla orantılıdır. Darbenin azaldığı noktanın yakınında, hızın indüklenen aşırı potansiyel üzerinde hiçbir etkisi yoktur (A. Borghetti vd. 2000, Nucci vd. 1993).

3.7. YEMD'in Güç Hatlarında Oluşturduğu Aşırı Gerilimin Analitik Olarak İncelenmesi

Havai hatlarda ve enerji tesislerinde YEMD kaynaklı aşırı gerilimler sıklıkla meydana gelir. Bu aşırı gerilimler, güç sistemlerine, iletim şebekelerine ve elektronik cihazlara zarar verebilir. YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin tespiti için iki genel model kullanılmaktadır:

- YEMD tarafından üretilen elektromanyetik alan ile YEMD'in yansıma akımının kullanıldığı model: Bu modelde, geri yansıyan darbe akımı dikkate alınır. YEMD akımı, kanal boyunca yükseklik ve zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlanır.
- Elektromanyetik alanlar arasındaki etkileşimi sağlamak için uygun bir model: Bu modelde, önceki aşamada hesaplanan hat iletkenlerinin elektromanyetik alan ifadesi ile YEMD'in çarpma anında iletkeninde oluşan elektromanyetik alan ifadesi karşılaştırılarak aşırı gerilim hesaplanır.

3.7.1. Yıldırım elektromanyetik darbe akım modelleri

YEMD darbe akım modelleri dört sınıfa ayrılır: gaz dinamiği veya fiziksel modeller, elektromanyetik modeller, RLC iletim hattı modelleri ve mühendislik modelleri (M. Master vd., 1981; G. D., 1990). YEMD kaynaklı yansıyan akımların hesaplanmasında en sık kullanılan modeller mühendislik modelleridir. Önceki yüksek lisans çalışmasında bu mühendislik modelleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada ise, kullanılan mühendislik modeli olan Değişken İletim Hattı Modeli detaylı olarak açıklanmaya çalışılmıştır.

3.7.2. Değişken iletim hattı modeli

Bu modelde YEMD akımının yoğunluğu şu şekilde ifade edilir (Pierce vd. 1972):

$$i(z', t) = \begin{cases} i \left(0, t - \frac{z'}{v} \right) \cdot (1 - z'/H), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases} \quad (3.35)$$

Burada H belirtilen kanal yüksekliğidir. Bu modelin yük dağılımı aşağıdaki matematiksel denklem ile ifade edilir:

$$\rho(z', t) = \frac{1 - z' / H}{H} + \frac{i(0, t - z' / v_f)}{v_f} + \frac{1}{H} \cdot Q(t) \quad (3.36)$$

Burada $Q(t)$ t zamanda topraktan kanala toplam yükün şarj transferidir:

$$Q(t) = \int_{z'/V}^t i(0, \tau - z' / v) d\tau \quad (3.37)$$

3.7.3. YEMD kanalının akım tespiti için kullanılan modeller

Bazı ülkelerde kanal bazlı akım ölçümleri özel direkler aracılığıyla gerçekleştirilir. Ancak analitik olarak tespiti için çeşitli modeller de kullanılmaktadır. Bu modellerin analizi ile YEMD akımının oluştuğu ilk andaki durumlar incelenmiştir. Önceki yüksek lisans çalışmasında bu modeller detaylı olarak ele alınmıştır. Bu çalışmada ise, kullanılan darbe akım modeli hakkında ayrıntılı bilgi sunulmaya çalışılmıştır. Özellikle akım tespiti için Heidler Akım Modeli kullanılmıştır.

3.7.3.1. Heidler akım modeli

Heidler modeli ifadesi şu şekildedir (F. Heidler 1985):

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t / \tau_1)}{1 + (t / \tau_2)} \cdot \exp(-t / \tau_2) \cdot u(t) \quad (A) \quad (3.38)$$

$$\eta = \exp \left[-(\tau_1 / \tau_2) \cdot (n\tau_2 / \tau_1)^{1/n} \right] \quad (3.39)$$

Burada:

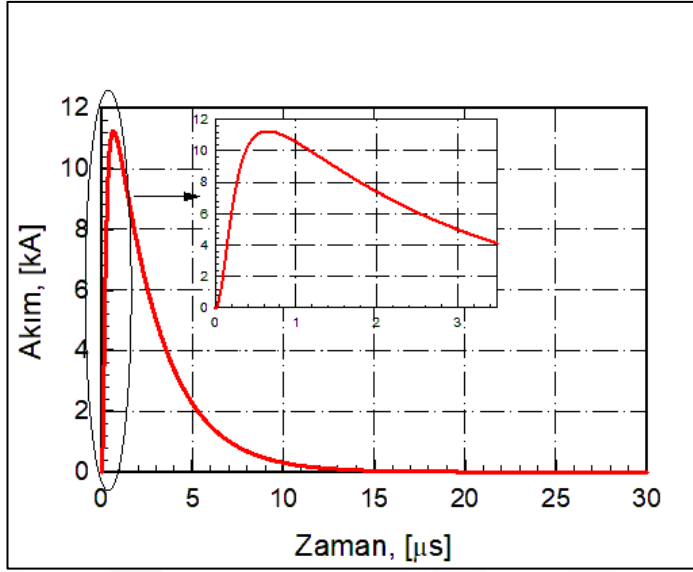
τ_1 : $(\beta \cdot (c \cdot t - x) - h)$ yükselen akımın zaman sabiti

τ_2 : $(\beta \cdot (c \cdot t - x) + h)$ yükselen akımın dalga formunun bozunma sabiti

n : belirtilen diklik faktörü (2-10 arasında)

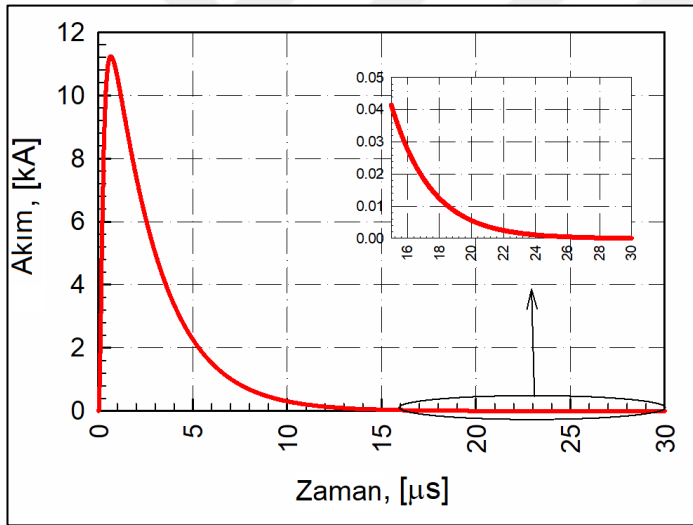
I_0 : kanal taban akımının genlik değeri

Heidler akım modeli ile elde edilen YEMD formu Şekil 3.9'de, detaylı kısmı ise Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 matematiksel olarak türetilmiştir. Heidler modelindeki I_0 , τ_1 ve τ_2 değerleri değiştirilerek alt vuruşlar modellenebilir. Yeniden ihtiyaç duyulan akım dalga biçimine yaklaşmak için belirli parametrelere sahip iki Heidler kondansatörü dahil edilebilir.



Şekil 3.9. Heidler modeline göre YEMD kanalının temelindeki akım formunun şekli

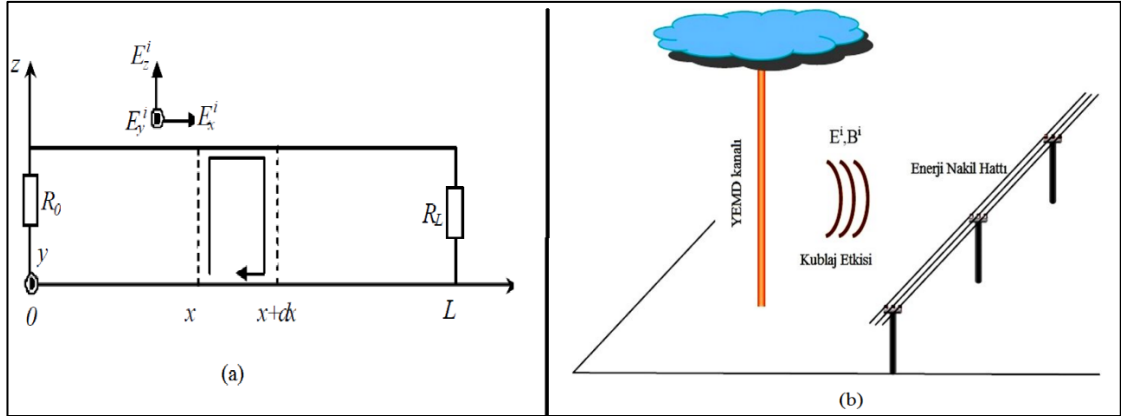
Heidler fonksiyonunun avantajı, gerçek bir YEMD çarpmasının özelliklerine yakından yaklaştığı için yeniden YEMD akımını daha gerçekçi bir şekilde modelleyebilmesidir.



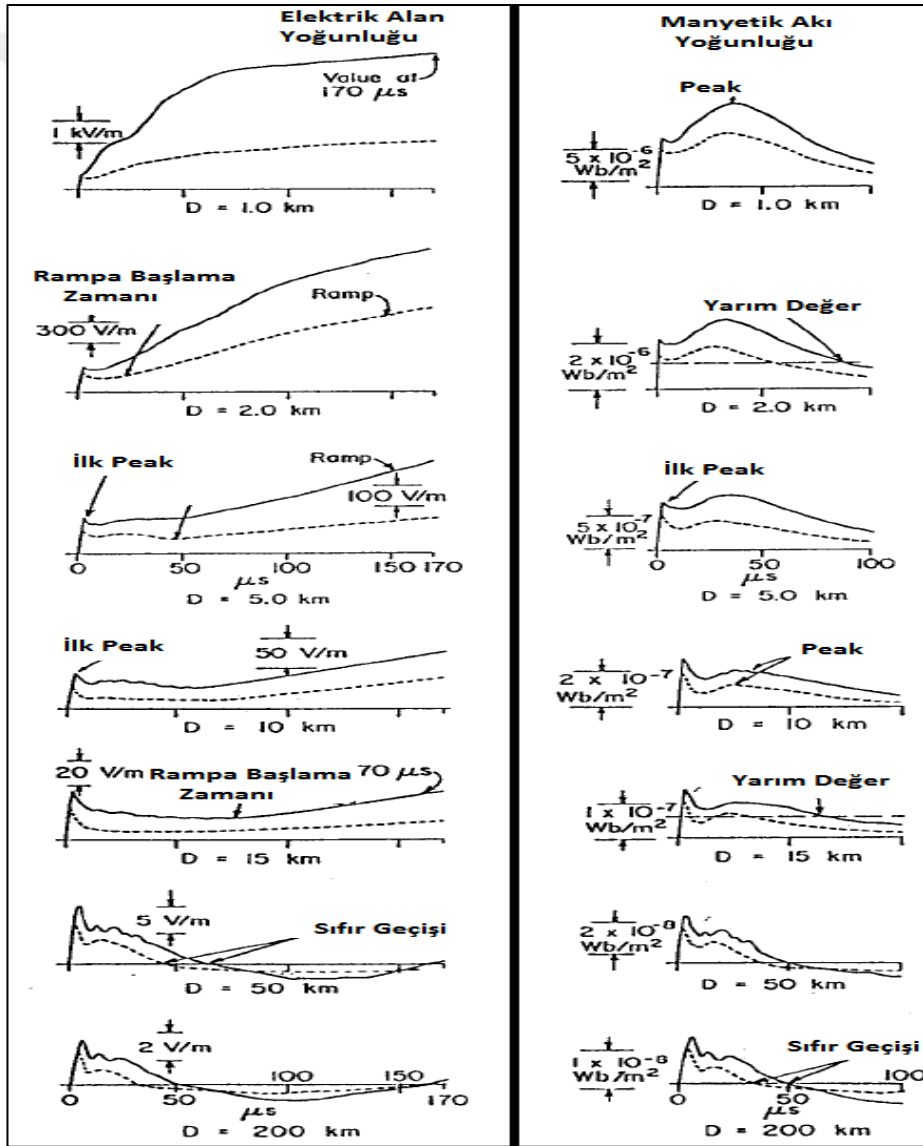
Şekil 3.10. Heidler akış modeline göre YEMD kanalının tabanında oluşan akış (detaylı model).

3.8. Kublaj Modelleri

Elektromanyetik alanlar, YEMD akımı nedeniyle oluşur ve bu alanlar elektrik şebekesine zarar verebilir (Montano vd. 2005). Darbe ile hatlar arasındaki kublaj, çeşitli modeller kullanılarak elde edilir. Bu modeller, iletkenlerin mükemmel iletken bir zeminin üzerinde bulunduğu varsayılarak, Şekil 3.11.a'da sunulan geometri dikkate alınarak kısaca açıklanacaktır. Şekil 3.11.b'de ise kublaj etkisinin ENH'yi elektrik ve manyetik alan çiftleri olarak nasıl etkilediği gösterilmektedir (Nucci, 1995). Bu çalışmada kullanılan kublaj modeli, Rusck tarafından önerilen modeldir. Şekil 3.12' de ise düşey elektrik alan ve manyetik akı yoğunluğu gösteren tespitler sunulmuştur.



Şekil 3.11. Kublaj Modeli a) Kublaj modellerinin geometrik yapısı b) YEMD'in ENH'lere olan kublaj etkisi (Çakıl, 2017)



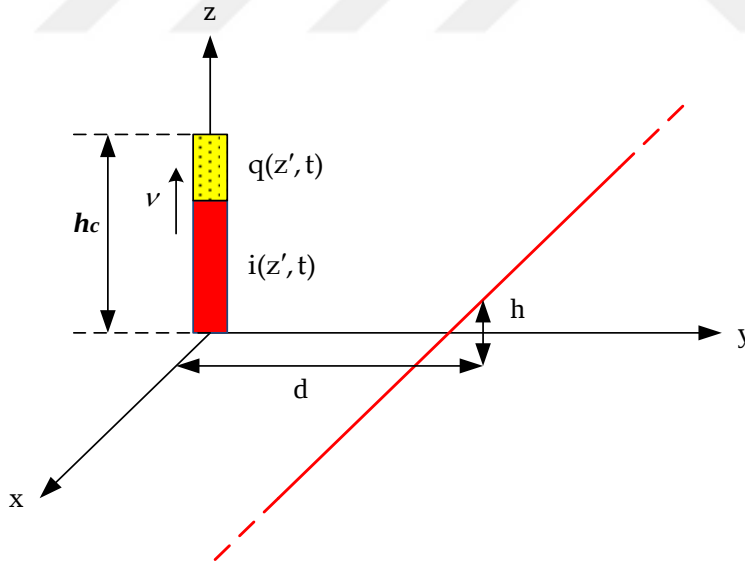
Şekil 3.12. Tipik düşey elektrik alan yoğunluğu ve yatay manyetik akı yoğunluğunu gösteren dalga biçimleri, ilk darbe (düz çizgi) ve sonraki darbe (kesikli çizgi) (Çakıl, 2017)

3.9. Kublaj Modellerine Genel Bakış

Yukarıda bahsedilen kublaj modelleri arasında öne çıkan iki model vardır. Bu modeller, güç hatlarındaki YEMD kaynaklı aşırı voltajları tahmin etmek için sıkça kullanılır. En yaygın olarak kullanılan modeller Rusck modeli ve Agrawal modelidir. Rusck modeli ve Agrawal modeli arasında yapılan karşılaştırmada, Rusck modelinin vektör potansiyelini ihmal ettiği ve yalnızca yatay elektrik alanının kaynak bağımlılığına neden olan kısmını kullandığı görülmektedir. Bu eksikliklere rağmen, Rusck modeli YEMD parametrelerinde doğru sonuçlar verebilir. Agrawal modelinde ise bu vektör bileşeni dikkate alınır. Rachidi modelinde ise manyetik alan değeri, aşırı gerilimlerin tespiti için kullanılan ana etmendir.

3.10. YEMD'in Etkisinin Hesaplanması

YEMD hesaplamaları, kanal boyunca yıldırım geri-dönüş darbe akımının belirlenmesini gerektirir ve bu işlem genellikle zaman veya frekans alanında gerçekleştirilir. Ancak, zaman alanında çözüm tercih edilebilir çünkü bu yöntem, doğrusal olmayan fenomenleri (örneğin, korona), ağ yapılandırmasındaki değişiklikleri (örneğin, devre kesicinin açılması) ve hat terminallerindeki doğrusal olmayan koruyucu cihazların (örneğin, parafudr) varlığını direkt olarak ele alabilir. YEMD hesaplamaları için iki temel yaklaşım benimsenmiştir: dipol ve monopole teknikleri. Dipol tekniği, Şekil 3.13'te gösterilen geometrik yapı ve mükemmel iletken bir düzlem üzerinde dikey bir anten olarak kabul edilen yıldırım kanalı boyunca z yüksekliğinde ve d uzunluğunda bir dipolden yayılan elektromanyetik alan ifadelerini içerir. Bu ifadeler, Maxwell denklemlerinin gecikmeli skaler ve vektör potansiyeller açısından çözülmesiyle elde edilir.



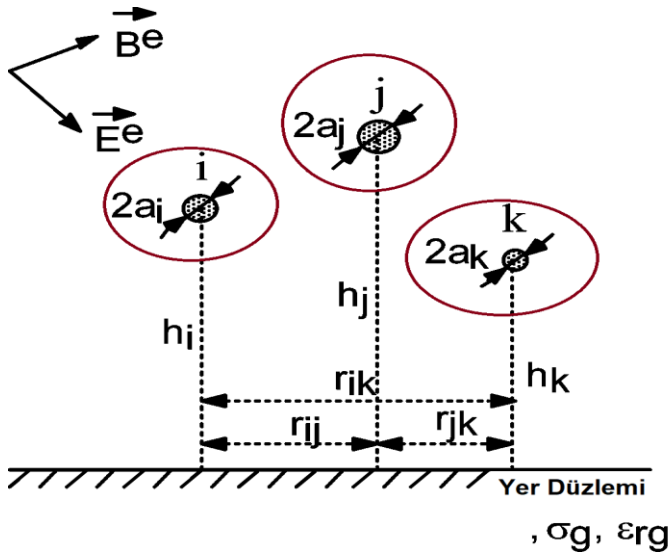
Şekil 3.13. Problemin geometrisi

Birkaç kilometreyi geçmeyen mesafeler için, mükemmel iletken zemin varsayımı genellikle elektrik alanının dikey bileşeni ve manyetik alanın yatay bileşeni hesaplamalarında makul kabul edilir. Ancak, elektrik alanının yatay bileşeni, zeminin sonlu iletkenliği nedeniyle önemli ölçüde etkilenir. Yatay alan bileşeninin yoğunluğu genellikle dikey bileşeninden çok daha küçüktür, ancak bazı kublaj modelleri bağlamında kublaj mekanizmasında önemli bir

rol oynar ve bu nedenle doğru bir şekilde hesaplanması gereklidir. Yatay alanın tam Sommerfeld integralleri kullanılarak hesaplanması, bilgisayar zamanı açısından verimsizdir; ancak son çalışmalarda bu konuda özel algoritmalar önerilmiştir. Rubinstein ve Cooray tarafından bağımsız olarak önerilen, Wait tarafından tartışılan ve Cooray tarafından geliştirilen basitleştirilmiş bir ifade bulunmaktadır. Cooray-Rubinstein formülü, yakın, orta ve uzak mesafelerde ve tipik zemin iletkenlikleri için yatay elektrik alanını tatmin edici bir şekilde yeniden üretebildiği gösterilmiştir.

3.10.1. Belirli bir alandan-iletim hattı kublaj denklemleri (Agrawal Modeli)

Kublaj problemini çözmek için, yani gerilimlerin belirlenmesi ve bir iletken üzerinde bir dış alan tarafından indüklenen akımlar sistemi, anten teorisi, genel ve genel olmayan Maxwell denklemlerine dayanan titiz bir yaklaşım ile çözümleme yapılır (F. M. Tesche, 1992). Tipik bir havai hat kurulumlarının uzunluğu diğer bileşenlerin de modellenmesi ihtiyacı ile (güç transformatörleri, parafudrlar, genel hat sonlandırmaları), YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin hesaplanması için böyle bir teori basit değildir ve uzun hesaplama süreleri gerektirir. Diğer bir olası yaklaşım ise iletim hattı teorisine dayanmaktadır. Bu yaklaşımın temel varsayımları şunlardır hattın tepkisi kuasitransvers elektromanyettir (kuasi-TEM) ve hattın enine boyutlarının çok daha fazla olduğunu minimum anlamlı dalga boyundan daha küçüktür. Çizgi, sonsuz bir dizi temel kesit ile temsil edilir, Daha önceki varsayımlar sayesinde, kuasistatik yaklaşımı geçerlidir. Her bölüm, gelen elektromanyetik alan tarafından aşamalı olarak aydınlatılır, böylece boylamsal yayılma etkileri dikkate alınır. Son olarak, YEMD hesaplamaları Maxwell denklemlerinin sayısal çözümleri kullanılarak da yapılabilir. Bu amaçla yaygın olarak kullanılan iki yöntem moment yöntemi ve FDTD tekniğidir. İletim hattı yaklaşımının kullanımına dayanan farklı ve eşdeğer bağlantı modelleri literatürde önerilmiştir ve Agrawal ve ark. bağlantı modeline atıf yapılmıştır (C. D. Taylor vd. 1965, F. Rachidi, 1993, A. K. Agrawal vd. 1980). Bu model, kublaj mekanizmasındaki zemin direncini basit bir şekilde hesaba katma avantajını sunmaktadır ve daha sonra tartışılacağı gibi deneysel sonuçlar kullanılarak kapsamlı bir şekilde test edilmiş ve doğrulanmış tek modeldir.



Şekil 3.14. Harici bir elektromanyetik alan varlığında çok iletkenli bir hattın kesit geometrisi (A. K. Agrawal vd. 1980)

Şekil 3.14'te gösterilen geometride, bağlantı x eksenı boyunca mükemmel iletken olmayan bir zemin üzerinde ve harici bir elektromanyetik uyarımın varlığında çok iletkenli bir sistemin durumunu göstermektedir.

$$\frac{d}{dx} [V_i^s(x)] + j\omega [L'_{i,j}] [I_i(x)] + [Z'_{ij}] [I_i(x)] = E_x^e(x, h_i) \quad (3.40)$$

$$\frac{d}{dx} [I_i(x)] + [G'_{i,j}] [V_i^s(x)] + j\omega [C'_{i,j}] [V_i^s(x)] = 0 \quad (3.41)$$

$V_i^s(x)$, $I_i(x)$ sırasıyla, birinci hat iletkeni boyunca frekans alanında saçılan gerilim ve akım vektörleri, $[E_x^e(x, h_i)]$ yerden h_i yüksekliğinde bulunan hat iletkenine teğet olan artan elektrik alan vektörü, $[0]$ sıfır matrisi (tüm elemanlar sıfıra eşittir), $[L'_{i,j}]$ birim uzunluk başına hat endüktans matrisidir.

$$L'_{i,j} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d^*}{d}\right) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \ln\left(\frac{r_{ij}^2 + (h_i + h_j)^2}{r_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2}\right) \quad (3.42)$$

i ve j iletkenleri arasındaki mesafenin $r_{i,j}$ olduğunu varsayarsak yarıçaplarından çok daha büyük olduğu için, genel ifade iki iletken arasındaki karşılıklı endüktans şu şekilde verilir (F. M. Tesche vd. 1997).

i iletkeni için öz endüktans şu şekilde verilir;

$$L'_{i,i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{2h_{ii}}{r_{ii}}\right) \quad (3.43)$$

$[C_{i,j}]$ birim uzunluk başına hat kapasitans matrisidir. Denklem 3.44, kullanılarak doğrudan endüktans matrisinden değerlendirilir (F. M. Tesche vd. 1997).

$$[C'_{i,j}] = \epsilon_0 \mu_0 [L_{i,j}]^{-1} \quad (3.44)$$

$[G_{i,j}]$ birim uzunluk başına enine iletkenlik matrisidir. Enine iletkenlik matrisi elemanları, aşağıdaki bağıntılar kullanılarak ya kapasitans matrisinden ya da endüktans matrisinden başlayarak değerlendirilebilir.

$$G'_{i,j} = \frac{\sigma_{hava}}{\epsilon_0} \cdot [C'_{i,j}] = \sigma_{hava} \mu_0 \cdot [L'_{i,j}]^{-1} \quad (3.45)$$

Bununla birlikte, çoğu pratik durum için, enine iletkenlik G_{ij} matris elemanları $j\omega C$ ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir. G'_{ij} bu nedenle hesaplamada ihmal edilebilir. Son olarak, $Z'_{g,i,j}$ zemin empedans matrisidir. Sunde tarafından türetilen iki i ve j iletkeni arasındaki karşılıklı toprak empedansı için genel ifade Denklem (3.46)'da verilmiştir (E. D. Sunde, 1968).

$$Z'_{g_{i,j}} = \frac{jw\mu_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{e^{-(h_i+h_j)x}}{\sqrt{x^2 + \gamma^2 + x}} \cdot \cos(r_{i,j}x) dx \quad (3.46)$$

Tek telli hat durumunda olduğu gibi benzer bir şekilde, doğru bir logaritmik yaklaşımı Rachidi ve diğerleri tarafından önerilmiştir ve Denklem (3.47)'de verilmiştir (F. Rachidi vd. 1999).

$$Z'_{g_{i,j}} \cong \frac{jw\mu_0}{4\pi} \cdot \ln \left[\frac{1 + \gamma_g \left(\frac{h_i + h_j}{2} \right)^2 + \left(\gamma_g \cdot \frac{r_{i,j}}{2} \right)^2}{\gamma_g \left(\frac{h_i + h_j}{2} \right)^2 + \left(\gamma_g \cdot \frac{r_{i,j}}{2} \right)^2} \right] \quad (3.47)$$

Denklem (3.40) ve (3.41)'te, tele karşılık gelen tel empedansı ve toprak admitansı ihmal edilmiştir. Gerçekten de tipik havai hatlar ve ilgilenilen tipik frekans aralığı (10 MHz'in altında) için bu parametrelerin göz ardı edilmesi makul bir yaklaşımdır (F. Rachidi vd. 1996, F. Rachidi vd. 1996). İki hat sonlandırması için sınır koşulları için doğrusal empedanslar Denklem (3.48) ve (3.49)'da verilmiştir.

$$[V_i^s(0)] = -[Z_A] \cdot [I_i(0)] + \left[\int_0^{h_i} E_z^e(0, z) dz \right] \quad (3.48)$$

$$[V_i^s(L)] = -[Z_B] \cdot [I_i(L)] + \left[\int_0^{h_i} E_z^e(L, z) dz \right] \quad (3.49)$$

Kublaj denklemlerinin zaman alanında gösterimi bazen tercih edilebilir. Bununla birlikte, zemin gibi frekansa bağlı parametreler empedans, önemli hesaplama süresi ve bellek depolama gerektiren konvolüsyon integralleri kullanılarak temsil edilmelidir. Agrawal ve diğerlerinin modelinin kayıplı bir zemin üzerindeki çok iletkenli bir havai hat için zaman alanında ifade edilen iki iletim hattı kuplaj denklemi, Denklem (3.50) ve (3.51)'de gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x} [v_i^s(x, t)] + [L'_{i,j}] \cdot \frac{d}{dt} [i_i(x, t)] + [\xi'_{g_{i,j}}] \otimes \frac{\partial}{\partial t} [i_i(x, t)] = [E_x^e(x, h_i, t)] \quad (3.50)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [i_i(x, t)] + [L'_{i,j}] \cdot \frac{d}{dt} [v_i^s(x, t)] = 0 \quad (3.51)$$

Burada, $\otimes$ konvolüsyon çarpımını ve $[\xi'_{g_{i,j}}]$ matrisi, toprak empedans matrisinin $[Z'_{g_{i,j}}]$ ters Fourier dönüşümü ile verilir.

$$[\xi'_{g_{i,j}}] = F^{-1} \left\{ \frac{Z'_{g_{i,j}}}{jw} \right\} \quad (3.52)$$

Frekans alanındaki zemin empedansı matris terimleri için genel ifade analitik bir ters Fourier dönüşümüne sahip değildir. Bu nedenle, zaman alanındaki geçici zemin direnci matrisinin

elemanları genel olarak sayısal bir ters Fourier dönüşümü algoritması kullanılarak belirlenmelidir. Bununla birlikte Denklem (3.53) ve (3.54) ifadelerinin ters hızlı Fourier dönüşümü (FFT) kullanılarak elde edilen sayısal değerlere makul yaklaşımlar olduğu gösterilmiştir (F. Rachidi vd. 2003).

$$\xi'_{g,i,i} = \min \left\{ \frac{1}{2\pi h_i} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{rg}}}, \frac{\mu_0}{\pi \tau_{g,i,i}} \left[\frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\tau_{g,ii}}{t}} + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{\tau_{g,ii}}{t}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{\tau_{g,ii}}{t}}\right) - \frac{1}{4} \right] \right\} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} \xi'_{g,i,j} = \min & \left\{ \frac{1}{2\pi h_i} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{rg}}}, \frac{\mu_0}{\pi T_{i,j}} \left[\frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{T_{i,j}}{t}} \cos\left(\frac{\theta_{ij}}{2}\right) + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{T_{i,j} \cos(\theta_{i,j})}{t}\right) \right. \right. \\ & \cdot \cos\left(\frac{T_{i,j}}{t} \sin(\theta_{i,j}) - \theta_{i,j}\right) - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \\ & \cdot \left. \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_n \left(\frac{T_{i,j}}{t}\right)^{2n+\frac{1}{2}} \times \cos\left(\frac{2n+1}{2} \theta_{ij}\right) - \frac{\cos(\theta_{i,j})}{4} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Burada, $T_{i,j}$ ve $\theta_{i,j}$, Denklem (3.55) ve (3.56)'da gösterilmiştir.

$$\tau_{g,ii} = h_i^2 \mu_0 \sigma_g \quad (3.55)$$

$$\tau_{g,i,j} = h_{i,j}^2 \mu_0 \sigma_g = \left(\frac{h_i + h_j}{2} + j \frac{r_{i,j}}{2} \right)^2 \cdot (\mu_0 \sigma_g) = T_{i,j} e^{j\theta_{i,j}} \quad (3.56)$$

Denklem (3.53)'te 'erfc' tamamlayıcı hata fonksiyonudur. Benzer ifadeler Araneo ve Cellozi tarafından da önerilmiştir (R. Araneo ve S. Cellozi, 2001). Yaklaşık analitik ifadelerin geçerliliği hakkında daha fazla bilgi bulunabilir (N. Theethayi ve R. Thottappillil, 2008).

3.10.2. Belirli bir alandan iletim hattına kuplaj durumun FDTD çözümü

Havai iletim hatları üzerindeki YEMD kaynaklı gerilim çalışmaları genellikle zaman alanı analiziyle yapılmaktadır. Bu yöntem, yalıtım koordinasyon sorunlarına görece basit bir çözüm sunması ve koruyucu cihazlar gibi doğrusal olmayan durumları ele alabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Bu tür bağlama denklemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntem FDTD tekniğidir. Agrawal ve diğerleri tarafından bu yöntem, kısmi zaman ve uzay türevleri kullanılarak birinci dereceden FDTD düzeni ile uygulanmıştır. Ancak, Lax-Wendroff algoritmasına dayalı ikinci dereceden bir FDTD düzeni önerilmiştir. İkinci dereceden FDTD düzeni, özellikle doğrusal olmayan karmaşık sistemlerin analizinde daha iyi kararlılık gösterir ve birinci dereceden düzene göre daha doğru sonuçlar verir. İkinci dereceden ayrıştırılmıştır edilmiş çözümler, hat akımı ve saçılan gerilim için aşağıdaki gibidir:

- Hat Akımı, ikinci dereceden FDTD düzeni, zaman ve uzay türevlerini kullanarak hat üzerindeki akımı hesaplar. Bu yöntem, doğrusal olmayan etkileri ve hattın karmaşık yapısını dikkate alarak daha doğru sonuçlar sağlar. (Denklem 3.58)

- Saçılan Gerilim, aynı düzen, saçılan gerilimi de hesaplamak için kullanılır. YEMD kaynaklı gerilimlerin hat üzerinde nasıl dağıldığını ve iletilen elektrik sinyallerindeki etkilerini belirlemek için bu yöntem kullanılır. (Denklem 3.57)

Bu çözümler, YEMD kaynaklı etkilerin analizinde kullanıldığında, hattın elektriksel performansının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar.

$$\begin{aligned}
 [v_i]_k^{n+1} = & [v_i]_k^n - \Delta t [C'_{ij}]^{-1} \left(\frac{[i_i]_{k+1}^n - [i_i]_{k-1}^n}{2\Delta x} \right) - \frac{\Delta t^2}{2} [[L'_{ij}][C'_{ij}]]^{-1} \\
 & \times \left(\frac{[Eh_i]_{k+1}^n - [Eh_i]_{k-1}^n}{2\Delta x} - \frac{[v_i]_{k+1}^n - [v_i]_{k-1}^n - 2[v_i]_k^n}{2\Delta x^2} \right) \\
 & + \frac{\Delta t^2}{2} [[L'_{ij}][C'_{ij}]]^{-1} \left(\frac{[v'_{gi}]_{k+1}^n - [v'_{gi}]_{k-1}^n}{2\Delta x} \right)
 \end{aligned} \tag{3.57}$$

$$\begin{aligned}
 [i_i]_k^{n+1} = & [i_i]_k^n - \Delta t [L'_{ij}]^{-1} \left(\frac{[v_i]_{k+1}^n - [v_i]_{k-1}^n}{2\Delta x} - [Eh_i]_k^n + [v'_{gi}]_k^n \right) \\
 & + \frac{\Delta t^2}{2} [[L'_{ij}][C'_{ij}]]^{-1} \left(\frac{[i_i]_{k+1}^n + [i_i]_{k-1}^n - 2[i_i]_k^n}{2\Delta x^2} \right) \\
 & + \frac{\Delta t^2}{2} [[L'_{ij}][C'_{ij}]]^{-1} \left([C'_{ij}] \frac{[Eh_i]_k^{n+1} - [Eh_i]_k^{n-1}}{2\Delta t} \right) \\
 & - \frac{\Delta t^2}{2} [[L'_{ij}][C'_{ij}]]^{-1} \left([C'_{ij}] \frac{[v'_{gi}]_k^n - [v'_{gi}]_k^{n-1}}{\Delta t} \right)
 \end{aligned} \tag{3.58}$$

Bahsi geçen gibi, dağıtım ağlarının topolojik karmaşıklığı ve koruma cihazlarının varlığı, YEMD-iletim hattı kavramlarının genişletilmesini gerektirir. Bu kavramlar özellikle dirençli sonlandırmalara sahip çok iletkenli hatlar için geçerlidir. Bu modeller, özel sonlandırma türlerini, hattaki kesinti noktalarını (örneğin, yıldırım koruyucu cihazlar arasındaki izolatörler) ve karmaşık sistem topolojilerini dikkate alacak şekilde özelleştirilebilir. Bu süreç, iletim hattı bağlama denklemleri için sınır koşullarının duruma göre yeniden yazılmasını gerektirir, ki bu konuda Nucci ve diğerleri tarafından detaylı olarak tartışılmıştır (A. Borghetti vd. 2004). Önerilen yaklaşımlar arasında, güç bileşenleri kütüphanesinden faydalanarak bu modelin elektromanyetik geçici program (EMTP) ile bağlantılandırılması daha uygun bulunmuştur, çünkü bu, sistemin tam tepkilerini ve sınır koşullarını çözebilir. Nucci ve ekibinin (C. A. Nucci vd. 1994), Paolone'nin (M. Paolone vd. 2001), Borghetti ve arkadaşlarının (A. Borghetti vd. 2004) çalışmalarında açıklandığı ve Napolitano ve diğerlerinin (F. Napolitano vd. 2008) son zamanlarda geliştirdiği yaklaşıma dayanmaktadır. Bu yaklaşıma göre, YEMD'e duyarlı ağlar, şönt admintanslar aracılığıyla birbirine bağlı hat grupları olarak modellenir. YEMD-iletim hattı bağlantı modeli, ağdaki farklı hatların

tepkilerini hesaplayarak sistemin genel dinamiklerini analiz ederken EMTP ise sınır koşullarını çözmekte kullanılır.

3.10.3. Dolaylı düşen YEMD kaynaklı aşırı gerilim hesaplamaları

Havai tipteki enerji nakil hatlarındaki YEMD kaynaklı aşırı voltajların analizinde genellikle zaman-etki analizi kullanılmaktadır. Bu analiz yöntemlerinden biri olan sonlu farklar yöntemi (FDTD), iletim hattı eşleşme denklemlerini çözmek için yaygın olarak tercih edilmektedir. Agrawal modelinde de bu yöntem kullanılmıştır. FDTD tekniği, kublaj denklemlerinin sayısal çözümlerini içerir ve bu yöntem, zaman alanında elektrik ve manyetik alanların dağılımlarını belirlemek için kullanılır (F. Rachidi ve diğerleri, 1996).

Bu sayısal teknikler, YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin etkilerini anlamak ve enerji nakil hatlarının korunmasını sağlamak için önemli araçlardır. Kublaj etkisinin doğru bir şekilde modellenmesi, hatların ve koruyucu cihazların tasarımında güvenilir sonuçlar elde etmek için kritik öneme sahiptir.

$$\begin{aligned}\frac{\partial V(x)}{\partial x} + Z' I(x) &= j\omega \int_0^h B_y^i(x, z) dz \\ \frac{\partial I(x)}{\partial x} + Y' V(x) &= -Y' \int_0^h E_x^i(x, z) dz\end{aligned}\quad (3.59)$$

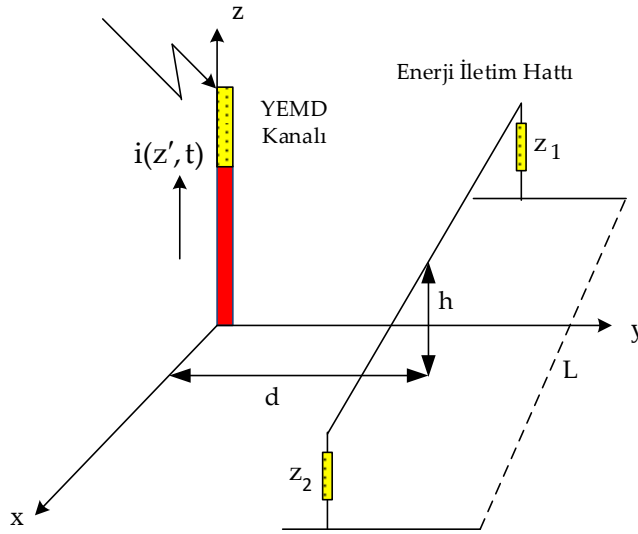
Burada sırasıyla, hat boyunca voltaj ve akım parametreleri olan $V(x)$ ve $I(x)$, sırasıyla verilen Z' ve Y' hat iletkenleri tarafından dağıtılan seri empedans ve şönt değerleridir.

$$\begin{aligned}\frac{\partial V^s(x)}{\partial x} + Z' I(x) &= E_x^i(x, h) \\ \frac{\partial I(x)}{\partial x} + Y' V^s(x) &= 0\end{aligned}\quad (3.60)$$

Burada $E_x^i(x, h)$, elektrik alanının yatay bileşeni, Z' ve Y' sırasıyla hat boyunca uzunlamasına ve enine birim başına uzunluk empedansı olarak ifade edilmiştir. $V^s(x)$, saçılan voltajı ifade etmektedir.

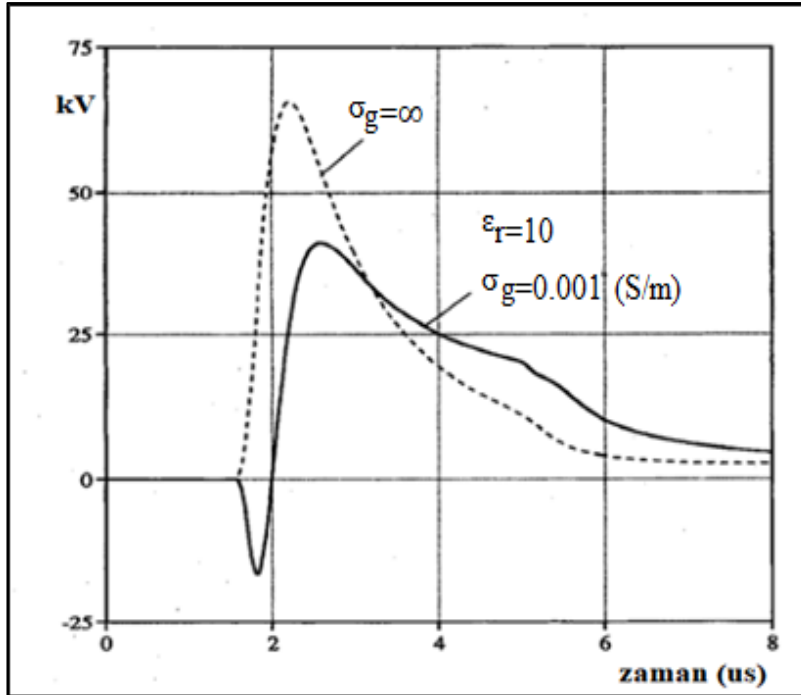
$$\begin{aligned}\frac{\partial V(x)}{\partial x} + Z' I^s(x) &= 0 \\ \frac{\partial I^s(x)}{\partial x} + Y' V(x) &= -\frac{1}{Z'} \int_0^h \frac{\partial B_x^i(x, z)}{\partial y} dz\end{aligned}\quad (3.61)$$

Burada $B_x^i(x, z)$ manyetik alanın iletken boyunca yatay bileşeni, $I^s(x)$, dağılan (saçılan) voltajı ifade etmektedir. Frekans domaininde sunulan iletim hattı kublaj denklemleri (3.59), (3.60) ve (3.61), zaman domainine dönüştürülebilir. İletken ve yer empedansları gibi frekansa bağlı parametreler, konvolüsyon integrali kullanılarak gösterilebilir. (Uman vd. 1975).



Şekil 3.15. Örnek bir ETL üzerinde bir YEMD'in dolaylı düşüşü (d: darbenin hattın uzaklığı, h: iletim hattının yüksekliği, $Z_{1,2}$: iletim hattı kutbunun karakteristik empedansı).

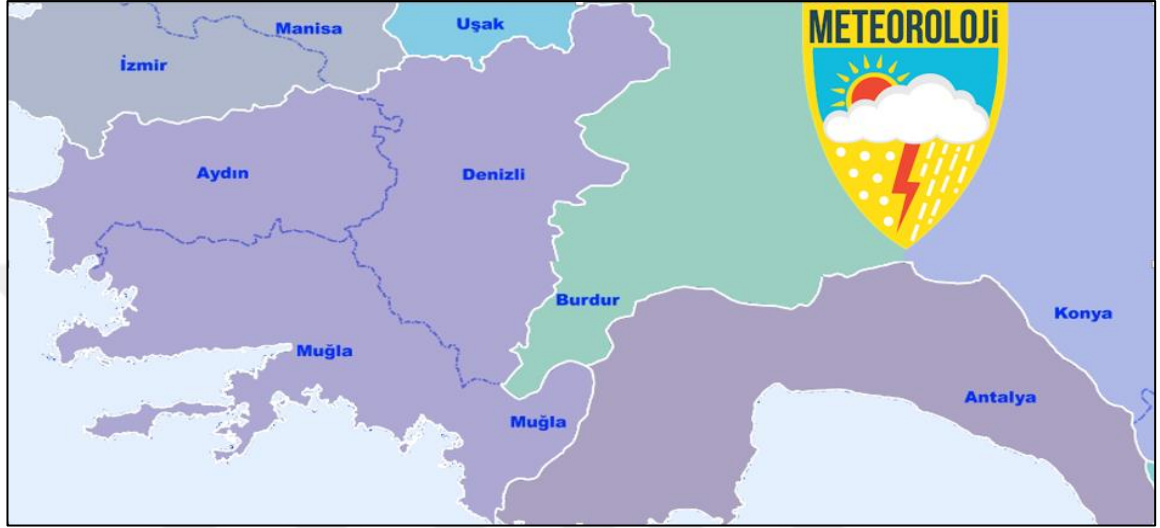
FDTD çözümünde kullanılan geometrik yapı, kayıplı bir zemin üzerinde kayıpsız bir faz iletkeninden oluşmaktadır. F. Rachidi çalışmasında, iletkenin uzunluğu 1 km, yüksekliği ise 10 m olarak belirlemiştir. YEMD'in düşme noktası hattın 50 m uzaklıktadır. İki hat ucu arasındaki mesafe eşittir. Hattın indüklenen voltaj Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Şekil 3.15'te hatta indüklenmiş voltaj hem sonlu hem de sonsuz toprak iletkenleri için çizilmiştir. Gösterildiği gibi, yer iletkenliği hem büyüklük hem de polarite açısından indüklenen voltajları etkiler (F. Rachidi vd. 1996).



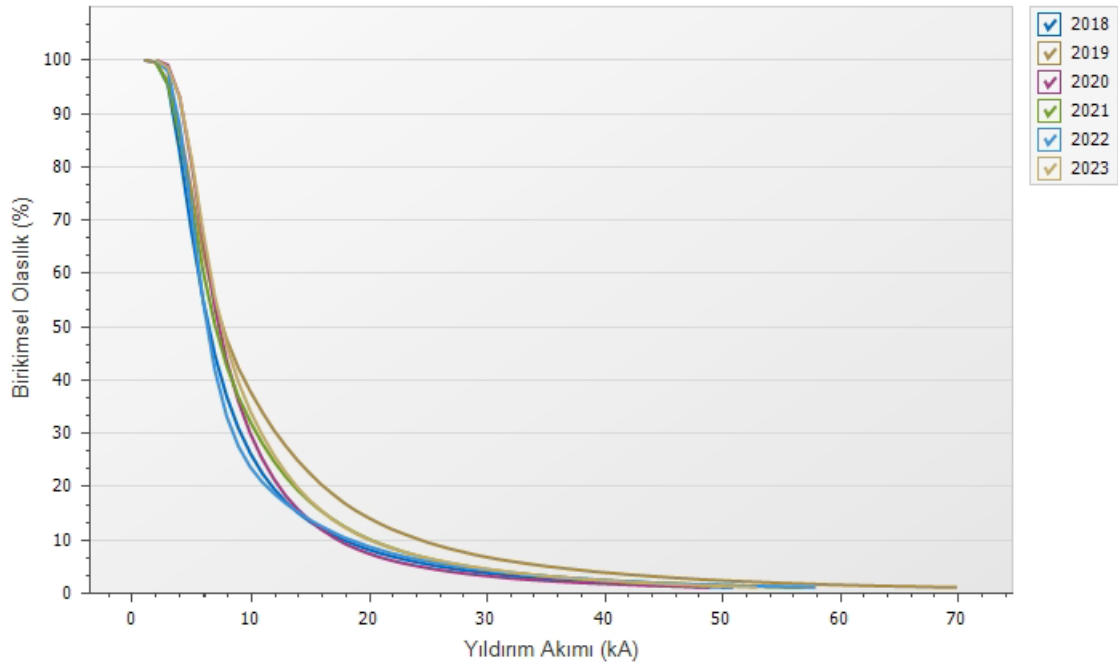
Şekil 3.16. 1 km uzunluğunda ve 10 m yüksekliğindeki bir havai hat üzerinde dolaylı olarak düşen YEMD kaynaklı aşırı gerilimler

3.11. YEMD Verilerinin Birikimli Olasılık Analizi ve İstatistikleri

Bu çalışmada MGM ile TEİAŞ'ın 2018 – 2023 yılları arasındaki YEMD verilerinden (şimşek verileri dahil edilmemiştir) yararlanılmıştır. Çalışmada Türkiye’de en fazla YEMD düşmelerine maruz kalan iki bölgenin istatistiki verileri materyal olarak incelenmiştir (Şekil 3.17). Bu başlık altında YEMD verileri kullanılarak düşen YEMD’lerin akım genlikleri incelenmiştir. Etki süreleri tespit edilmediğinden eşit alınmıştır.



Şekil 3.17. Çalışmaya dahil edilen bölgenin harita gösterimi



Şekil 3.18. Yıllara göre YEMD akımı genliği birikimsel dağılımı (Denizli-Muğla-İzmir Bölgesi)

Şekil 3.18’de her yıl için ayrı olarak hesaplanmış birikimsel YEMD akımı istatistiğinin yüzdesel ifadesi karşılığındaki akım değerlerini göstermektedir. Akım değeri ve daha üstü değerlerin olma olasılığını ifade eder.

Çizelge 3.1. Yüzdesel ifadesi karşılığındaki YEMD akım değerleri (bu akım değeri ve daha üstü değerlerin olma olasılığını ifade eder. Denizli-Muğla-İzmir Bölgesi) (TEİAŞ, 2024)

Yıl	%1	%5	%10	%20	%30	%40	%50	%60	%70	%80	%99
2018(kA)	52	26	18	12	9	8	6	6	5	4	2
2019(kA)	70	35	24	16	12	9	8	6	5	5	2
2020(kA)	50	24	17	12	10	8	7	7	6	5	3
2021(kA)	57	28	20	14	11	8	7	6	5	4	2
2022(kA)	59	27	18	11	9	7	6	6	5	4	2
2023(kA)	54	29	20	14	11	9	8	7	6	5	3
Ort. (kA) Değeri	57	28.1	19.5	13.2	10.3	8.2	7	6.3	5.3	4.5	2.3

Çizelge 3.1’de bölgeye düşen YEMD akımlarının hangi değerlerde daha çok düştüğü ve bu değerlerin üzerinde düşen YEMD akımlarını sayısal olarak göstermektedir.

Çizelge 3.2. Yıl boyunca düşen YEMD sayısı (Denizli-Muğla-İzmir Bölgesi) (TEİAŞ, 2024)

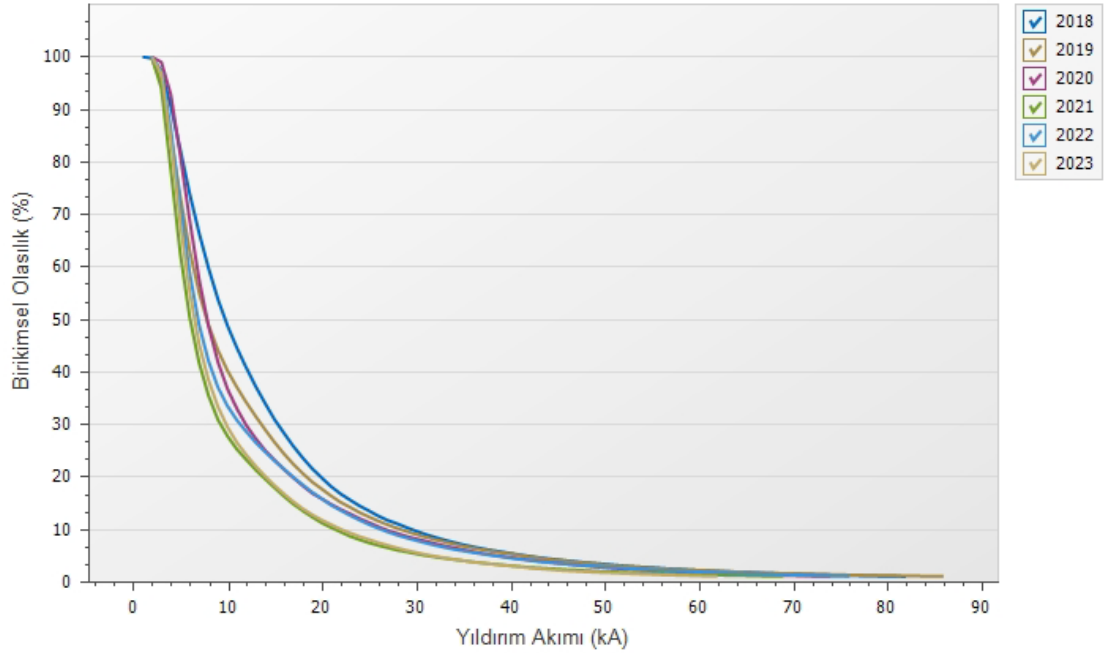
Yıl	%1	%5	%30	%40	%50	%70	%99
2018	2646 ₍₅₂₎	13757 ₍₂₆₎	94044 ₍₉₎	113840 ₍₈₎	173639 ₍₆₎	211642 ₍₅₎	255266 ₍₂₎
2019	1201 ₍₇₀₎	6086 ₍₃₅₎	38856 ₍₁₂₎	54239 ₍₉₎	62363 ₍₈₎	99737 ₍₅₎	114254 ₍₂₎
2020	875 ₍₅₀₎	4711 ₍₂₄₎	30574 ₍₁₀₎	45579 ₍₈₎	56784 ₍₇₎	79254 ₍₆₎	85094 ₍₃₎
2021	1169 ₍₅₇₎	6146 ₍₂₈₎	35635 ₍₁₁₎	55805 ₍₈₎	66984 ₍₇₎	106055 ₍₅₎	110990 ₍₂₎
2022	979 ₍₅₉₎	5185 ₍₂₇₎	31238 ₍₉₎	51620 ₍₇₎	67367 ₍₆₎	92523 ₍₅₎	94421 ₍₂₎
2023	1872 ₍₅₄₎	9179 ₍₂₉₎	60314 ₍₁₁₎	82066 ₍₉₎	98066 ₍₈₎	164371 ₍₆₎	176633 ₍₃₎
Ort. Değer	1457	7510.6	48443.5	67191.5	87533.8	125597	139443

Çizelge 3.2’de bölgeye yıl boyunca düşen YEMD’in yüzdesel dilimine karşılık gelen sayıyı göstermektedir.

Çizelge 3.3. Yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerleri (Denizli-Muğla-İzmir Bölgesi)

Yıl	Minimum (kA)	Maksimum (kA)
2018	1	286
2019	1	309
2020	3	315
2021	2	316
2022	2	318
2023	2	298
Ort. Değer	1.83	307

Çizelge 3.3’te bölgeye yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerlerini göstermektedir.



Şekil 3.19. Yıllara göre YEMD akımı genliği birikimsel dağılımı (Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Şekil 3.19’da her yıl için ayrı olarak hesaplanmış birikimsel YEMD akımı istatistiğinin yüzdesel ifadesi karşılığındaki akım değerlerini göstermektedir. Akım değeri ve daha üstü değerlerin olma olasılığını ifade eder.

Çizelge 3.4. Yüzdesel ifadesi karşılığındaki YEMD akım değerleri (bu akım değeri ve daha üstü değerlerin olma olasılığını ifade eder. Burdur-Antalya-Konya Bölgesi) (TEİAŞ, 2024)

Yıl	%1	%5	%10	%20	%30	%40	%50	%60	%70	%80	%99
2018(kA)	82	42	29	20	15	12	10	8	7	5	2
2019(kA)	87	41	28	18	14	10	8	6	5	4	2
2020(kA)	74	39	27	17	12	9	8	7	6	5	3
2021(kA)	69	31	21	14	9	7	6	5	5	4	2
2022(kA)	77	38	26	17	11	8	7	6	5	4	2
2023(kA)	62	32	22	14	10	8	7	6	5	4	2
Ort. (kA) Değeri	75.2	37.2	25.5	16.6	11.8	9	7.6	6.3	5.5	4.3	2.2

Çizelge 3.4’te bölgeye düşen YEMD akımlarının hangi değerlerde daha çok düştüğü ve bu değerlerin üzerinde düşen YEMD akımlarını sayısal olarak göstermektedir.

Çizelge 3.5. Yıl boyunca düşen YEMD sayısı (Burdur-Antalya-Konya Bölgesi) (TEİAŞ, 2024)

Yıl	%1	%5	%30	%40	%50	%70	%99
2018	418 ₍₈₂₎	2092 ₍₄₂₎	13837 ₍₁₅₎	18151 ₍₁₂₎	21903 ₍₁₀₎	30093 ₍₇₎	40705 ₍₂₎
2019	466 ₍₈₇₎	2433 ₍₄₁₎	14359 ₍₁₄₎	20085 ₍₁₀₎	25070 ₍₈₎	38625 ₍₅₎	45552 ₍₂₎
2020	254 ₍₇₄₎	1233 ₍₃₉₎	7940 ₍₁₂₎	11716 ₍₉₎	13858 ₍₈₎	19567 ₍₆₎	24059 ₍₃₎
2021	504 ₍₆₉₎	2583 ₍₃₁₎	17170 ₍₉₎	24425 ₍₇₎	30337 ₍₆₎	38020 ₍₅₎	48459 ₍₂₎
2022	596 ₍₇₇₎	3058 ₍₃₈₎	19370 ₍₁₁₎	28267 ₍₈₎	33996 ₍₇₎	49848 ₍₅₎	57786 ₍₂₎
2023	771 ₍₆₂₎	3818 ₍₃₂₎	24459 ₍₁₀₎	33243 ₍₈₎	40543 ₍₇₎	61684 ₍₅₎	73383 ₍₂₎

Ort. Değer	501.5	7510.6	2536.1	22647.8	27617.8	39639.5	48324
-------------------	--------------	---------------	---------------	----------------	----------------	----------------	--------------

Çizelge 3.5’te bölgeye yıl boyunca düşen YEMD’in yüzdesel dilimine karşılık gelen sayıyı göstermektedir.

Çizelge 3.6. Yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerleri (Burdur-Antalya-Konya Bölgesi)

Yıl	Minimum (kA)	Maksimum (kA)
2018	1	290
2019	2	280
2020	2	266
2021	2	267
2022	2	279
2023	2	336
Ort. Değer	1.83	286.3

Çizelge 3.6’da bölgeye yıllara bağlı düşen YEMD akımının maksimum ve minimum değerlerini göstermektedir.

3.12. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları

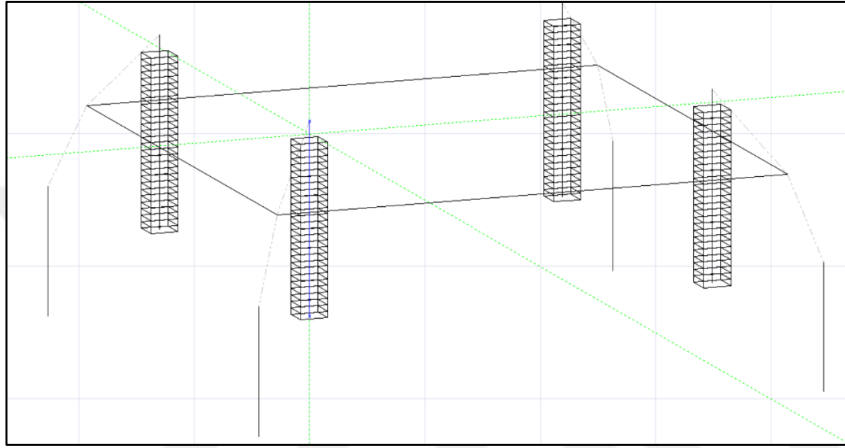
Topraklama değerleri yüksek olan direklere isabet eden YEMD akımları, direk üzerinde daha yüksek gerilimlerin oluşmasına neden olur. Bu gerilimler, “İzolatör Atlama Dayanım Gerilimini aştığında, YEMD faz iletkenine atlayarak hattın açmasına sebep olur. Bu durum, Back Flashover (Geri Atlama) olarak adlandırılır. Bu nedenle, faz-toprak mesafesini artırarak izolatör atlama gerilimini yükseltebilir veya topraklama değerlerini düşürerek direkte oluşan gerilimi azaltabiliriz. Bazı durumlarda ise her iki yöntemin birlikte uygulanması açma sayılarında 2.5 kat fark yaratabilmektedir. YEMD akımının faz iletkenine düştüğü durumlarda ise yalnızca faz-toprak mesafesi önem taşır.

Topraklama iyileştirmesi denildiğinde, kazık ekleyerek 10 ohm (bu değer YEMD etkisini standart bir değer)’nin altına düşme beklentisi olmamalıdır. Her iyileştirme yapılacak direk için dört ayağa da kazık çakılması önerilse de mevcut direğin ayakları genellikle göz ardı edilmektedir. Topraklamanın ana elemanı direğin kendisidir. Bu nedenle, topraklama iyileştirmesi yapılırken dikey kazıklardan ziyade yatay iletkenler daha etkili olacaktır.

Toprak Geçiş Direnci (R_t) değerleri yüksek olan direkler için yatay iletkenler ve özgül direnci düşük humuslu toprak kullanılmalıdır. Eğer arazi kayalık ise kazık çakmaya gerek yoktur; sadece yatay iletkenler ve humus ile iyileştirme yapılmalıdır. Ancak, kazık çakmaya elverişli ise dört kazık, yatay iletken ve humus uygulaması birlikte yapılmalıdır.

3.12.1. Dört kazık Mesh tipi metodu

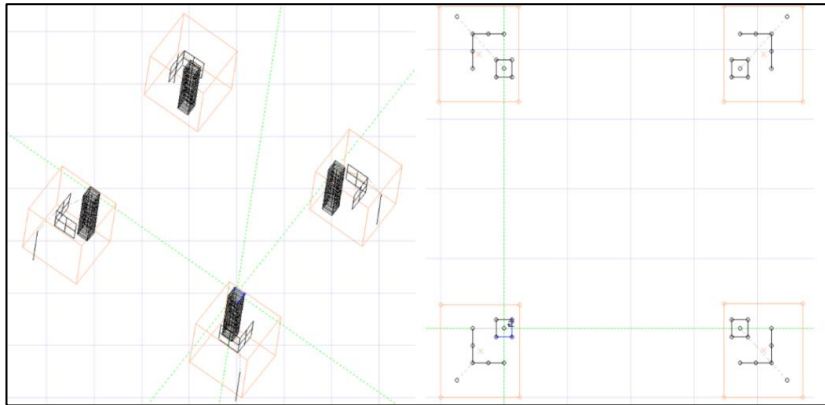
Bu uygulamada; direğin etrafına çelik iletken yerin 1 metre altından serilip 4 kazık ve direk ile birleştirilmiştir. Bu uygulamanın zor olacağı düşünülen yerlerde Dört kazık + hasır + humus metodu seçilmelidir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. 4kazık + Mesh Uygulaması

3.12.2. Dört kazık + hasır + humus tipi metodu

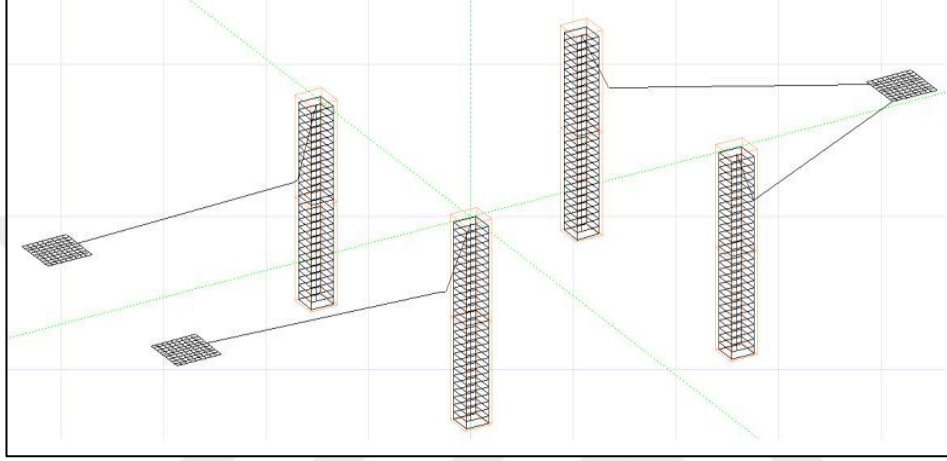
Bu uygulamada (Şekil 3.21), her bir direk ayağı etrafına 3 metre çapında çukur kazılmalıdır. Arazinin durumuna göre hasırın boyutları 1 ile 2 metre arasında olabilir. Bu hasır, kazık ve direk ayağı ile irtibatlandırılmalıdır. Uygulama esnasında hasırın altına ve yanlarına 25 cm humus serilmelidir. Hasır yerleştirildikten sonra, üstüne tekrar humus eklenip ana toprakla kapatılmalıdır. Her bir hasır için dört göz oluşturmak yeterlidir. Hasır uygulamasını dört köşe yerine iki köşeye yapmamızın sebebi, işletme esnasında direk örülüyken içeride çalışma yapmanın zor olabilmesidir. Tesis aşamasında ise dört köşeye de hasır yerleştirilebilir.



Şekil 3.21. 4 kazık + Hasır + Humus Uygulaması (Yandan Görünüş ve Üsten görünümü)

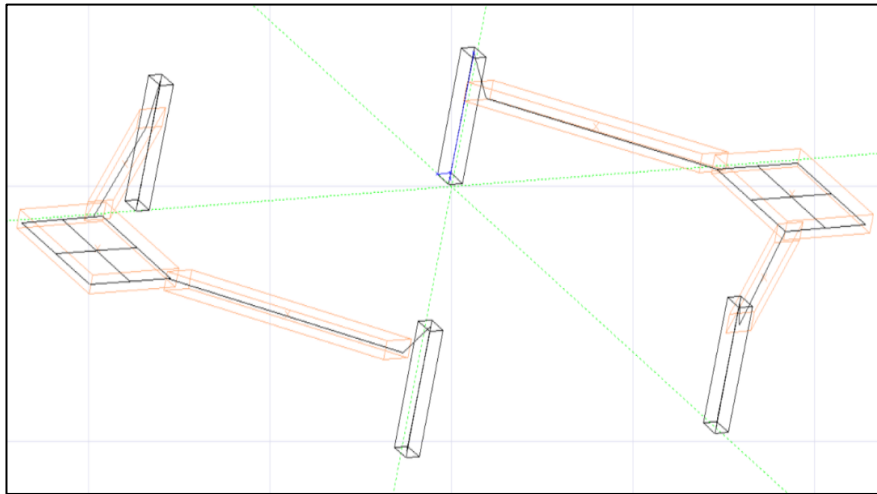
3.12.3. Counterpoise + hasır + humus metodu

Counterpoise ve hasır uygulamalarının doğru şekilde gerçekleştirilmesi ve kaç yöne yapılması gerektiği büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, yapılan modellemeler sonucunda, direğin uygun iki tarafına ayaklardan yatay iletken bağlanarak ve direkt olarak yaklaşık 5-10 metre uzaklıktaki hasır ile irtibat kurularak topraklama değerlerinin iyileştirilebileceği görülmüştür. Şekil 3.22’de gösterilen Counterpoise uygulaması, sol veya sağ tarafta olduğu gibi tercihe göre uygulanabilir. Her iki uygulama arasında belirgin bir fark bulunmamaktadır.



Şekil 3.22. Counterpoise ve Hasır Uygulaması (Yandan Görünüş)

Counterpoise uygulaması için kazılması gereken derinlik yaklaşık 1 m olmalıdır. İletkenler serilmenden önce 25 cm humuslu toprak uygulanmalı, ardından iletkenler serilmeli ve üzerlerine yine 25 cm humuslu toprak eklenmelidir. Son olarak, bu bölge ana toprak ile kapatılmalıdır. Counterpoise iletkenleri için 72 mm² veya 96 mm² kalibrede çelik iletkenler kullanılabilir. Uygulama alanının müsaitliğine bağlı olarak iletkenlerin direkt olarak yaklaşık 5-10 m uzaklığa serilmesi önerilir. Hasırın boyutu genellikle 2x2 m ile 3x3 m arasında değişebilir. Toplam kullanılacak iletken boyutu 20 metreyi geçmemeli ve çok fazla göz oluşturulması gereksizdir, çünkü bu uygulamanın etkisini artırmaz.

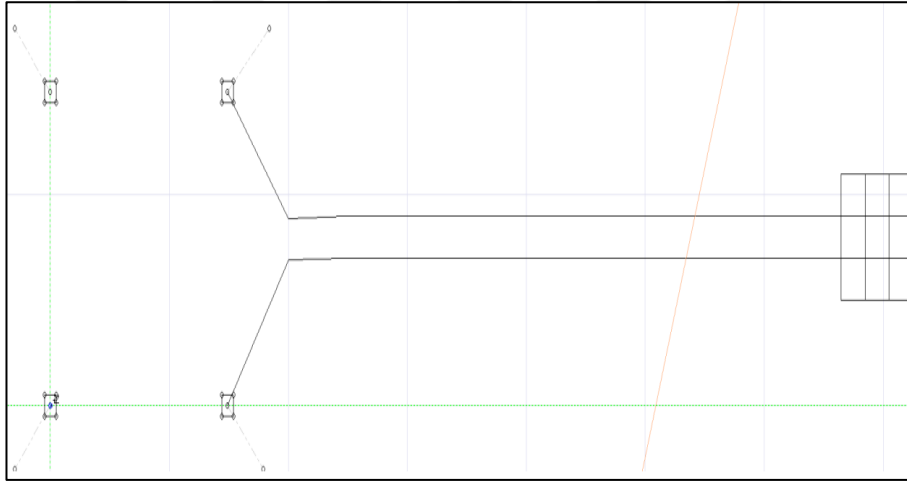


Şekil 3.23. Counterpoise ve Hasır İletken Uygulaması (Humus Toprak Uygulamalı)

Şekil 3.23'te gösterilen Counterpoise ve hasır uygulamasına, humuslu toprak ve GEM veya bentonit tozu ilavesiyle birlikte topraklama değerleri daha da düşecektir. Bu uygulama yapıldıktan sonra daha fazla topraklama iyileştirmesi yapmanın fayda/maliyet açısında anlamı yoktur.

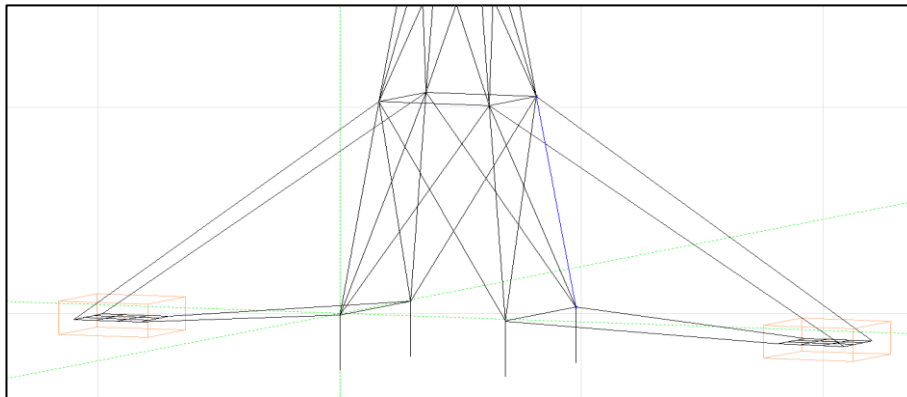
3.12.4. Uydu topraklama metodu

Bu etkili uygulama yöntemi, direğin bulunduğu kaya veya yüksek özgül dirençli alan ile sonrasında düşük özgül dirençli toprak alan arasına yatay bir iletken bağlanmasıyla gerçekleştirilebilir (Şekil 3.24). Bu uygulama topraklama değerlerinde önemli iyileştirmeler sağlar. Örneğin, sol tarafta 10.000 ohm-m, sağ tarafta ise 1.000 ohm-m özgül dirence sahip olduğunda, beş kat iyileştirme elde edilir. Her yerde uygulanabilir olmasa da mümkün olan yerlerde bu yöntem kullanıldığında parafudr ihtiyacını minimuma indirir. Topraklama iyileştirmesi yaparken öncelikle direklerde bu yöntemin uygulanabilirliği değerlendirilmektedir. Eğer uygulanabilir ise bu yöntemi tercih etmekte fayda vardır; uygulanabilir değil veya müsait değilse ikinci yöntemin seçilmesinde fayda olduğunu görmekteyiz. Bu ikinci yöntem ise toprağı 1 metre derinliğinde kazarak direğin 10-50 m uzaklığındaki 3x3 hasır ile irtibatlandırmayı içerir.



Şekil 3.24. Uydu Topraklaması

3.12.5. Guy wires (sadece belirli hatlarda yapılacak uygulama)

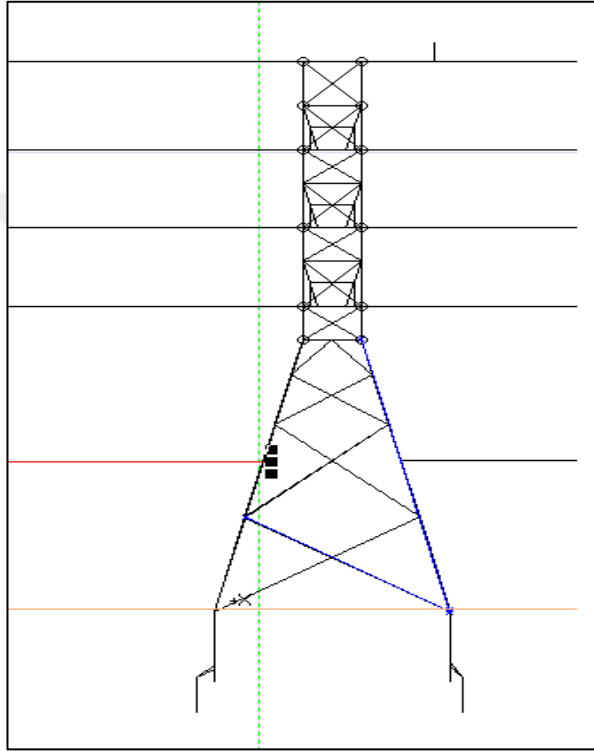


Şekil 3.25. Guy Wires Topraklaması

Bu uygulama, direğin yaklaşık 10 metre yüksekliğinden 4 farklı noktadan toprak ile irtibat sağlamak suretiyle, topraklama değerinin azaltılması ve direğin darbe empedansının düşürülmesi yoluyla YEMD kaynaklı açmaların azaltılmasını hedefler (Şekil 3.25).

3.12.6. Underbuilt wire metodu

Bu uygulamada, yüksek topraklama değerine sahip olan direğin yanındaki iki direk ile faz altından çelik iletken aracılığıyla irtibatı sağlanmıştır (Şekil 3.26). Bu yöntemle YEMD akımının diğer direklere daha fazla iletilerek direkte oluşan gerilimin azaltılması hedeflenmiştir.



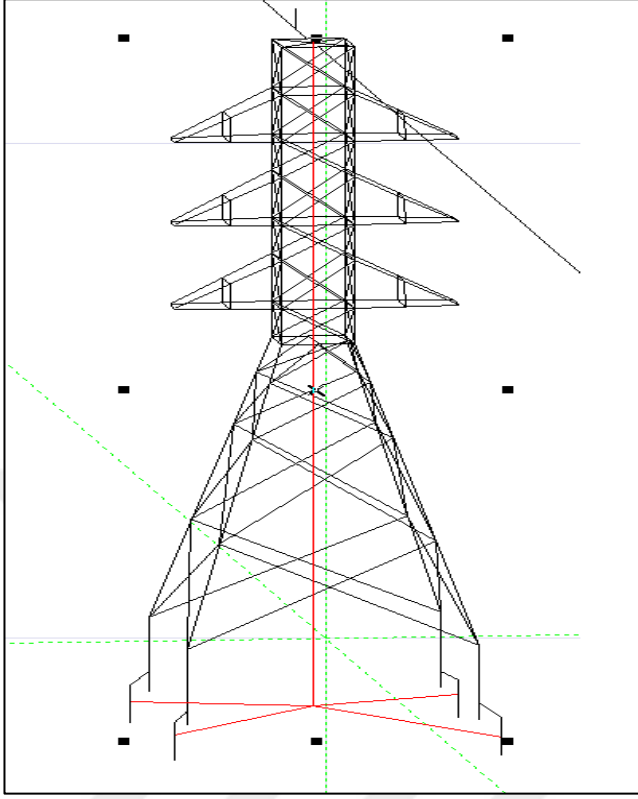
Şekil 3.26. Underbuilt Wire Topraklaması

3.12.7. Downlead (tek koruma iletkeni sistemi) metodu

Bu uygulama ile, direğe çarpan YEMD akımının kırmızı ile gösterilen indirme iletkeni aracılığıyla daha kolay bir şekilde toprağa yayılması ve direkte oluşan gerilimin azaltılması sağlanmıştır (Şekil 3.27).

Metotları özetlemek gerekirse, topraklama iyileştirmesi yapılırken, toprak geçiş direnç değerlerine bakıldıktan sonra dört farklı yöntem ile bu iyileştirmeler gerçekleştirilmelidir. Toprak geçiş direnci 20 ohm ve üzerinde olan direkler için bu yöntemler uygulanacaktır. İlk olarak 4. uygulama yöntemi değerlendirilmelidir; eğer bu uygulama için uygun alan yoksa veya müsait değilse 2. uygulama yöntemi tercih edilecektir. Tüm topraklama iyileştirmelerinde bakır ve çelik kullanımı arasında neredeyse hiç fark bulunmamaktadır. Bu sebeple, bakır kullanmak zorunlu değildir. Uygulama süresince toprak altında daha uzun ömre sahip olacak malzemeler tercih edilmelidir. Tüm yatay iletkenler ve hasırlar, 72mm² galvanizli çelik iletken kullanılarak yapılabilir. Counterpoise uygulaması yapılırken,

arazinin durumuna bağlı olarak 5-10 metre uzaklığa kadar iletken serilmeli ve bu iletken hasır iletken ile birleştirilmelidir.



şekil 3.27. Downlead Topraklaması

- Hasır iletken için çok fazla göz yapılmasına gerek yoktur.
- Açılan çukura iletken serilmeden önce yaklaşık 25 cm kalınlığında humuslu toprak serilmelidir.
- Humuslu toprak üzerine iletken ve hasır serildikten sonra, bu iletkenlerin üzerine yaklaşık 25 cm kalınlığında humuslu toprak daha serilmelidir.
- Son olarak, uygulama alanı ana toprak ile kapatılmalıdır.

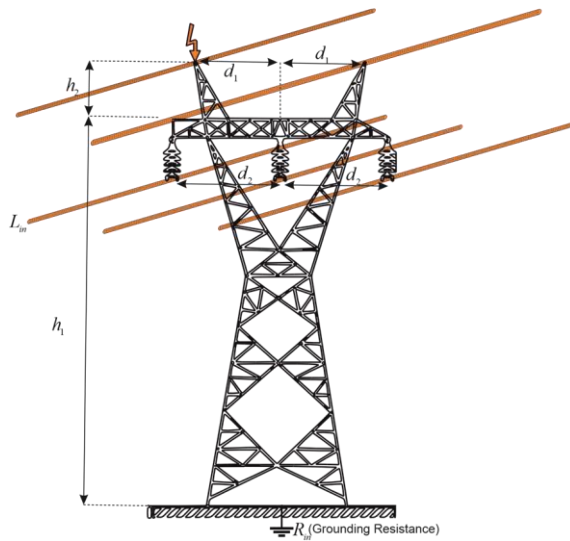
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde, araştırmamızın bulguları detaylı bir şekilde sunulmaktadır. Yapılan analizler ve deneyler sonucunda elde edilen veriler, çalışmanın temel amaçlarına ve hipotezlerine yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır. Bulgular hem nicel hem de nitel verilerin analizini içermekte olup, araştırma sorularımıza ve hipotezlerimize yönelik kapsamlı cevaplar sunmaktadır. Araştırmanın başlangıcında belirlenen amaçlar doğrultusunda, elektrik hatlarında YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin etkileri ve bu gerilimlerin azaltılması için kullanılan yöntemlerin etkinliği üzerine odaklanılmıştır. Bulgular, literatürdeki bilgilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve yeni bakış açıları kazandırılmıştır. Bulguların sunumu, çalışmada kullanılan yöntem ve tekniklere göre sistematik bir şekilde yapılmıştır. İlk olarak, YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin tespiti ve analizine ilişkin veriler sunulmuş, ardından bu gerilimlerin azaltılması için kullanılan tekniklerin etkinliği değerlendirilmiştir. Son olarak, elde edilen analizlerin değerlendirilmesi yapılmış ve bu analizlerin pratik uygulamalara nasıl yansıtılabileceği tartışılmıştır. Araştırmamızın sonuçları, enerji iletim hatlarında ve elektrik tesislerinde YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin yönetimi ve azaltılması konularında önemli katkılar sağlamaktadır. Ayrıca, bu bulguların, enerji sistemlerinde güvenilirliği artırmaya yönelik stratejik kararların alınmasında yardımcı olacağı düşünülmektedir.

4.1. Yıldırım Elektromanyetik Darbelerinin Havai Enerji İletim Hatlarındaki Elektrostatik, Elektromanyetik Alanlar ve İndüklenmiş Gerilimler Üzerindeki Dolaylı Etkisi

4.1.1. Doğrudan YEMD düşüşü

Şekil 4.1’de Yıldırım Elektromanyetik Darbeleri, elektrik ağının herhangi bir parçasına doğrudan boşalmasını temsil etmektedir. Çoğu durumda, geri dönüş akımı küçük olsa bile, EİH’lerde yalıtım seviyesine kıyasla yüksek aşırı voltajlar nedeniyle yalıtımlarda bozulma meydana gelir. Bu nedenle, doğrudan YEMD çarpmalarında, hatlardaki aşırı voltajlar hasara veya yalıtım malzemelerinin kırılmasına neden olabilir.



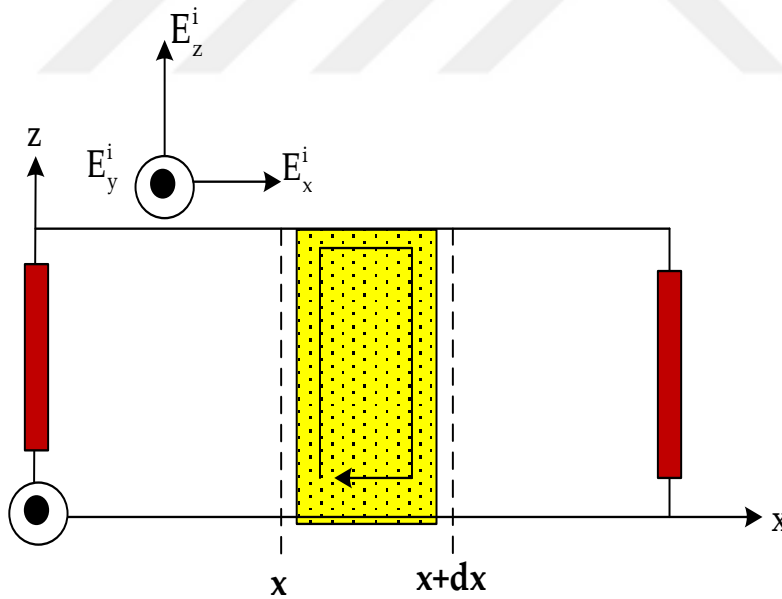
Şekil 4.1. YEMD’lerin EİH’ler üzerine doğrudan düşmesi (h : iletim hattının yüksekliği, $d_{1,2}$: izolatörler arasındaki mesafe, $h_{1,2}$: konsol yüksekliği, L_{in} : iletkin uzunluğu)

4.1.2. Dolaylı YEMD düşüşü

Dolaylı bir YEMD boşalması, bir güç sisteminin herhangi bir bölümüne doğrudan çarpmaz. Ancak, ağ boyunca yayılan indüklenmiş bir aşırı voltaj üretir. Bu tür YEMD boşalmaları, düşük yalıtımlı hatlarda (düşük korumalı iletim hatları) kesintilere neden olabilir. Dolaylı darbeler, doğrudan çarpmalara kıyasla daha küçük indüktif voltajlar üretse de genellikle havai hatların performansını etkiler. Örneğin, orta gerilim hatlarındaki dolaylı darbeler, kaydedilen arızaların ana kaynağıdır. Dolaylı YEMD'ler üzerine yapılan çalışmalarda, dipol tekniğinin iki çeşidi yaygın olarak kullanılmaktadır: süreklilik denklemi tekniği, hareket eden ve hızlanan yükler temelli bir teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler, akımın mekânsal ve zamansal dağılımı verildikten sonra elektromanyetik alanları değerlendirmek için literatürde kullanılır. Bu çalışmada, elektromanyetik alanları analitik olarak ifade etmek için hareket eden ve hızlanan yükler temelli teknik kullanılmıştır.

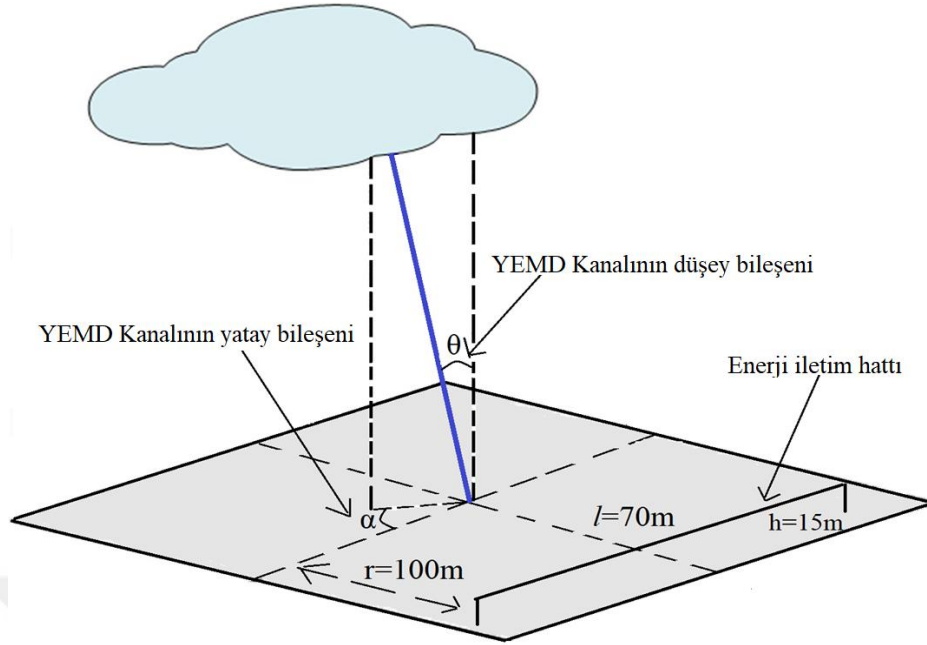
4.1.3. YEMD'in kublaj etkisi ile EİH'ler üzerindeki etkisi

YEMD akımları nedeniyle elektromanyetik alanlar oluşur ve bu alanlar güç şebekelerine zarar verebilir (R. Montano, 2005). Darbeler ve hatlar arasındaki birleşme, farklı alan hattı bağlantı modelleri kullanılarak sağlanır. Şekil 4.2'de sunulan geometriyi dikkate alarak, bu modeller mükemmel iletken zeminde bulunan iletkenlerin durumunu inceler. Şekil 4.3'te kublaj etkisinin enerji iletim hatlarını, elektrik ve manyetik alan olarak nasıl etkilediğini göstermektedir (R. Montano, 2005).



Şekil 4.2. Kublaj modelinin geometrik yapısı

Bu modeller, Rusck kapalı formülasyonu ve Rusck kublaj modeli kullanılarak, YEMD kaynaklı aşırı gerilimlerin güç hatlarında öngörülmesi için kullanılmıştır. (E_x^i , E_y^i , E_z^i : dışa doğru saçılan elektrik alanı, dx : mesafe değişimi)



Şekil 4.3. YEMD'lerin belirli bir iniş açısından (θ) kaynaklanan EİH 'ler üzerindeki kublaj etkisinin geometrik bir gösterimi (üstten görünüm, çizginin her bir parçası FDTD modelimizin uzamsal bir temsidir.)

4.1.4. Rusck kapalı formülasyonu

Elektromanyetik indüksiyon, kublaj modeli, kapalı formülasyon ve alan-ETL ilişkisi, alt başlıklarda Rusck tarafından matematiksel olarak değerlendirilmektedir. IEEE-1410 standartlarına göre, önerilen Rusck modelinin kapalı form çözümleri kritik olarak kabul edilmektedir (Nucci vd. 1993).

4.1.5. Rusck kublaj modeli

Rusck modeline ilişkin iletim hattı koşulları, iletken yüzeydeki elektrik alanın olası sonuçları ile ilişkilendirilerek çıkarılmaktadır. Rusck tarafından verilen ilgili güç hattı koordinasyon gereksinimleri, Denklem (4.1), (4.2) ve (4.3)'teki sayısal koşulların birleşimi ile gösterilmektedir (R. Montano 2005, M. A. Darveniza 2007).

$$\frac{d\varphi(x,t)}{dx} + L' \frac{di(x,t)}{dt} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{di(x,t)}{dx} + C \frac{d\varphi(x,t)}{dt} = C' \frac{d\varphi^i(x,t)}{dt} \quad (4.2)$$

Değişkenler şu şekildedir:

φ : YEMD'in düştüğü bölgeye yakın iletim hattındaki skaler potansiyel

φ' : YEMD akımı tarafından üretilen toplam skaler potansiyel

t : zaman

Hat akımının $i(x, t)$ ve L' ile C' hat üzerindeki uygun indüktans ve kapasitans olduğu durumda, hattaki toplam enerjilendirilmiş gerilim $u(x, t)$ şu şekilde verilir:

$$u(x, t) = \varphi(x, t) + \int_0^h \frac{\partial Az^i(x, z, t)}{\partial t} dz \quad (4.3)$$

Denklemler (4.4) ve (4.5)'de, h iletkenlerin yüksekliğini temsil eder ve Az^i vektör potansiyelinin ortogonal bileşenidir. İletim için sınır koşulları, t 'nin zaman sabitini temsil ettiği Denklemler (4.4) ve (4.5) ile verilir. (R_0 : boşluk direnci, R_L : hat direnci.)

$$\varphi(0, t) = -R_0 \cdot i(0, t) - \int_0^h \frac{\partial Az^i(0, z, t)}{\partial t} dz \quad (4.4)$$

$$\varphi(L, t) = -R_L \cdot i(L, t) - \int_0^h \frac{\partial Az^i(L, z, t)}{\partial t} dz \quad (4.5)$$

Rusck'ın kapalı formülasyonu, Denklem (4.6)'da gösterildiği gibi sınır koşullarıyla birlikte Heidler dalga formülasyonu ile birleştirilmiştir. Bu kombinasyon, Heidler akım karakteristiğini kullanarak akış formuyla ilgili daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

$$\varphi(0, t) = -R_0 \cdot \frac{I_0 \cdot u(t) \cdot e^{\frac{-t}{\tau_2}}}{e^{\frac{-\tau_1}{\tau_2}} \cdot \left(\frac{n\tau_2}{\tau_1}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)}} \cdot \frac{\frac{t}{\tau_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_2}\right)} - \int_0^h \frac{\partial Az^i(0, z, t)}{\partial t} dz \quad (4.6)$$

YEMD etkisine en yakın bölgede yer alan bir enerji iletim hattında YEMD tarafından oluşan aşırı gerilim için basitleştirilmiş bir denklem Rusck tarafından önerilmiştir. Denklem (4.7) olarak gösterilen ilgili matematiksel denklem de sunulmuştur (S. Rusck, R.H. Golde, 1977):

$$V_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{v}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right) \quad (4.7)$$

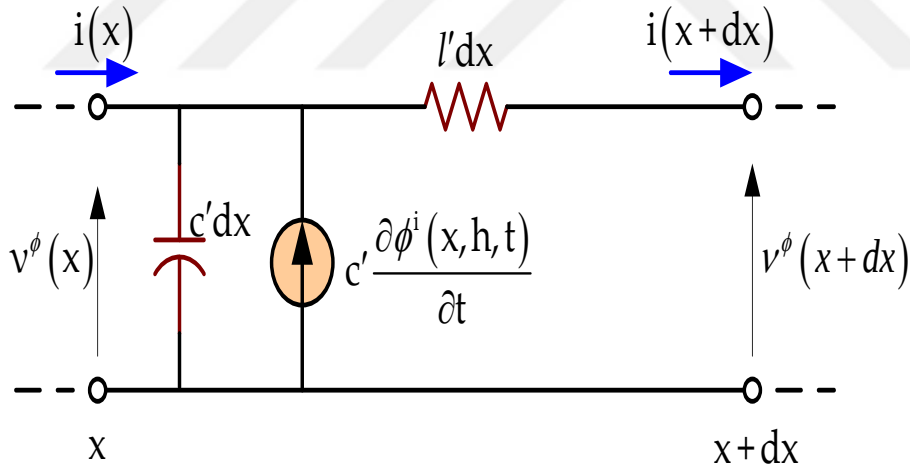
$$Z = \frac{1}{4\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cong 377\Omega \quad (4.8)$$

Değişkenler aşağıdaki gibidir:

$V_{\max}$: indüklenen maksimum gerilim (V)

- ϵ_0 : uzayın dielektrik sabiti (F/m)
 μ_0 : uzayın manyetik geçirgenliği (H/m)
 Z : hattın karakteristik empedansı (Ω)
 I_0 : YEMD akımının maksimum değeri (A)
 d : YEMD düşme yerinin iletim hattına olan uzaklığı (m)
 V : YEMD'in hızı (m/s)
 c : ışık hızı (m/s)
 h : hattın yerden yüksekliği (m)

Ek olarak, Denklem (4.8)'de sadece mükemmel zemin iletkenliği ve dikey YEMD kanalı için kullanıldığında belirli kısıtlamaların uygulanması gerekmektedir. Bu kısıtlamalar, YEMD hızı ışık hızına yakın olduğunda uygulanır. Şekil 4.4'te Rusck iletim hattı modelini göstermektedir (Çakıl, 2017). Yukarıda bahsedilen Rusck modeli diğer bağlantı modellerinden daha üstündür ve vektör potansiyelini göz ardı ederek yalnızca eşit elektrik alanının kaynağına bağlı kısma odaklanır. Buna rağmen, Rusck modeli doğru bir şekilde bir kuplaj etkisi sağlar.

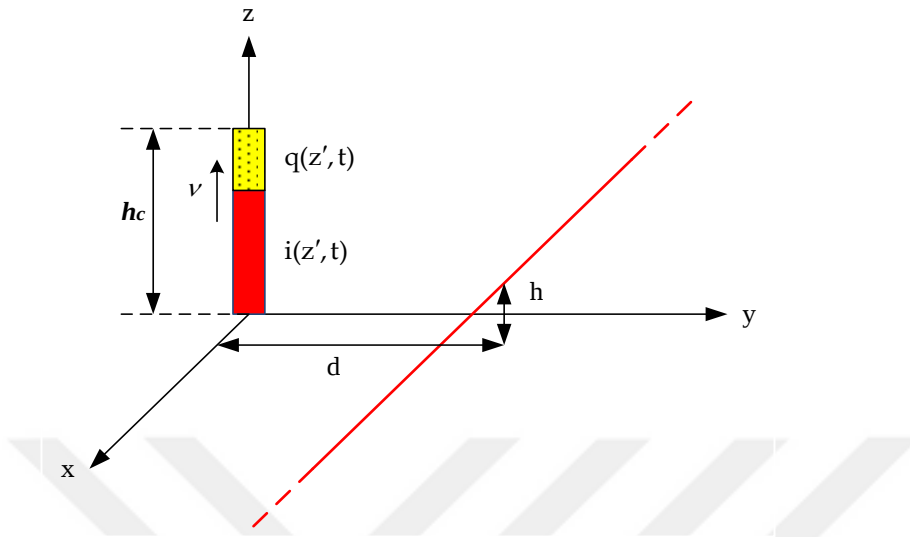


Şekil 4.4. Bir iletim hattı kesitinin Rusck kuplaj modeli

4.1.6. Rusck formülasyonu

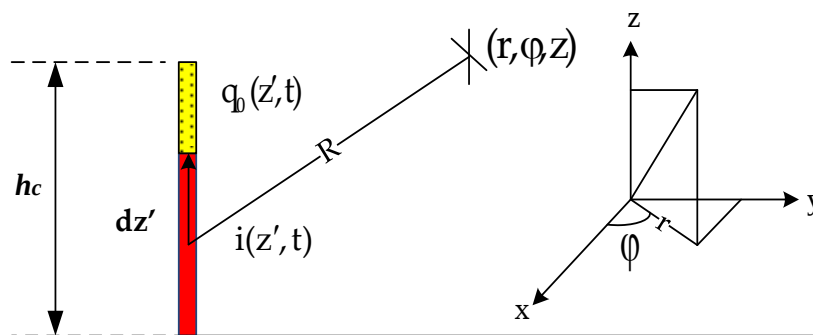
Rusck, YEMD ilişkisini Şekil 4.5'te gösterilen dikey ve düz bir kanal ile açıklamaktadır. YEMD etkisini açıklamak için, geri dönüş darbesi başlamadan önce YEMD yolunda negatif bir yük dağılımı görülür. Geri dönüş darbesi, YEMD kanalı boyunca sabit bir hızla yukarı doğru hareket eden ve yükü nötralize eden bir adım fonksiyonu çerçevesinde bir akım dalgalanması olabilir.

$$i(z', t) = I_0 \cdot u\left(t - \frac{z'}{v}\right) \quad (4.9)$$



Şekil 4.5. Rusck modeline göre YEMD'in matematiksel modeli (v: YEMD kanalı boyunca darbenin hızı; başlangıçta yüklenen kanalın uzunluğu sınırlıdır ve (h_c) olması beklenir. h: hattın yerden yüksekliği)

Rusck 'un geri dönüş darbe modeli, Şekil 4.5'te gösterilen başlangıçta eşit dağılımlı bir yük ile yüklenmiş dikey ve düz bir YEMD kanalı için geçerlidir (Çakıl, 2017). Alanın değerlendirilmesi için problemin geometrisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir (Çakıl vd. 2024). Geri Dönüş darbe akımı, bozulmamış ve azalmamış bir durumda kanal boyunca yayılan bir adım akımıdır. Model için akım dağılımını gösteren ifade Denklem (4.9)'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Rusck formülasyonuna göre problemin geometrisi

Kanal boyunca ilerlerken, dönüş akımı başlangıçta negatif yük dağılımını nötralize eden olumlu bir yük dağılımı "q₀" ile yüklenir. Başlangıçta yüklenen kanalın uzunluğu sınırlıdır ve üç boyutlu uzayda (R) herhangi bir noktadaki mesafenin "h_c" olması beklenir. (Şekil 4.6).

Akım ve "q₀" yük dağılımları arasındaki ilişki Denklem (4.10)'da gösterilmektedir:

$$I_0 = q_0 \cdot v \quad (4.10)$$

φ : skaler potansiyel

$\vec{A}$: vektör potansiyeli

β : bağlı hız ile ilgili değer

Γ : Lorentz faktörü

$$\varphi(r, z, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{s_1}^{h_c} \frac{q\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{R} dz' \quad (4.11)$$

$$\vec{A}(r, z, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{s_1} \frac{i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{R} dz' \quad (4.12)$$

$$\varphi(r, z, t) = \frac{-q_0}{4\pi\epsilon_0} \int_{s_1}^{h_c} \frac{dz'}{\sqrt{(z_s - z)^2 + r^2}} \quad (4.13)$$

Alt sınır değeri s_1 ve zemin parametresi z değeri için $z = s_1$ değerinde integral tarafından oluşturulan potansiyel Denklem (4.14)'te, s_1 için çözümü ise Denklem (4.15)'te gösterilmektedir:

$$t = \frac{s_1}{v} + \frac{\sqrt{(s_1 - z)^2 + r^2}}{c} \quad (4.14)$$

$$s_1 = \beta \cdot \Gamma^2 \left[ct - \beta z - \sqrt{(vt - z)^2 + (r/\Gamma)^2} \right] \quad (4.15)$$

Skaler potansiyel formülasyonu çözümden sonra yeniden yazılırsa, Denklem (4.16)'da sunulan çözümü elde ederiz:

$$\varphi(r, z, t) = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0} \left[\ln \left(vt - z + \sqrt{(vt - z)^2 + \left(\frac{r}{\Gamma}\right)^2} \right) - \ln(1 + \beta) \right. \\ \left. - \ln \left(h_c - z + \sqrt{(h_c - z)^2 + r^2} \right) \right] \quad (4.16)$$

Vektör potansiyeli, Denklem (4.14) ve (4.17) ile verilen aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\vec{A}(r, z, t) = \frac{\mu_0 \cdot I_0}{4\pi} \cdot z' \int_0^{s_1} \frac{dz'}{\sqrt{(z' - z)^2 + r^2}} \quad (4.17)$$

Genel s_1 ifadesini Denklem (4.13)'teki vektör potansiyelinde yerine koyarak, Denklem (4.18)'de gösterildiği gibi vektör potansiyelinin dikey bileşenini elde etmek de mümkündür. Denklem (4.19) manyetik alanı " $\vec{B}(\vec{b})$ " ve elektrik alanı " $\vec{E}(\vec{e})$ " olarak ifade eder.

$$\vec{e}(r, z, t) = -\Delta \times \varphi(r, z, t) - \frac{\partial}{\partial t} \vec{A}(r, z, t) \quad (4.18)$$

$$\vec{b}(r, z, t) = \Delta \times \vec{A}(r, z, t) \quad (4.19)$$

Rusck formülasyonuna göre, elektrik alanı iki kısma ayrılır. İlk kısım skaler potansiyel " e_φ " ve vektör potansiyeli " e_A " olarak ifade edilir.

$$e_\varphi(r, z, t) = \frac{Z_0 I_0}{4\pi\beta} \left(\frac{1}{\sqrt{(vt - z)^2 + \left(\frac{r}{\Gamma}\right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(vt + z)^2 + \left(\frac{r}{\Gamma}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h_c - z)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(h_c + z)^2 + r^2}} \right) \quad (\text{V/m}) \quad (4.20)$$

$$\vec{e}_A(r, z, t) = -\frac{Z_0 I_0 \beta}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{(vt - z)^2 + (r/\Gamma)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(vt + z)^2 + (r/\Gamma)^2}} \right) \quad (\text{V/m}) \quad (4.21)$$

Zemin, z sıfıra eşit olduğunda ve zemin ekseninde olduğu varsayıldığında Denklem (4.22) ve (4.23) kullanılarak hesaplanabilen iki elektrik alanı bileşeni üretir:

$$e_\varphi(r, z = 0, t) = \frac{Z_0 I_0}{2\pi\beta} \left[\frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (r/\Gamma)^2}} - \frac{1}{\sqrt{h_c^2 + r^2}} \right] \quad (4.22)$$

$$\vec{e}_A(r, z = 0, t) = -\frac{Z_0 I_0 \beta}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + (r/\Gamma)^2}} \quad (4.23)$$

Yerdeki manyetik alan şiddeti Rusck formülüne göre ifade edilirse Denklem (4.24) elde edilir:

$$\vec{b}_\varphi(r, z = 0, t) = \frac{2Z_0 I_0}{r^2} \left[\frac{\beta t}{\sqrt{1 + \beta^2 [(ct/r)^2 - 1]}} \right] \quad (\text{T}) \quad (4.24)$$

$$v(x, t) = \frac{Z_0 I_0 h \beta}{4\pi} \left[\frac{ct - x}{d^2 + \beta^2(ct - x)^2} \left(1 + \frac{x + \beta^2(ct - x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (x^2 + d^2)/\Gamma^2}} \right) + \frac{ct + x}{d^2 + \beta^2(ct + x)^2} \left(1 + \frac{x + \beta^2(ct + x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (x^2 + d^2)/\Gamma^2}} \right) \right] \quad (4.28)$$

Şekil 4.7’de Rusck’ın iletim hattı gösterimi yer almaktadır. Rusck modeli, elektrik alanı, zemin ve hat yüksekliği arasındaki skaler ve vektör potansiyellerin sabit olduğunu ve zemin yüzeyindeki potansiyellere eşit olduğunu varsayar. Rusck bu varsayımlara dayanarak Denklem (4.28) ve (4.29)’da ifade edilen denklemleri elde etmiştir. YEMD’e en yakın gerilimi belirlemek için ($x = 0$) yazılırsa, Denklem (4.29) elde edilir:

$$v(0, t) = \frac{Z_0 I_0 h}{4\pi d^2} \cdot \frac{2\beta ct}{1 + \left(\frac{\beta ct}{d^2}\right)} \left(1 + \beta^2 \frac{\frac{ct}{d}}{\sqrt{1 + \beta^2 \left[\left(\frac{ct}{d}\right)^2 - 1\right]}} \right) \quad (4.29)$$

4.1.8. YEMD filizinin başlangıçta yüksüz kanalındaki elektrik alan değişimi

Elektrik alan değişimi YEMD filizi yüksüzken ve yere düşmeden hemen önce incelenmiştir. YEMD filizinin yüksüz hali Şekil 4.7’de gösterilmektedir. Problemi analiz etmek için kullanılan denklemler, Denklem (4.30), (4.31) ve (4.32) ile ifade edilmektedir. Bu ifadelerde "ct" kat edilen mesafeyi, "d" hat uzunluğunu, "x" YEMD kanalının yere düşme derecesine göre konumunu, "δ" zaman sabitini ve "Γ" Lorentz faktörünün değerini göstermektedir. " e_x^1 " yüksüz kanalda oluşan elektrik alanını göstermektedir (Hoidalen, 2003, F. Rachidi vd. 1999).

$$ct > \sqrt{x^2 + d^2 + h^2} \quad (4.30)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{d^2 + x^2}{\Gamma^2}} \quad (4.31)$$

$$e_x^1 = \frac{Z_0 I_0}{4\pi \beta} \cdot \frac{x}{d^2 + x^2} \left(\frac{\frac{\beta ct - h}{\sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} - \frac{\beta ct + h}{\sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}}}{-\frac{2h}{\sqrt{x^2 + d^2 + h^2}}} \right) \quad (4.32)$$

4.1.9. YEMD filizinin başlangıçta yüklü kanalındaki elektrik alan değişimi

Elektrik alan ifadesi " e_x " iki aşamaya ayrılmıştır. İlk aşamada statik elektrik alanı, diğer aşamada ise dinamik elektrik alanı " e_x^s " ifade edilir. Bu iki elektrik alanı ifadesi " $ct > \sqrt{d^2 + x^2 + h^2}$ " aralığında gerçekleşir ve Denklem (4.33) ve (4.34)’de gösterilmiştir:

$$e_x^s = \frac{Z_0 I_0}{4\pi\beta} \cdot \frac{x}{d^2 + x^2} \cdot \frac{2h}{\sqrt{d^2 + x^2 + h^2}} \quad (4.33)$$

$$e_x^d = \frac{Z_0 I_0}{4\pi\beta} \cdot \frac{x}{d^2 + x^2} \left(\frac{\beta ct - h}{\sqrt{(\beta ct - h)^2 + \delta^2}} - \frac{\beta ct + h}{\sqrt{(\beta ct + h)^2 + \delta^2}} \right) \quad (4.34)$$

YEMD filizinin ilk yükleme durumu Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Bu durum için elektrik alanındaki değişimi hesaplamak için kullanılan denklemler, Denklem (4.35), (4.36) ve (4.37)’te ifade edilmiştir (Çakıl vd. 2017, A. Borghetti vd. 2000):

$$x_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(ct + x)^2 - h^2 - d^2}{ct + x} \quad (4.35)$$

$$\tau_m = \beta(ct - x) - h, \tau_p = \beta(ct - x) + h \quad (4.36)$$

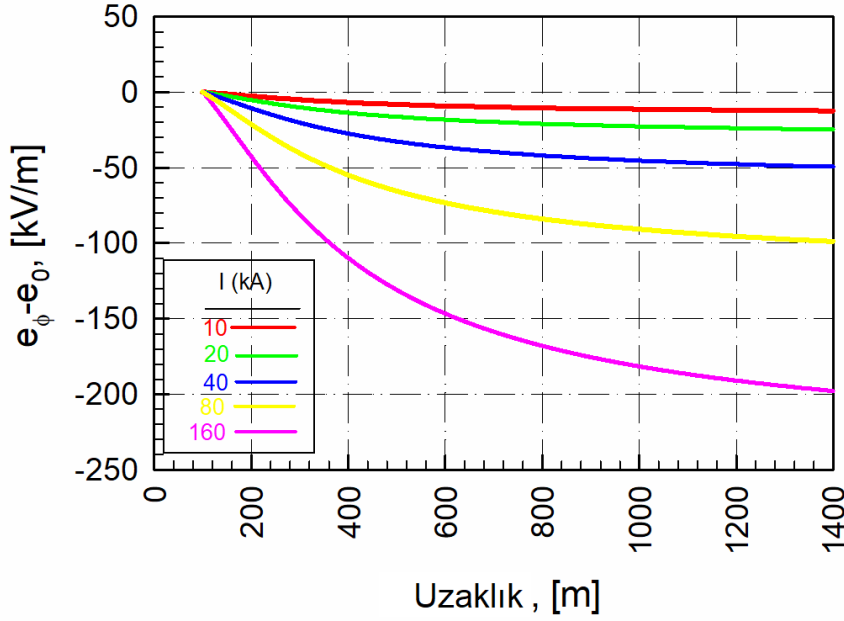
YEMD kanalı başlangıçta yüklüyse, Denklem (4.35) ve (4.36), Denklem (4.37)’de verildiği gibi ana denklemi elde etmek için birleştirilir:

$$\int_x^{x_1} e_x^2 dx = \frac{Z_0 I_0}{4\pi\beta} \cdot \left[\begin{aligned} & \ln \left(\frac{\tau_p - \beta x_1 + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_p)^2 + \delta_1^2}}{\tau_m - \beta x_1 + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_m)^2 + \delta_1^2}} \right) \\ & + \ln \left(\frac{\tau_m - \beta x + \sqrt{(\beta x - \tau_m)^2 + \delta^2}}{\tau_p - \beta x + \sqrt{(\beta x - \tau_p)^2 + \delta^2}} \right) \\ & + \ln \left(\frac{-h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_1^2}}{h + \sqrt{d^2 + h^2 + x_1^2}} \right) \\ & - \beta \ln \left(\frac{x_1 - \beta \tau_m + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_m)^2 + \delta_1^2}}{x_1 - \beta \tau_p + \sqrt{(\beta x_1 - \tau_p)^2 + \delta_1^2}} \right) \\ & + \ln \left(\frac{x - \beta \tau_m + \sqrt{(\beta x - \tau_m)^2 + \delta^2}}{x - \beta \tau_p + \sqrt{(\beta x - \tau_p)^2 + \delta^2}} \right) \end{aligned} \right] \quad (4.37)$$

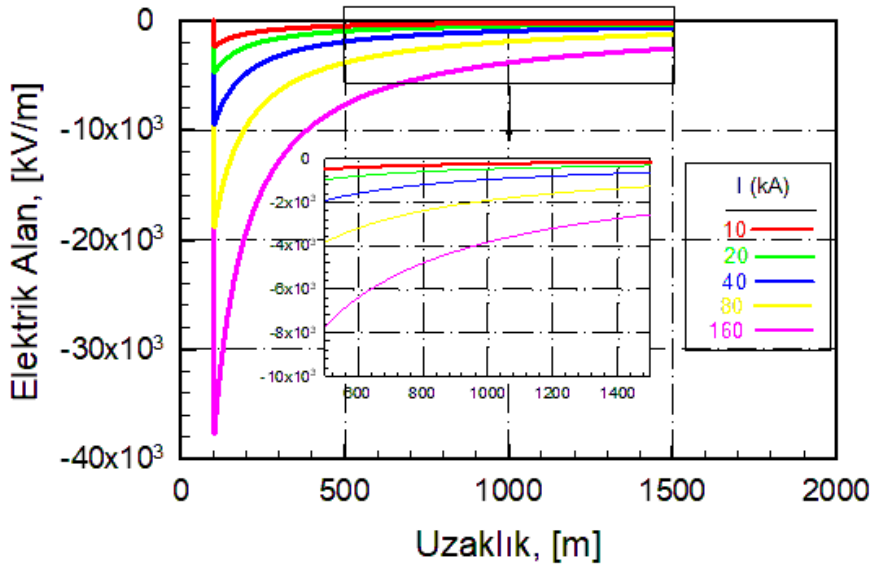
Analizler, geleneksel dipol yaklaşımı yerine hızlandırıcı yüklere dayalı bir elektromanyetik alan formülasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece nihai alan ifadelerini kapalı ve kompakt bir biçimde elde etmek mümkün olmuştur.

Yüke bağlı bileşen "e", Rusck kapalı formülasyonu ve bağlantı modeli başlığı altında, pozitif bir değer olan " e_ϕ^0 " ile başlayarak incelenmiştir. Şekil 4.8’de farklı akım değerlerine göre YEMD’in düştüğü noktaya olan mesafe iletim hattından 100 m olarak belirlenmiştir. Bu değerlerin seçilmesinin nedeni darbenin enerji iletim hatlarına yakın olmasını sağlamaktır. Bu mesafede havai hattın temelinde oluşan düşey elektrik alan

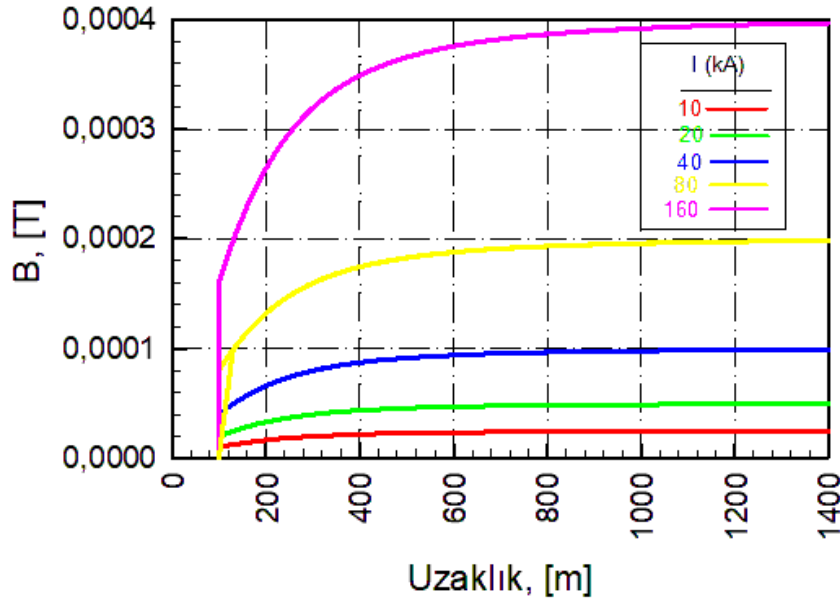
değeri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Dönüş darbesi buluta yaklaştığında bu değer sıfıra düşer. YEMD akımından kaynaklanan e_A bileşeni sıfırdan itibaren artmaya başlar. Denklem (4.22) ve (4.23)’teki denklemlerde t yerine $t = r/c$ denklemi yazılırsa ilk değerler elde edilir. Şekil 4.9 ve 4.10’da $e_\phi - e_\phi^0$, e_A ve b_ϕ analiz edilmiş ve analitik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. YEMD kanalı boyunca yük dağılımına bağlı olarak $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için dikey elektrik alanı (skalor bileşen)



Şekil 4.9. YEMD kanalı boyunca yük dağılımına bağlı olarak $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için (vektörel bileşen)

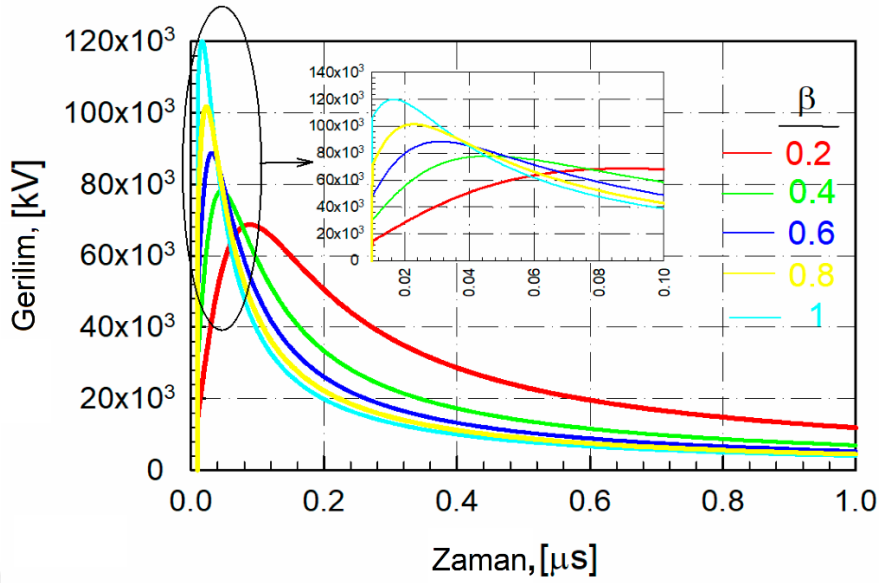


Şekil 4.10. YEMD kanalı boyunca yük dağılımına bağlı olarak $r = 100$ m ve $z = 0$ için farklı YEMD akımları için manyetik alan bileşeni

Şekil 4.9’da YEMD’in düştüğü noktadan 100 m uzaklıkta bulunan havai hattın tabanında oluşan elektrik alanın vektör bileşenleri farklı akım değerleri için gösterilmektedir. Şekil 4.10’da ise aynı konfigürasyon için manyetik alan değerleri not edilmiştir. " $\beta \cdot \frac{ct}{d} = 1$ " denklemi, Denklem (4.28)’e yerleştirilirse V_{peak} değeri elde edilir.

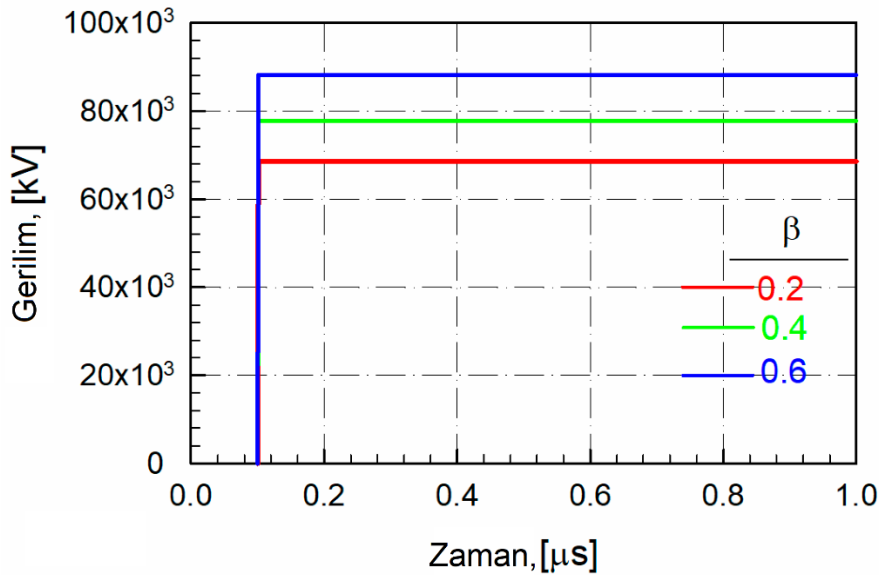
" $\beta \cdot \frac{ct}{d} = 1$ " 1410 IEEE standardı, tarafından önerilen indüklenen stresin tepe değerini gösterir (C. A. Nucci, 1995, K. Ishimoto vd. 2023). Burada " β " değeri bağlı hızı göstermektedir. Şekil 4.11’de benzer şekilde, indüklenen gerilim 15 m yüksekliğinde ve YEMD’in düştüğü noktadan 70 m uzakta bir hattın elde edilmiştir. İki iletim direği arasındaki mesafe, $d = 70$ m, tanımlanmıştır.

Bu değerler, Türkiye enerji iletim sistemlerinde tipik olarak 40 ila 70 m arasında bir mesafe kullanıldığı için seçilmiştir. Yükseklik olarak ise Türkiye enerji iletim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan 15-40 m aralığına denk gelmektedir. Direğin yüksekliği, $h = 15$ m, de tanımlanmıştır. Dolaylı darbenin iletim hattı üzerindeki etkisini daha iyi anlamak için en düşük değer seçilmiştir. Farklı β değerlerine (bağlı hız) ilişkin gerilimler 15 kA’lık bir YEMD akımı için elde edilmiştir.



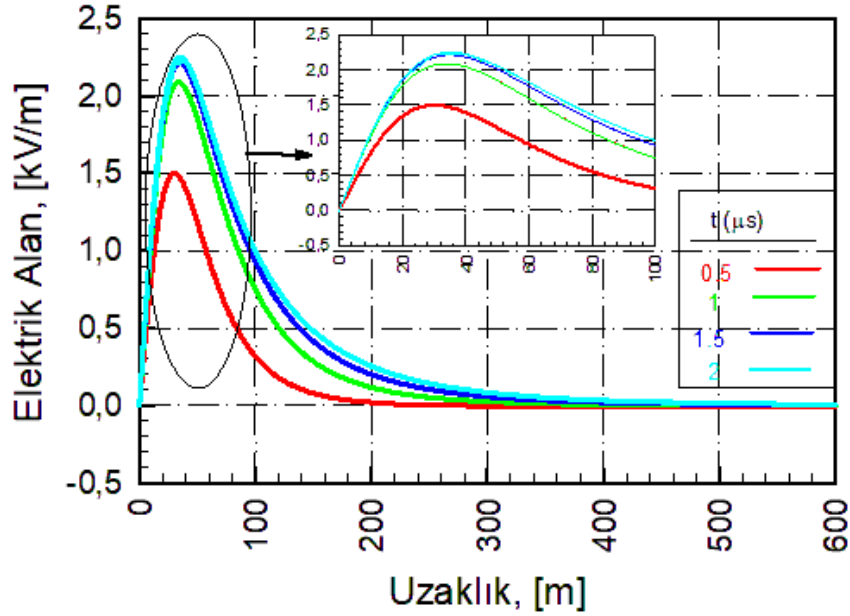
Şekil 4.11. Rusck formülüne göre $x = 0$ 'da indüklenen voltaj grafiği (YEMD filizinden 70 m uzaklıkta ve 15 m yükseklikte bir hat üzerinde, darbe akımı $I_0 = 15$ kA)

Şekil 4.12'de indüklenen gerilimin bağıl hıza göre tepe değeri detaylandırılmıştır. Özellikle çözümlerin altında yatan modelin ve bu modelde kullanılan yaklaşımların geçerliliği analiz edilmiş ve literatürdeki sonuçlar teyit edilmiştir. YEMD filizinin hızı, özellikle dalganın ön eğiminde indüklenen aşırı gerilim değerini ve dalga şeklini etkilemiştir. YEMD 'in düştüğü noktadan uzak yerlerde indüklenen aşırı gerilimin mümkün olan en yüksek değerinin YEMD filizinin hızıyla orantılı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Şekil 4.12'de hızın $t = 0$ 'da çarpma noktasına yakın bir yerde indüklenen aşırı gerilim üzerinde hiçbir etkisi olmadığı görülmektedir.

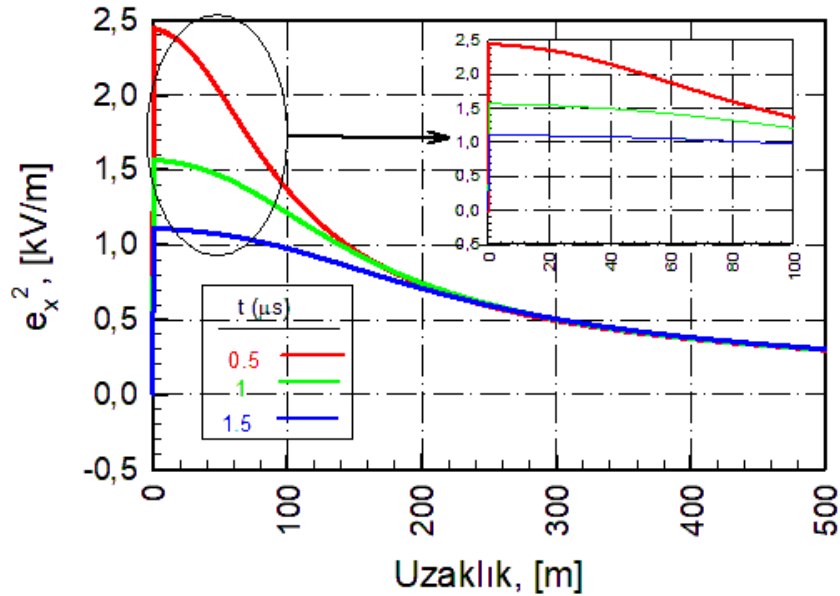


Şekil 4.12. Rusck denkleminde $x = 0$ 'da indüklenen gerilim değerleri $I_0 = 10$ kA için YEMD filizinin bağıl hızıyla ilgili olarak düştüğü noktadan 10 m yükseklikte ve 50 m mesafede bir hat üzerinde indüklenen gerilimin tepe değerinin ayrıntılı görünümü

Bu çalışmada Denklem (4.31) kullanılarak YEMD filizinin başlangıçta yüksüz olan kanalındaki elektrik alanındaki değişim incelenmiş ve bulgular Şekil 4.13'te sunulmuştur. Bu makalede ayrıca Denklem (4.36) kullanılarak başlangıçta yüklenme durumu ele alınmış ve sonuçlar Şekil 4.14'te sunulmuştur. İki YEMD olayının analitik eşdeğerliği Şekil 4.8'de belirlendiğinden, bu çalışmanın sonucu önemlidir.

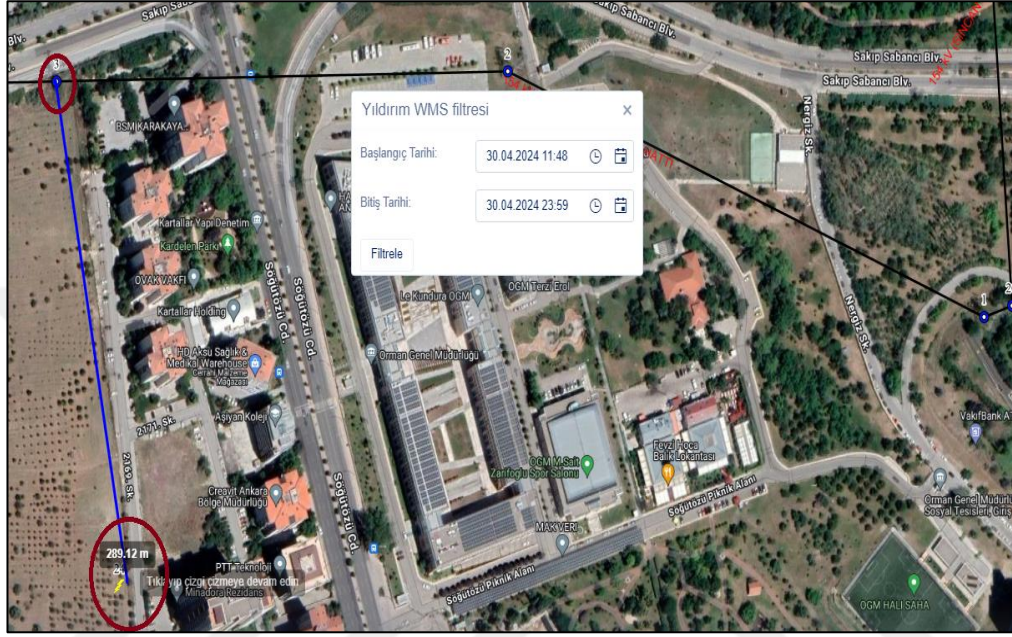


Şekil 4.13. YEMD kanalı başlangıçta yüksüz olduğunda elektrik alan değişimi ($x = 0$, $I_0 = 15$ kA, $\beta = 0.4$, $h = 15$ m ve $d = 70$ m)



Şekil 4.14. YEMD kanalı başlangıçta yüklendiğinde elektrik alan değişimi

Bu çalışmada, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da belirlenen veriler doğrultusunda, saha çalışmalarında tespit edilen dolaylı (endirekt) YEMD düşmelerinin etkin mesafesinin 0-400 metre arasında olduğu belirlenmiştir. Saha çalışmalarında elde edilen örnekler Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Bu bulgulara göre, YEMD’in düştüğü noktadan ortalama 0-400 metre uzaklıkta bulunan ve doğrusal olarak komşu olan iletim hatları direklerinde izolator patlamaları ve hat açılmaları meydana gelmiştir. Bu tespitler, iki farklı bölgedeki iletim hatlarını gösteren Şekil 4.15 ve Şekil 4.16’da sunulmuştur.



Şekil 4.15. 154 kV Sincan-Balgat hattına 289.12 m uzaklıkta boş arsaya düşen YEMD’in kublaj etkisi

Şekil 4.15 de gösterilen tespitte YEMD akımı iki darbe şeklinde yeryüzüne aynı anda düşmüştür. Akım büyüklükleri ise sırasıyla 123 kA ve 7 kA olarak tespit edilmiştir. Saha da etki süresi tespit edilmemiştir.



Şekil 4.16. 154 kV Adatoprakpınar-Konya hattına 333.67 m uzaklıkta boş arsaya düşen YEMD’in kublaj etkisi

Şekil 4.16’da gösterilen tespitte YEMD akımı tek darbe şeklinde yeryüzüne düşmüştür. Akım büyüklüğü 40 kA olarak tespit edilmiştir. Saha da etki süresi tespit edilmemiştir.



Şekil 4.17. 154 kV Sincan-Balgat hattına 289,12 m uzaklıkta boş arsaya düşen YEMD’in kublaj etkisine bağlı iletkenin bağlı olduğu izolatörün parçalanması (2024)

Sahada yapılan inceleme sonucu Şekil 4.17’de dolaylı olarak düşen bir YEMD’in kublaj etkisine bağlı olarak direklere vermiş olduğu hasar görünmektedir.

4.2. Enerji İletim Hattında YEMD Kaynaklı Darbe Akımlarına Karşı Topraklama Yönünden İyileştirme Metotları için Sahada Tespit Edilen Bulgular

Ülkemizde 154 ve 400 kV direklerde YEMD kaynaklı açmaların sıklığı bazı bölgelerde önemli bir sorundur. Bu sorunu çözmek için üç temel yaklaşım önerilmektedir:

- Topraklama iyileştirmesi
- İzolatör boyunu artırma
- Parafudr kullanımı

Son zamanlarda güncellenen Topraklama Şartnamesi, topraklama direncini 10 ohm’a indirmeyi hedeflemektedir, ancak bu değişiklik için mevcut 20 ohm’luk topraklama değerini 10 ohm’a düşürmek amacıyla dört kazık çakılması gerektiği belirtilmektedir. Ancak yapılan analizler göstermektedir ki, ekstra kazık çakmanın topraklama direncini önemli ölçüde düşürmediği ortaya çıkmıştır. Yüksek Gerilim Direk topraklamasında zaten direğin 4 adet çelik ayağı bulunmakta ve bunlar çelik donatı ve betonla desteklenmektedir. Bu nedenle, ekstra kazık kullanımı, sistemde büyük bir empedans düşümüne yol açmamaktadır (Toprak Potansiyel Yükselmesi’nde ise önemli bir rol oynamaktadır). Çalışmada, katmanlı toprak yapısı yerine homojen olarak 500 ohm-m özgül dirence sahip bir toprak kabul edilmiştir. Ancak pratikte, dünyada homojen bir toprak yapısının olmadığı ve alt katmanların özgül dirençlerinin farklılık gösterebileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, bir topraklama iyileştirmesi planlanırken, bölgenin Wenner

Yöntemi ile toprak özgül direnç değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu ölçümler, toprağın katman yapısını ve her katmanın toprak özgül direnç değerini belirlemede önemli rol oynamaktadır. Aksi takdirde, topraklama iyileştirmesi beklenen performansı sağlayamayabilir. Çizelge 4.1’ de sistemde sadece bir kazık çakılması durumu incelenmiştir.

Çizelge 4.1. Sistemde bir kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişim

Sistemde Sadece Tek Bir Tane Kazık Olduğunda Empedans Değişimi			
Kazık Boyu (m)	Yarıçapı (cm)	Gömülme Derinliği (m)	Topraklama Empedansı (ohm)
1	1	0.5	386
2	1	0.5	224
3	1	0.5	161
4	1	0.5	127
5	1	0.5	106
10	1	0.5	59
2	1	0.5	224
2	2	0.5	197
2	3	0.5	181
2	4	0.5	169
2	5	0.5	160
2	10	0.5	133
2	1	0.5	224
2	1	1	220
2	1	2	217
2	1	3	215
2	1	4	214
2	1	10	212

Çalışmada kullanılan değerler ise

2	4.1	2.5	160
---	-----	-----	-----

Bu analizlerden elde edilen sonuç, kazığı tek başına çok derine çakmanın beklenen faydayı sağlamadığını göstermektedir. Kazığın yarıçapını artırmak etkili olmakla birlikte, etkisi düşünüldüğü kadar büyük değildir. Ancak, kazık boyunu artırmak en etkili yöntem olarak öne çıkmaktadır. Ne var ki, Türkiye’de kazık boyunu artırmak ve bu işlemi gerçekleştirmek oldukça zahmetli bir süreçtir, bu nedenle kazık boyunu artırmak pratikte mümkün olamamaktadır.



Şekil 4.18. Yapılan saha çalışması ve ölçüm tespiti (2023)

Bu durumu inceledikten sonra, sistemde birden fazla kazık kullanıldığında ne gibi sonuçlar ortaya çıktığını da Çizelge 4.2’de ve Çizelge 4.3’te tespit etmeye çalışılmıştır.



Şekil 4.19. Direklerin topraklama direncinin ölçüm tespiti (2023)

Çizelge 4.2. Sistemde iki, üç ve dört kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişim

İki Kazık Kullanıldığında				
Kazık Boyu (m)	Yarıçapı (cm)	Gömülme Derinliği (m)	Aralarındaki Mesafe (m)	Topraklama Empedansı (ohm)
2	4.1	2.5	4	88
			8	84
			12	82
Üç kazık Kullanıldığında				
2	4.1	2.5	4	62
			8	58
			12	57
Dört kazık Kullanıldığında				
2	4.1	2.5	4	50
			8	46
			12	44

Görüldüğü üzere, kazık sayısının artırılması topraklama empedansını önemli ölçüde değiştirmektedir. Kazıklar arasındaki mesafe arttıkça empedans daha da düşer; bunun nedeni kazıkların birbirini etkilemesidir.

Kazıklar ne kadar uzak olursa, kublaj etkisi o kadar azalır ve iki kazık paralel gibi davranarak empedansı yarıya düşürür. Ancak bu mesafe çok yakın olduğunda empedans direkt olarak yarıya düşmez. Kazıkların hem tek başına hem de birlikte kullanımını değerlendirdikten sonra, yüksek gerilim direk temellerinde nasıl kullanılabileceğine bakabiliriz. Çizelge 4.3' direk temeline ek olarak bir kazık çakılması durumu tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Sistemde iki, üç ve dört kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişim

Direk Temeline Ek Olarak 1 kazık Kullanılması			
Kazık Boyu(m)	Yarıçap (cm)	Gömülme Derinliği(m)	Topraklama Empedansı(ohm)
3		2.5	31.32

Çizelge ...devamı 5	4	2.5	28.90
2	10	2.5	31.75
	5	2.5	32.48
	4	2.5	32.67
		0.5	33.59
		1	33.40
		3	32.45
		5	31.85
5	10	3	27.38

Çalışmada kullanılan değerler ise

2	4.1	2.5	32.65
---	-----	-----	-------

Türkiye’de kullanılmakta olan yüksek gerilim direklerinin topraklamasına bir örnek olarak saha çalışması (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19) ile yukarıdaki değerler hesaplanmıştır. Her tip direğin değerleri farklı çıkacaktır çünkü iki ayak arası mesafe, beton ve çelik donatı miktarları tüm değerleri etkileyecektir. Basitçe 154kV ve 400 kV taşıyan direklerde kaç kazık kullanılırsa sonuç ne olacağına dair yaklaşık değerler aşağıda verilmiştir. Ancak bunları orantısal olarak düşünmeliyiz çünkü her toprak ve direk tipinde farklı sonuçlar elde edilecektir. Buradaki amacımız, her direk tipi için yapacağımız çalışmaya kadar yaklaşık sonuçlar elde etmektir. Çizelge 4.4’ te ise kazık sayılarına göre oluşan ortalama direnç değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.4. Sistemde bir, iki, üç ve dört kazık kullanılması durumunda topraklama direncindeki değişimi saha çalışmaları sonucu elde edilen ortalama topraklama direnci

Kazık Sayısı	Topraklama Empedansı (ohm)
1 kazık	32.68
2 kazık	28.88
3 kazık	26.46
4 kazık	24.46

Sistemimizde 4 kazık kullanıldığında, topraklama direnci (empedansını) 32.68 ohm'dan 24.46 ohm'a düşürebileceğimizi görmekteyiz. Bu değeri daha da düşürmenin bir başka yolu ise yabancı ülkelerde olduğu gibi 5 metre uzunluğunda kazıklar kullanmaktır. Aşağıda daha verimli bir toprak tabakası varsa, bu yöntem daha etkili olmaktadır; ancak analizlerimizi homojen toprak yapısı varsayımıyla gerçekleştirdiğimiz için aynı şekilde aktaracağım. 4 kazığın boyunu 5 metreye çıkardığımızda, topraklama empedansı 18.71 ohm olarak hesaplanmıştır. Ancak, bu uygulamayı ülkemizde gerçekleştirmek pek kolay değildir çünkü bazı bölgelerde 2 metre kazık bile çakmak oldukça zordur. Topraklama değerini düşürmenin bir diğer kolay yolu ise Mesh Grid (direğin etrafına yatay iletken sermek)'dir. Çizelge 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8'de kazıklar üzerine yapılmış olan değişiklikler ve değişen topraklama empedans değerleri gösterilmiştir.

Bu uygulamayı yaptığımızda;

Çizelge 4.5. Bir kazık ve yatay iletken serildiğinde (0.5m derinliğe), 1cm çapında (İşletme İçin)

Kazık Boyu (m)	Yarıçap (cm)	Gömülme Derinliği (m)	Topraklama Empedansı (ohm)
2	4.1	0.5	22.39

Çizelge 4.6. Bir kazık ve yatay iletken serildiğinde (2.5m derinliğe), 1cm çapında (Tesis İçin)

Kazık Boyu (m)	Yarıçap (cm)	Gömülme Derinliği (m)	Topraklama Empedansı (ohm)
2	4.1	2.5	20.37

1 kazık ve Yatay iletken topraklama değeri (22.37ohm) yatay iletken kullanılmadan 4kazık çakıldığındaki değerinden (24.44ohm) daha düşük çıkmaktadır. Bu yatay iletkenin daha etkili olduğunu göstermektedir. Peki yatay iletkenle birlikte 4 kazık kullanıldığı durumda;

Çizelge 4.7 Dört kazık ve yatay iletken serildiğinde (2.5m derinliğe), 1cm çapında

Kazık Boyu (m)	Yarıçap (cm)	Gömülme Derinliği (m)	Topraklama Empedansı (ohm)
2	4.1	2.5	18.84

Tüm bu uygulamaları gerçekleştirdik ancak toprak özgül direnci 500 ohm-m olan bu bölgede hala 10 ohm'un altına inemedik. Bu durumda, Counterpoise uygulaması ile indirilebilir. Bu yöntem, direktten 5-10 metre uzaklığa yatay iletken sermek ve bu iletkeni 1 m² lik çelik veya bakır örgü ile irtibatlandırmaktan ibarettir.

Çizelge 4.8. Dört kazık ve yatay iletken serildiğinde (2.5m derinliğe), 1cm çapında ve Counterpoise uygulaması (İki tarafa 5m iletken serilmesi ve 1m² levha)

Kazık Boyu (m)	Yarıçap (cm)	Gömülme Derinliği (m)	Topraklama Empedansı (ohm)
2	4.1	2.5	13.01

Tüm bu iyileştirmeleri yaptığımızda elde ettiğimiz değer hala istenilen değere ulaşamadı. Burada yapılacak olan daha fazla Counterpoise oluşturmak olabilir veya düşük özgül dirençli kum dökümleriz. 50 ohm-m kum uygulaması yaptığımızda ise sonuç 11.9 ohm çıkmaktadır.

4.2.1. Kazıkların yatay-dikey ve içeri-dışarı çakılması farkı

Çizelge 4.9. Kazıkların Çakılma Durumlarına göre topraklama empedansı

Kazıkların Çakılma Durumu	Topraklama empedansı (ohm)
Dikey-İçeri	25.56
Dikey-Dışarı	24.44
Yatay-İçeri	26.15
Yatay-Dışarı	24.40

Sonuçlardan görüldüğü üzere, kazıkların dikey olarak çakılması ve yatay olarak serilmesi arasında belirgin bir fark bulunmamaktadır. Ancak, kazıkların içeri veya dışarı yerleştirilmesi arasında farklar gözlemlenmiştir. Toprak Potansiyel Yükselmesi ve Adım ve Dokunma gerilimleri gibi faktörlerin önemli olduğu durumlarda, kazıkların dışarı yerleştirilmesi daha etkili olmaktadır. Bu değerler temsili niteliktedir ve her direk tipi ile toprak katmanı için farklı sonuçlar elde edilebilir. Burada amaç, orantısal bir yaklaşım sunmaktır. Toprak katmanı bu konuda önemli bir etkidir. Neden bu kadar önemlidir. Çünkü şimdiye kadar toprak homojen olarak kabul edilmiştir ve bu sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir. Bu durum tüm varyasyonlar sağlanarak açıklanmaya çalışılmıştır.

Yüksek frekans karşısında dikey kazıklar ve yatay iletkenler farklı davranış sergiler. Bu farklılıkların direğin tepesinde oluşacak gerilim farklarına etkilerini incelemek amacıyla, ATP-EMTP bir direk modeli oluşturulmuş ve YEMD ile birlikte oluşacak gerilimler analiz edilmiştir. ATP-EMTP modülü, yüksek frekans etkilerini ve bu etkilerin sistem

üzerindeki sonuçlarını değerlendirirken kullanılır. Yüksek frekansta, dikey kazıklar ve yatay iletkenler, farklı empedans değerleri ve topraklama direnci gösterir. Bu farklılıklar, YEMD, sırasında direğin tepesinde oluşacak gerilimlerde belirgin değişimlere neden olabilir. Dikey kazıklar, derinlemesine toprağa nüfuz ettiği için topraklama direncini düşürme eğilimindedir, ancak yüksek frekansta bu etkinin azalabileceği ve yüzey akımlarının daha belirgin hale geleceği gözlemlenebilir. Yatay iletkenler ise daha geniş bir yüzey alanına yayıldığı için yüzey akımlarının dağılımında farklılık gösterebilir. Bu durum, yüksek frekansta yatay iletkenlerin topraklama performansını artırabilir.

Yapılan simülasyonlar ve analizler sonucunda, YEMD'in direk tepesinde oluşturduğu gerilimlerin, kullanılan topraklama yöntemi ve iletken tipi ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Dikey kazıklar ve yatay iletkenlerin farklı frekans ve darbe koşullarında nasıl davrandığını anlamak, enerji iletim hatlarının ve elektriksel altyapının korunmasında önemli bir rol oynar. Dört kazık ile oluşturduğumuz tasarım ile bir kazık ve yatay iletken ile oluşturduğumuz tasarım arasında empedans farkı bulunmaktaydı. 50Hz analizinde, yatay iletken empedans değerini daha fazla düşürmekteydi. Bu nedenle, değerleri dengelemek adına dört kazığın boylarını 3 metreye çıkardık. Bu şekilde, iki tasarımı da yakın topraklama değerlerine getirerek YEMD düşmesi sonucu nasıl davrandıklarını tespit etmeye çalıştık. Yaptığımız benzer çalışmalarda, iki tasarım arasında çok yakın sonuçlar elde ettik ve YEMD esnasında yatay iletken ile dikey kazıklar arasında sadece %0.5 gibi küçük bir fark olduğunu gözlemledik. Bu bulgular, her iki yöntemin de topraklama sistemlerinde benzer etkinlik seviyelerine sahip olduğunu ve yüksek frekansta benzer performans gösterdiğini doğrulamaktadır. Peki sadece toprak iyileştirmesi ve izolator eklemekle YEMD açmalarına karşı sistemimizi geliştirmeliyiz. Ülkemizde kullanılmayan ama birçok makalede gördüğümüz ve yabancı ülkelerde kullanılan başka bir metot daha var ki bu hem YEMD kaynaklı açmaları azaltıyor hem de kış aylarında koruma iletkeni problemi olan yerler için çok etkili bir yöntem olarak kullanılabilir. Bu yöntem; "faz iletkenlerinin altından düzlem boyunca komşu direklere toprak iletkeni ile bağlantı yapmaktır."(Underbuilt Wire). Tabi ki tüm hat boyunca değil sadece YEMD yoğunluğunun çok olduğu ve yüksek toprak geçiş direncine sahip direklere uygulanabilir. Bir başka uygulama ise Guy Wires yöntemidir. Bu uygulama ile direğin yüksek darbe empedansı azaltılmış oluyor ve YEMD kaynaklı açmalar %30 azaltılabilmektedir.

Yaptığımız saha çalışmasında bu iyileştirmeleri bu bölümde olarak özetlemek gerekirse:

YEMD yoğunluğu yüksek ve toprak geçiş direnci yüksek olan işletmede bulunan direklerde YEMD kaynaklı açmaları en aza indirmek için aşağıdaki uygulamaların yapılması gerekmektedir:

- İzolatör Ekleme: Eğer klerans yeterli ise izolator eklenmelidir.
- Toprak İyileştirmesi Yapmak: Mesh grid, kazık, counterpoise, örgü iletken gibi yöntemlerle toprak iyileştirmesi yapılmalıdır.
- Underbuilt Wire: Faz iletkenlerinin altından toprak iletkeni bağlantısı yapılmalıdır. OPGW underbuilt wire olarak kullanılabiliriyorsa bu bir avantaj sağlar.
- Guy Wire: Direkten dört noktadan toprak ile bağlantı yapılmalıdır (ancak hırsızlık riski bulunmaktadır).
- Parafudr Kullanımı: Hat Parafudr ve TM'lerin hat ile bağlantı oluşturduğu ön bölüme (primer) eklenmelidir.

Kış aylarında toprak teli sehim problemi olan ve toprak teli kesilmek zorunda kalınan bölgelerde Underbuilt Wire uygulaması yapılmalıdır. Bu işlemi yaparken, çift devre direklerde üst fazlara parafudr yerleştirilmelidir. Bu yöntem, üst fazların sanki toprak teli gibi aşağıdaki fazları koruduğu için çok etkili olmaktadır. Klerans yetersiz olan bölgelerde ise, daha az sehim veren ve dayanıklı olan Japon yapımı ACFR iletken türü veya benzeri iletkenler kullanılmalıdır. Yapılacak analizler sonucunda bazı durumlarda toprak iyileştirmesi yapılması, bazı durumlarda ise parafudr kullanımı daha iyi sonuçlar verebilir. Ancak, ülkemizde yaygın olarak kullanılmayan fakat diğer ülkelerde kullanılan Underbuilt Wire ve Guy Wire gibi uygulamalar da devreye sokularak YEMD kaynaklı açmalar en aza indirilebilir.

4.3. Hat Parafudrları ile Yıldırım Elektromanyetik Darbelerine Karşı Koruma: Gerçekçi Yüksek Gerilim Güç Hattı Bölgesi İçin Bir Simülasyon Çalışması

Yıldırım elektromanyetik darbesi, enerji nakil hattına veya enerji tesisine düştüğünde, büyük bir akım kaynağı ile elektrik hattı devresi arasında büyük bir anahtarın kapanması gibi etkiler yaratır. Bu durum, devre koşullarında ani bir değişime neden olarak geçici (transient) bir durum oluşturur. Geçici oluşan bu durumun hatlarda oluşturduğu zararı en aza indirmek amacıyla çeşitli koruma elemanları kullanılmaktadır. Bu koruma elemanları arasında en yaygın olarak kullanılanlar parafudurlardır. Bir YEMD darbesi, enerji tesisine veya enerji iletim hattına düştüğünde bu sistemleri korumanın en etkili yolu parafudurlardır. Parafudurlar, lineer olmayan direnç yapıları sayesinde bu pik akımların zemine iletilmesini sağlarlar. Geleneksel olarak trafo merkezlerinin girişinde kullanılan parafudurlar, son yıllarda hat başları veya hat sonlarına ek olarak belirli hat direklerine de yerleştirilmeye başlanmıştır. Bu gelişmeler, polimerik ZnO (Çinko-Oksit) parafudurlarının hızla geliştirilmesine yol açmıştır. Günümüzde farklı voltajlarda önemli sayıda hat parafudurları aktif olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, enerji iletim hatlarında hat parafudurlarının kullanımı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmada tasarladığımız model, Türkiye'nin Muğla Bölgesi'nde aktif olarak çalışan bir 380 kV havai hattın tam üç fazlı tek hat diyagramı bire-bir modellenerek YEMD kaynaklı aşırı gerilimleri değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Ortaya çıkan aşırı gerilim modelleri ve büyüklükleri çeşitli temel noktalarda hesaplanmıştır. Simülasyonlar, hat parafudurlarının yokluğu da dahil olmak üzere birçok parafudr konumu için tekrarlanmıştır. Çalışmanın simülasyon ortamı olarak ATP-EMTP seçilmiştir. Bu programı kullanarak, EİH'lerde YEMD çalışmalarıyla ilgili tüm temel unsurlarını zaman alanında inceleyebiliriz. Çalışma, aktif olarak kullanılan bir yüksek gerilim iletim hattı modeli ile çelik direkler tarafından sonlandırılan bir dizi açıklık ve hat segmentini temsil eden bloklardan oluşmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, bir YEMD'in enerji iletim hattı ekseninde koruma iletkenine çarpması durumunda hat parafudurlarının hataya karşı oluşturduğu durumu incelemektir. Çalışmada ATP-EMTP programı kullanılarak aktif olarak kullanılan 380 kV çift devreli bir havai iletim hattının YEMD'den korunmasında hat parafudurlarının katkısı incelenmiştir. Kullanılan tüm modeller, yayınlanmış simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca, enerji iletim hatlarının YEMD arızalarına karşı iyileştirilmesi için simülasyonlara dayalı pratik önerilerde bulunulmuştur.

4.3.1. Teorik analiz ve incelenen iletim hattı bölgesi

YEMD'in içerdiği enerji miktarı oldukça yüksektir ve bir enerji nakil (iletim) hattına veya bir elektrik tesisine düşen tek bir darbe bile yıkıcı hasara neden olabilir. YEMD, iletim hatlarındaki kesintilerin başlıca nedenlerinden biridir. YEMD, bir iletim hattına düştüğünde büyük bir akım kaynağı ile güç hattı devresi arasındaki büyük bir anahtarın kapanması gibi bir etki yaratır (Çakıl T. 2017). Bu anahtarın kapanması, devre koşullarında ani bir değişikliğe neden olarak geçici bir durum oluşturur. YEMD etkisi, bulutlar ve yer arasında tek bir vuruş veya birden fazla bileşen vuruşu olarak gerçekleşebilir. Çok vuruşlu YEMD darbeleri genellikle 3-4 vuruştan oluşur ve darbeler genellikle 40 ila 80 ms aralıklarla meydana gelir. Darbe büyüklükleri genellikle 1 kA ila 400 kA aralığında ölçülen tipik tepe akımlarına sahiptir (Uman M. 1986). Çalışmanın sayısal analizinde, YEMD'in sayısal modeli olarak Heidler fonksiyonu Denklem (3.38) ve Denklem (3.39) kullanılmıştır (Heidler F. 1985).

Direkleri temsil etmek amacıyla, Şekil 4.19'da gösterilen çok yapılı bir direk modeli kullanılmıştır. Bu model, üst, orta ve alt faz çapraz kol pozisyonlarına bölünmüş dört bölümden oluşmaktadır. Her bir bölüm, yürüyen dalga'nın zayıflatılması amacıyla paralel bir RL devresi ile seri olarak kayıpsız bir hat içermektedir. Bu çok yapılı direk modeli, ATP-EMTP programı ile kolayca çizilebilir ve çok iletkenli analizler için uygun bir yapı sunar. Direk model parametreleri Denklem (4.38) ve Denklem (4.39)'daki ifadelerle belirlenmiştir.

$$H = \sum_{i=1}^3 h_i$$

$$r = \left(\frac{r_1 \cdot h_1 + r_2 \cdot h_2 + r_3 \cdot h_3}{2 \cdot H} \right) \quad (4.38)$$

$$Z_t = 60 \cdot \left(\ln \frac{H}{r} - 1 \right)$$

$$R_i = \frac{-2Z_t \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} \cdot h_i$$

$$R_4 = -2Z_t \ln \sqrt{\gamma} \quad i=1,2,3 \quad (4.39)$$

$$L_i = \frac{\alpha \cdot R_i \cdot 2 \cdot H}{V_t}$$

Burada;

Z_T = Direk empedansı [Ω]

R_f = Direk temel direnci [Ω]

L_i = Direk kesit endüktansı [mH]

$H(h)$ = Direk(kule) yüksekliği [m]

R_i =Direk kesit empedansı [Ω]

γ = Zayıflama (bozunma) katsayısı

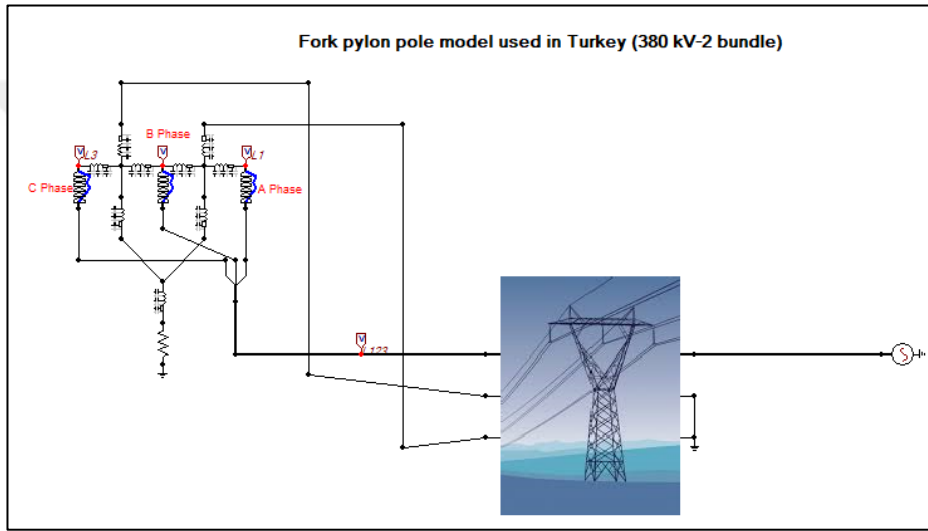
v_t = Darbenin ilerleme hızı [m/sn]

α = Sönümleme katsayısı

4.3.2. Atp-Emtp modelinin bileşenleri ve YEMD çalışması için YG enerji iletim hattının sayısal modellemesi

4.3.2.1. Atp-Emtp’de enerji iletim hattı modeli

Simülasyon, iletim hattı ile ilişkili frekans aralığı göz önünde bulundurularak, hat parametrelerinin dağıtılmış doğası dikkate alınarak PI modelleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Ishii M. vd. 1991). Faz iletkenleri ve koruma telleri, kuleler arasındaki açıklık mesafeleri, konsol boyutları ve topraklama değerleri dikkate alınarak modellenmiştir. Hat modeli için toplanan girdi verileri, iletkenin geometrik konfigürasyonu, çapları ve demetlerin geometrisini içermektedir. Hat parametreleri, Şekil 4.20’de gösterilen ATP-EMTP’nin LCC bloğu kullanılarak belirlenmiştir (Çakıl T. 2017).



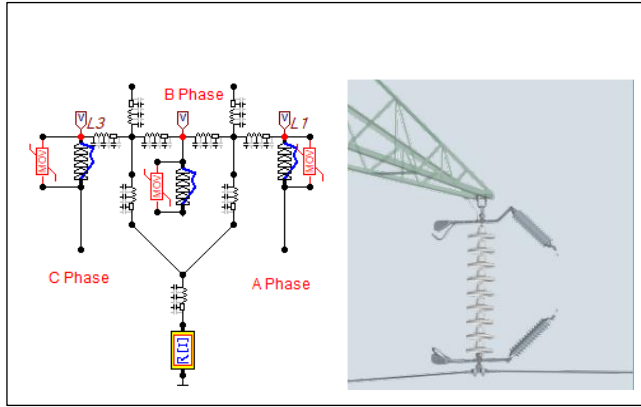
Şekil 4.20. ATP-EMTP’de çatal pilon kule modeli ile iletim hattı modeli

4.3.2.2. Atp-Emtp’de izolator modeli

İzolatorların flashover mekanizması ATP- EMTP’nin MODEL kontrollü blokları ile temsil edilebilir. Volt-zaman karakteristiğinin başlangıç zamanı, YEMD' in faz iletkenine, koruma iletkenine veya direğin tepesine çarptığı an ile senkronize edilmelidir (Anderson J. 1982). Faz iletkenlerine YEMD atlamaları, izolatorlar de belirli olan atlama gerilimini aştığında başlayacaktır.

4.3.2.3. Atp-Emtp’de parafudr modeli

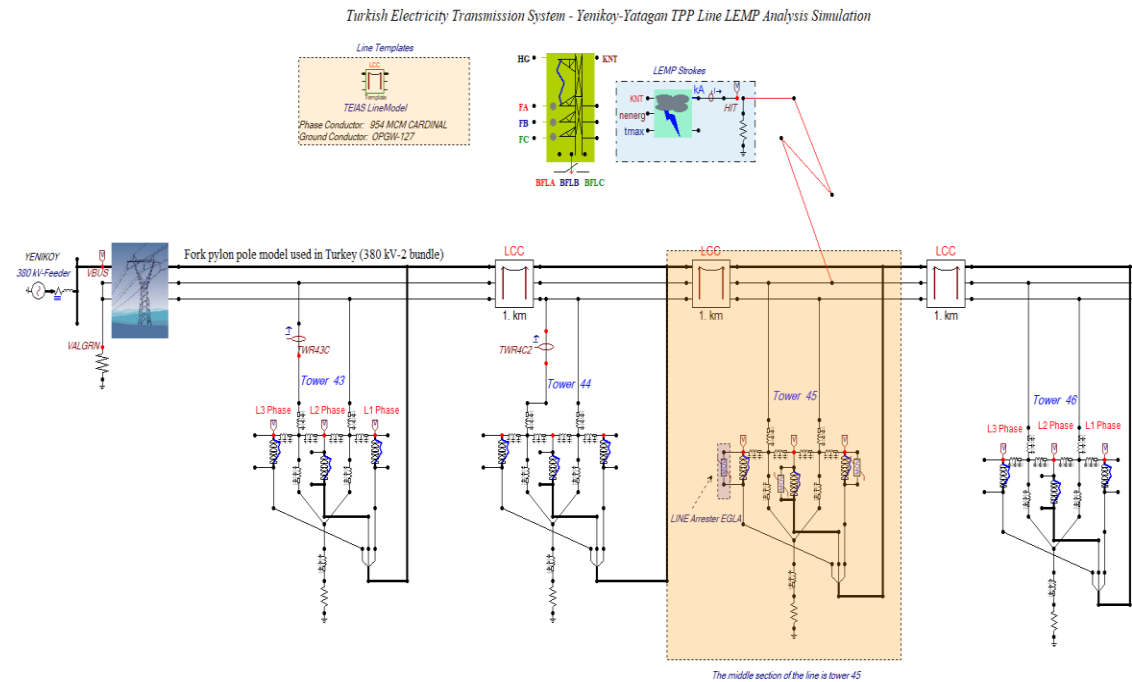
YEMD etkisi bir elektrik tesisine veya enerji iletim hattı üzerine düşerse, bu sistemleri koruyacak yollardan biri de parafudrlardır. Parafudrlar, lineer olmayan direnç yapıları sayesinde bu pik akımların toprağa çekilmesini sağlarlar. Parafudrların çalışma prensibi, normalde her zaman açık konumda olmalarıdır. ATP-EMTP programında, parafudrlar doğrusal olmayan direnç tipi 92 (MOV) ile temsil edilmektedir. Çalışmada kullanılan hat parafudr, şu anda Türkiye’de enerji iletiminde (Yatağan TES-Marmaris-2) deneme amaçlı kullanılan Siemens 3EL-420kV Egla tipi bir hat parafudrudur (Siemens 2024). Bu Egla tipi parafudr, katalog bilgileri temel alınarak ATP-EMTP programında aynen Şekil 4.21’de gösterildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 4.21. ATP-EMTP' de ECLA tipi hat tutucu (parafudr) modeli ile direk modeli

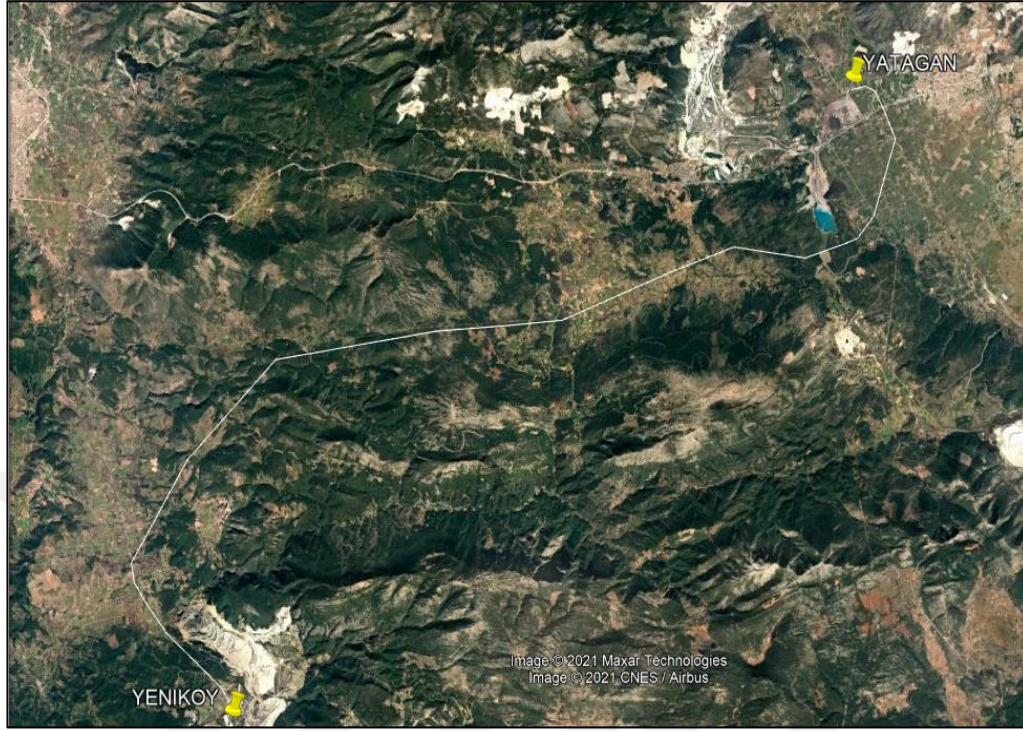
4.3.3. Simülasyon bulguları

Bu çalışmada, Türkiye’de YEMD’e en çok maruz kalan Yatağan-Yeniköy (Muğla-Denizli Bölgesi) hattı incelenmiştir. Bu hattın seçilmesinin nedeni, hattın bulunduğu bölgede YEMD aktivitesinin çok yüksek olmasıdır. Çalışmada seçilen hattın özellikleri; 380 kV gerilimde, 41 km uzunluğunda ve iki demetli (2B-954 MCM) kardinal iletken taşımaktadır (Şekil 4.23). Çalışmada dört farklı senaryo incelenmiştir. İlk durumda, 380 kV gerilimli hattın koruma iletkeni üzerine düşen YEMD’in, L₁, L₂ ve L₃ fazlarına (hat parafudrunun olmadığı) etkisi incelenmiştir. İkinci durumda, aynı bölgeye düşen YEMD’in, düşen direktan itibaren komşu direklerde oluşan L₁, L₂ ve L₃ fazlarına (hat parafudrsuz) etkisi araştırılmıştır. Üçüncü ve dördüncü durumlarda ise hat parafudrunun L₁, L₂ ve L₃ fazları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, dört durum birbiri ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlara göre çözüm önerileri sunulmuştur.



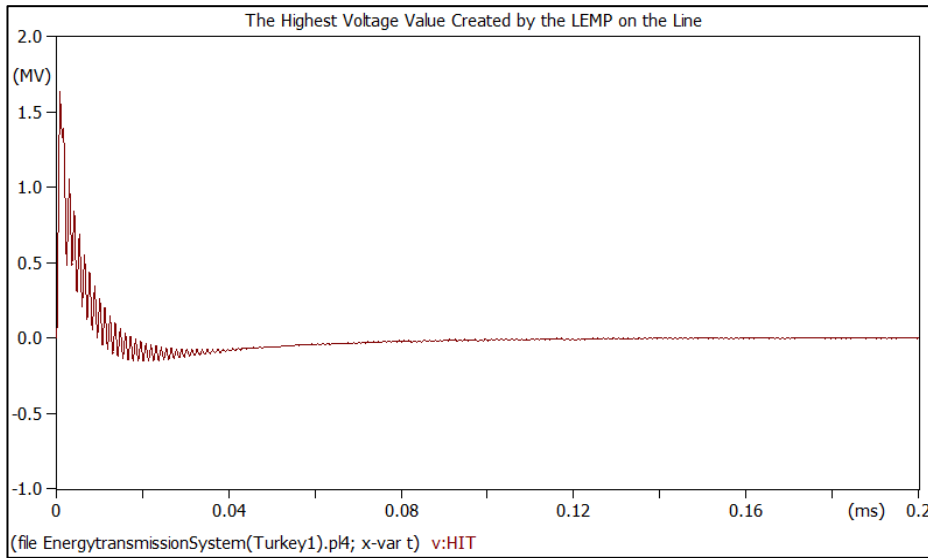
Şekil 4.22. Yeniköy-Yatağan TES 380 kV’lık YG hattı simülasyon modeli

Simülasyonda kullanılan hattın simülasyon modeli Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Bu model ile canlı bir hattın YEMD analizi gerçekleştirilmiştir.



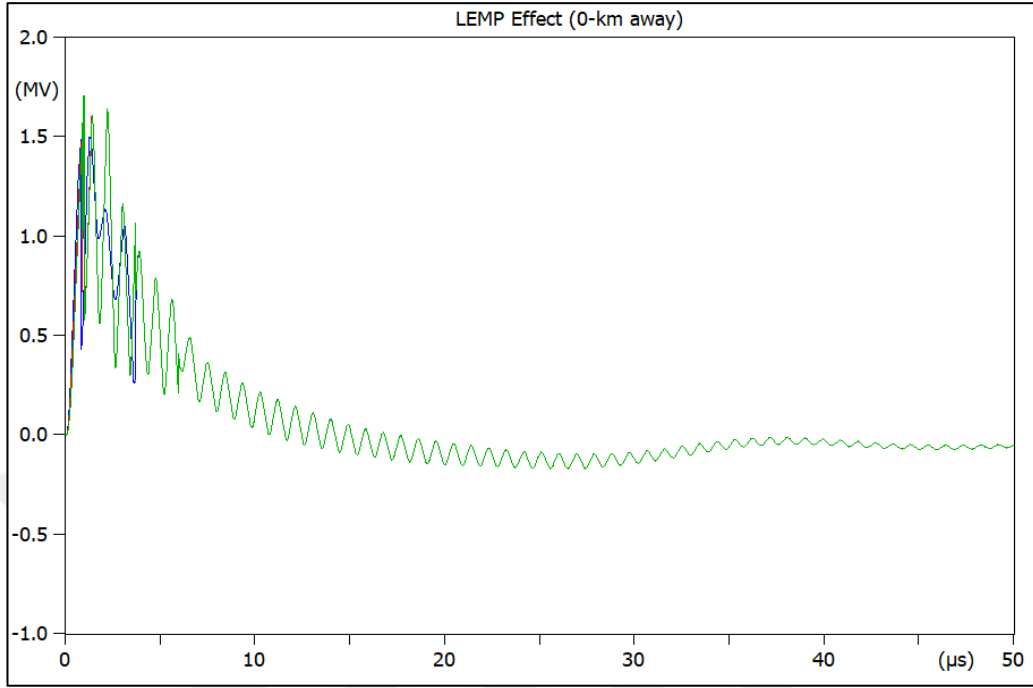
Şekil 4.23. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü

YEMD’in hattın orta kısmına düşmesi durumunda, YEMD dalgası hattın her iki tarafına da neredeyse eşit değerlerle yayılacaktır. Hattın orta kısmına düşmesinin seçilmesinin nedeni, YEMD’in optimum seviyede tüm hat üzerindeki etkisini incelemektir. Simülasyonlar için, bölgedeki en yüksek darbe akımı %1 oranında azaldığı için 50 kA değeri seçilmiştir. Bu değer, Şekil 4.24’te gösterildiği gibi hattın oluşturduğu en yüksek gerilim değeri olan 1.7 MV olarak belirlenmiştir.



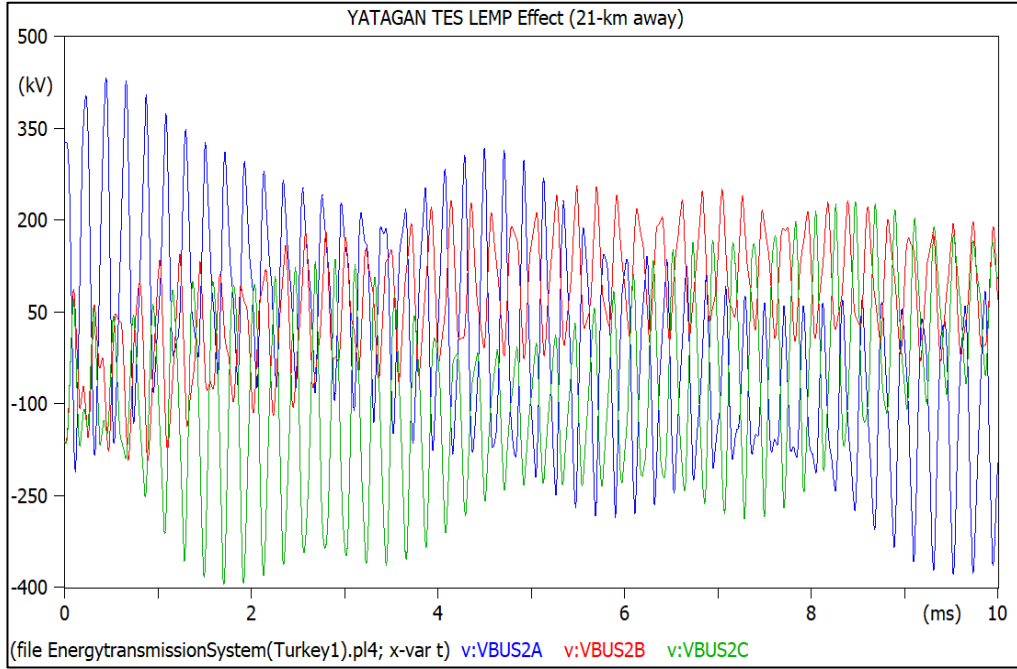
Şekil 4.24. Yeniköy- Yatağan TES YG hattının YEMD geriliminde simülasyon bulgusu

Hattın ortasında bulunan TWR-45 numaralı direkteki izolatörlerin ucunda YEMD'in neden olduğu darbe gerilimi Şekil 4.25'te gösterilmiştir.



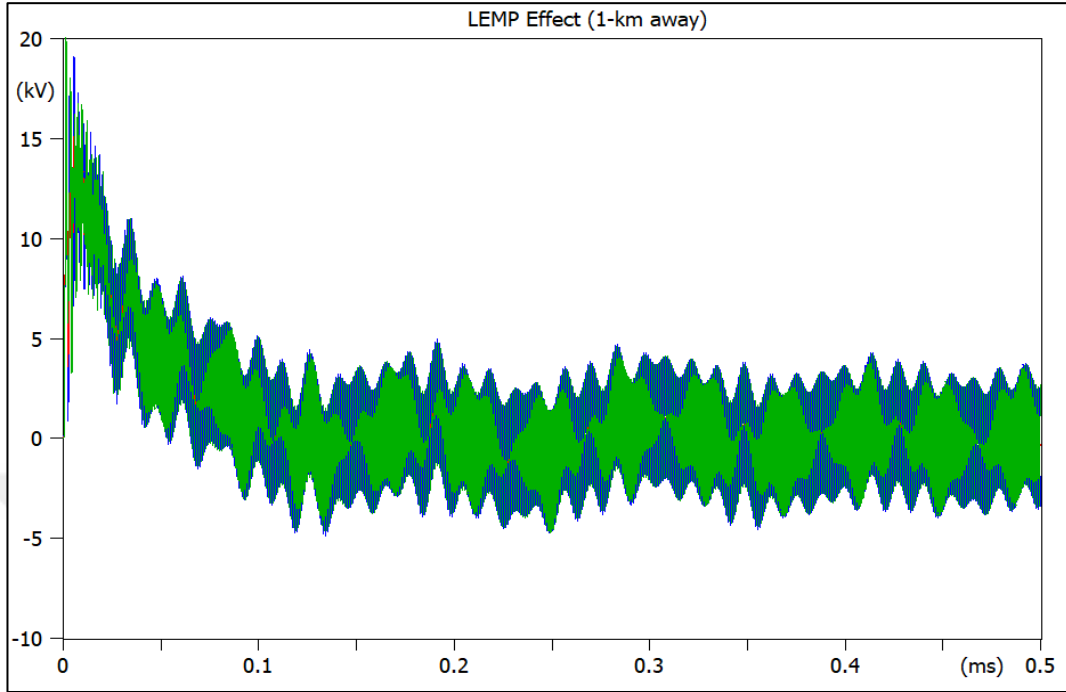
Şekil 4.25. 45 nolu direğe YEMD'in düşmesi sonucu Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu

Bu darbe gerilimi faz iletkenlerinde bile bozulmalara neden olmuştur. Bu durum 21 km uzaklıktaki YATAĞAN-TES'in fiderinde tespit edilmiştir (Şekil 4.26).



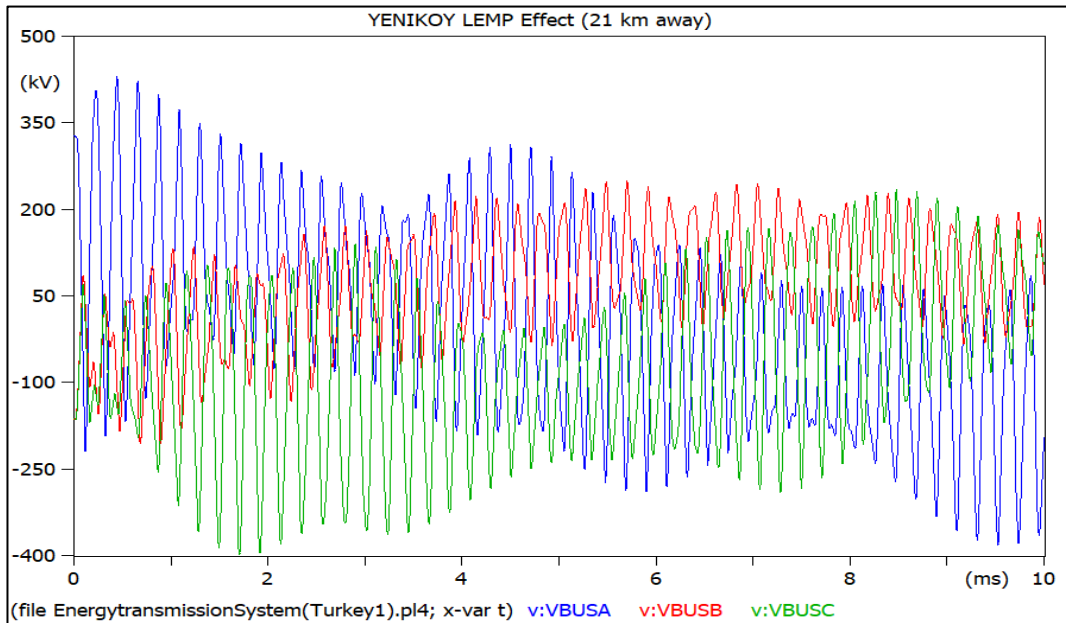
Şekil 4.26. Yatağan TM YEMD etkisinde Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu

Ayrıca YEMD'in düştüğü direğe bir km uzaklıktaki TWR-44 nolu direğinde fazların bulunduğu izolatörlerde oluşan gerilim değerleri ise Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



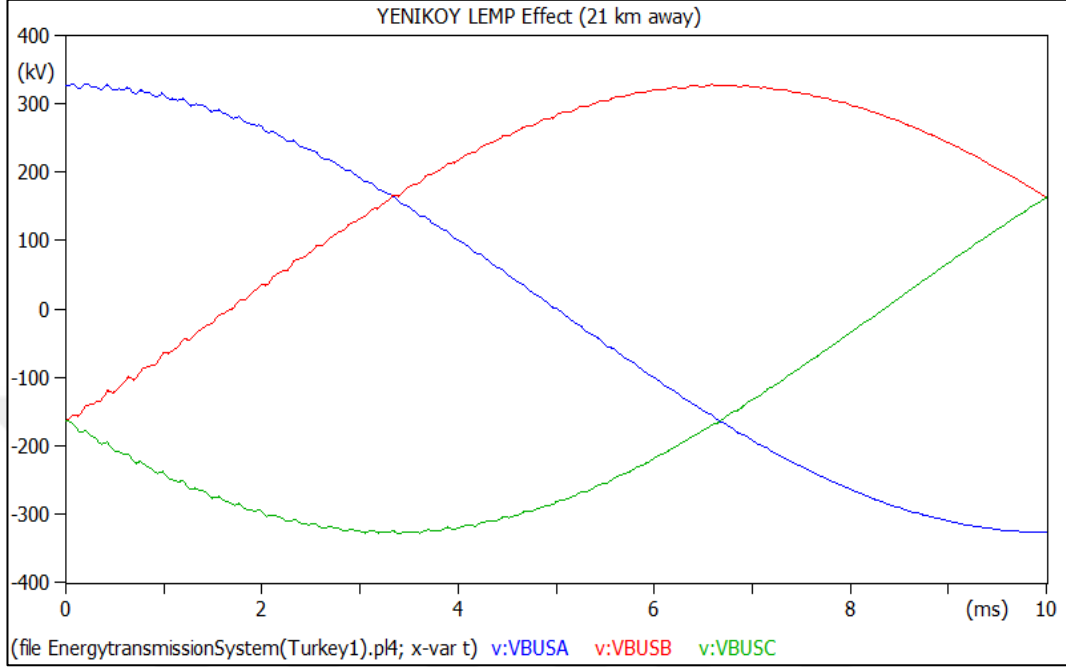
Şekil 4.27. 44 nolu direkte YEMD etkisinde Yeniköy- Yatağan TES YG Hattı simülasyon bulgusu

Ayrıca YEMD'in düştüğü TWR-45'e 21 km uzaklıkta bulunan hattın diğer ucundaki YENİKÖY fiderinde görülen gerilim bozulmaları Şekil 4.28'de gösterilmiştir. Aynı karakteristikte gerilim bozulmaları tespit edilmiştir.



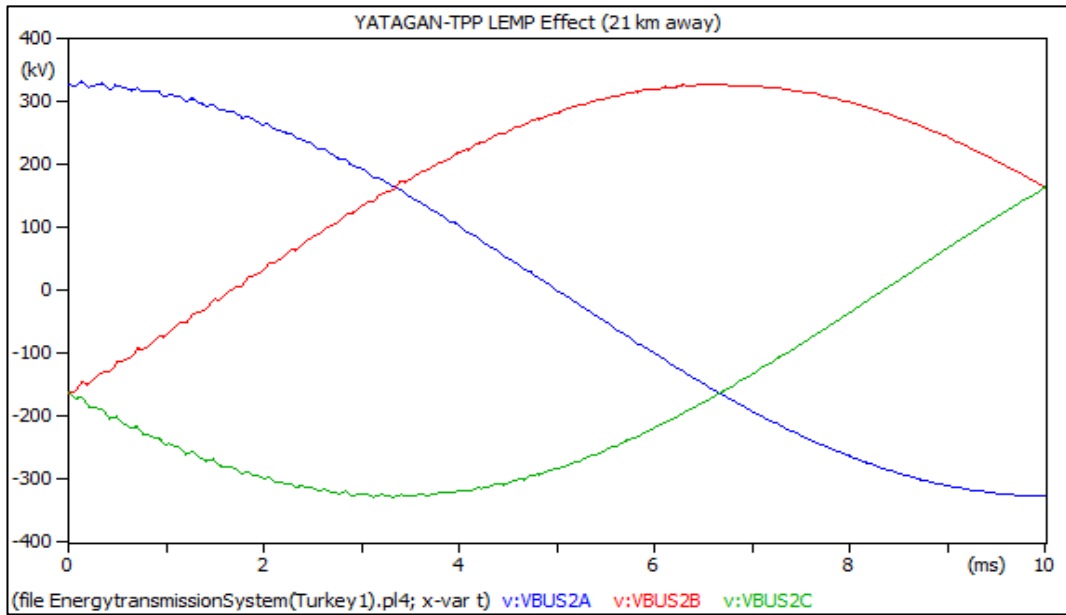
Şekil 4.28. Yeniköy TM YEMD etkisinde Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu

Örneklenen Yeniköy-Yatağan TES hattında koruma amacıyla hat parafudr (Siemens 3EL-420kV Egla tipi) kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucu hat parafudr kullanımının Yeniköy hattında gerilim bozulmalarını minimize ettiğini Şekil 4.29'da ve Şekil 4.30'da göstermektedir.



Şekil 4.29. Yeniköy YEMD etkisinde Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu (Hat parafudrları aktif)

Hat parafudr kullanıldıktan sonra hattın diğer ucu olan YATAĞAN fiderindeki gerilim bozulmalarının minimize edildiği Şekil 4.29'da görülmüştür.



Şekil 4.30. Yatağan YEMD etkisinde Yeniköy-Yatağan TES YG hattının simülasyon bulgusu (Hat parafudrları aktif)

Yaptığımız bu çalışmadaki bulguları bu bölümde özetlemek gerekirse:

Bu çalışmada, Türkiye’de aktif olarak kullanılan Yeniköy-Yatağan TES hattı ATP-EMTP’de modellenmiştir. Ayrıca Yeniköy-Yatağan-TES hattının elemanları birebir gerçek parametreler kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada belirtilen sonuçlar, YEMD’in zararlarından korunmak için YEMD akımının karakteristiklerinin (genlik, etki süresi), doğrudan temel toprak empedansının ve hattın karakteristik empedansının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılan çalışmada YEMD’e bağlı aşırı gerilim akımının büyük bir kısmı topraklama iletkeni üzerinden toprağa aktarılmıştır. Ancak, dalgalanma akımının bir kısmının düşen YEMD tarafından komşu direklerde gerilim oluşturduğu tespit edilmiştir. Hat parafudrlarının kullanımıyla, YEMD kaynaklı aşırı geçici (transient) gerilimlerin etkili bir şekilde bastırıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, iletim hatlarının performansını artırmak için sadece hat parafudrlarının kullanımı yeterli koruma sağlamaz; bu durumda ikincil korumalara da ihtiyaç duyulabilir. İkincil koruma olarak, izolatörlerin darbe dayanım gerilimlerinin artırılması önerilmiştir (örneğin, izolatör dilimlerinin artırılması). Bu çalışmada kullanılan izolatör segmentlerinin her birinin darbe dayanım gerilimi 110 kV olarak belirlenmiştir. Örneklendirilen hat modeli için 18-20 dilimli izolatör yapılarının kullanılmasıyla hattın YEMD’ e karşı başarılı bir şekilde korunduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, enerji iletim hatlarının tasarımında, potansiyel tehlikeli gerilim sıçramalarına karşı uygun izolatör seçiminin son derece kritik olduğu da unutulmamalıdır. Bu çalışmadaki YEMD analizlerinin gerçek bir hat modeli üzerinde yapılarak elde edilen sonuçların, güç iletim sistemlerinde aşırı gerilimlere karşı koruma ve izolasyon seviyelerinin belirlenmesine önemli katkılar sağlayabileceği belirtilmektedir.

4.4. Topraklamanın iyileştirilmesi ile Yıldırım Elektromanyetik Darbelerine Karşı Koruma: Gerçekçi Yüksek Gerilim Güç Hattı Bölgesi İçin Bir Simülasyon Çalışması

Bu çalışmada, enerji iletim hatlarındaki topraklama iyileştirme işine ait özel teknik şartname incelenmiştir. Bu kapsamda, topraklama iyileştirmesi yapılacak hatların açma sayıları, MGM’den alınan yıldırım yoğunluğu ve akım genlikleri değerlendirilmiş, ardından bu hatlar simüle edilmiştir. Bilgisayar ortamında yapılan bu analizlerde, hatlarda yaklaşık kaç açma olacağının tahmin edilmesi ve yapılacak topraklama iyileştirme çalışması sonrasında hattın YEMD kaynaklı açmalarındaki iyileştirme oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma da gerçek bir enerji iletim hattı olan Isparta (Keçiborlu)-Burdur iletim hattı, ATP-EMTP ve CDEGS ile simüle edilmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmanın temel hedefi, topraklama iyileştirmesinin can güvenliği ve arz güvenliği açısından katkılarını ve fayda-maliyet esasına göre nasıl uygulanması gerektiğini değerlendirmek ve bu doğrultuda incelemeler ve öneriler sunmaktır. Bu çalışma da ayrıca Sn. Mustafa TAŞÇI’ya katkılarından dolayı teşekkür ediyorum.

4.4.1. Teorik analiz ve bulgu literatürü

Tez çalışmasında teorik tarafı üçüncü bölümde detaylı anlatılmıştır. Bu bölüme özgü literatüre baktığımızda Ground Flash Density (GFD) yani YEMD yoğunluğu yüksek olan ve YEMD kaynaklı açmaların yaşandığı bölgelerde yapılan her iyileştirme, YEMD kaynaklı açma sayısını azaltacaktır. Bir YEMD akımının direkte açma yaptırabilmesi için direkte oluşan gerilimin izolatör uçlarından atlayabilecek büyüklükte olması gerekmektedir. Bu bağlamda dört önemli husus bulunmaktadır:

- YEMD akım genliği
- Direğin karakteristik empedansı
- İzolatör ark boynuzları mesafesi (en yakın faz-toprak mesafesi)
- Direğin toprak geçiş direnci

Bu faktörler, YEMD akımının enerji iletim hatları üzerindeki etkisini belirlemede kritik öneme sahiptir ve her biri iyileştirme stratejilerinde dikkate alınmalıdır. YEMD akımını değiştiremeyeceğimizden, geriye kalan üç hususa odaklanmamız gerekmektedir. Direğin karakteristik empedansı, direğin geometrisiyle ilgilidir ve bu değeri değiştirmek için yeni direkler inşa edilmelidir. İzolatör boyunu artırmak ise oldukça etkili bir yöntemdir. Yaklaşık 14 cm uzatma, 80 kV gibi bir katkı sağlar ve bu da yaklaşık %15 oranında YEMD'in izolatörden atlamasını azaltır. Ancak, yaklaşım mesafelerinden dolayı izolatör boylarını bazı direklerde artıramamaktayız. Geriye toprak geçiş direnci iyileştirmesi kalmaktadır. Bu nedenle, toprak iyileştirme uygulamaları yapılması bu durumda zorunlu hale gelmektedir. Ancak, tüm direklere ekstra dört kazık çakınca toprak geçiş direncinin 10 ohm'un altına düşürüleceği beklentisi yanlıştır. (Sahalar da yapılan inceleme neticesi)

4.4.2. Bulgu değerlendirilmesi

İletim hattı direklerinde istenilen topraklama değerlerine ulaşabilmek için, direğin her iki tarafında 1m kazı yapılarak yatay iletken (counterpoise) serilmelidir. Bu iletken, örgü iletken ile birleştirilmeli ve toprak özgül direnci düşük kum döküldüğünde toprak iyileştirmesi istenilen sonuçlara ulaşacaktır. Aksi takdirde, sadece kazık çakmakla istenilen değerlere ulaşmak mümkün olmayacaktır. Elbette, kazık çakmak topraklamayı iyileştirecektir, ancak yüksek gerilim direklerinde yatay iletkenlerin kullanılması, topraklama değerlerinin düşürülmesinde çok daha etkili olacaktır. Bu bölgenin karakteristik olarak GFD değerleri yüksek olmasına karşın açma sayıları düşük görülmüştür. Bunun sebepleri;

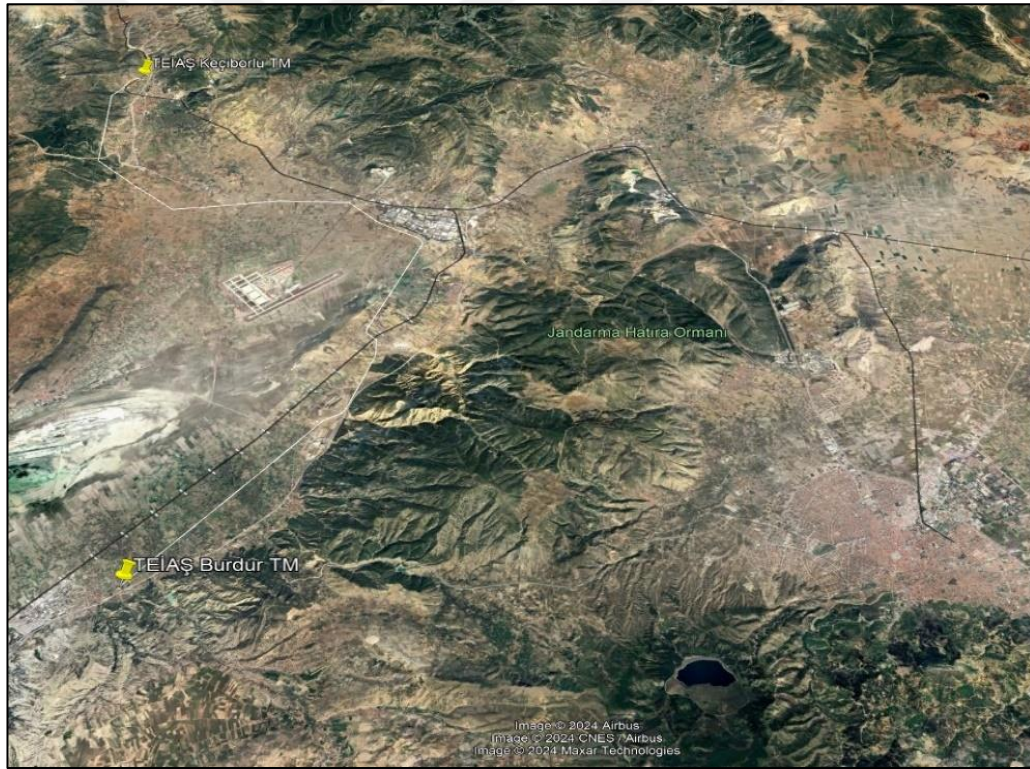
- Tek devre hatlarda çift toprak teli kullanımı, toprak teli dalga empedansını düşürdüğü için direklerle akan YEMD akımı azalmakta, dolayısıyla direklerde oluşan gerilimler izolatör üzerinden atlayacak seviyeye çıkmamaktadır. Bu durum, faz-toprak arızalarının önlenmesine de katkıda bulunmaktadır. Ayrıca, kısa devre akım dağılımı incelendiğinde, toprak telinden trafo merkezine dönen akım daha fazla olduğu için topraktan dönen akım azalmaktadır. Bu sayede, kısa devre esnasında direkte oluşan gerilim düşmekte ve adım ile dokunma gerilimleri azalmaktadır.
- Direk boylarının küçük olması, direğe YEMD çarpma olasılığını azaltmakta ve böylece YEMD kaynaklı açma sayıları istatistiksel olarak düşük kalmaktadır.
- YEMD yoğunluğunun fazla ancak YEMD akım genliklerinin düşük olduğu da gözlemlenmiştir. Bu durum, izolatörden atlayabilmesi için gereken gerilimi oluşturan unsurlardan biri olan YEMD genliğinin düşük olması nedeniyle, yüksek toprak geçiş direncine sahip direğe çarpan küçük YEMD genliklerinin bile izolatörden atlayabilmesine yol açmaktadır.

Bu üç nedenden dolayı, GFD değeri ve topraklama değerleri yüksek olmasına rağmen, YEMD kaynaklı açma sayıları düşük kalmaktadır. Buna ilaveten YEMD akımı direğe veya koruma iletkenine çarptığında, direkte oluşacak gerilim izolatör üzerinden faza atladığında bu duruma "Geri Atlama" (Back Flashover) denir. Ancak YEMD akımı doğrudan faz iletkenine de çarpabilir. Faz iletkeni dalga empedansı ile YEMD akımı

birleştiğinde oluşacak gerilim çok yüksek olacağı için düşük YEMD akımlarında bile atlama (Flashover) gerçekleşir. Ancak bu atlama türü, geri atlama kadar yaygın değildir. Literatür ve analizler, topraklama ile ilişkili olan geri atlamanın üzerinde daha fazla düşünülmesi ve çalışılması gereken bir atlama türü olduğunu göstermektedir. Faz iletkenine YEMD çarpmasını engellemenin en iyi yolu, koruma iletkeni açısını daraltmaktır; yani koruma iletkeni ve fazlar arasındaki açığı küçültmektir. Hem Flashover hem de Back Flashover'ı azaltmanın en etkili yolu ise çift koruma iletkeni kullanmaktır.

4.4.3. Simülasyon bulguları

Bu çalışma, Burdur – Keçiborlu Enerji İletim Hattı üzerindeki YEMD performansını incelemektedir. Hattın toplam uzunluğu 33 km olup, 110 adet direk bulunmaktadır (Şekil 4.31). Hattın 2020 ve 2023 yıllarına ait Ground Flash Density (GFD) değerleri sırasıyla 3.82 ve 4.47 olarak ölçülmüştür, ki bu değerler oldukça yüksektir. Direklerin topraklama değerlerine baktığımızda, 20 ohm'un üzerinde 41 adet direk bulunmaktadır. Özellikle 166, 196 ve 650 ohm gibi yüksek geçiş direncine sahip direkler dikkat çekmektedir. 2015 yılında ise hattın 7 açma yaptığı, ancak 2018 yılında hiç açma yaşanmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.31. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü

Bu yüksek GFD değerine ve yüksek toprak geçiş direncine rağmen, hattın açma sayılarının düşük olmasının nedenleri şunlardır:

- Araziye düşen YEMD genliklerinin küçük olması,
- Direk boylarının küçük olması dolayısıyla hatta YEMD düşme oranının az olması,
- Çift koruma teli olan direkler nedeniyle, direklerde oluşacak gerilimlerin az olması.

Öncelikle, 2023 yılı GFD değeri ve topraklama değerlerini kullanarak hattın YEMD performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, hattın mevcut durumunu anlamak ve YEMD kaynaklı sorunları minimize etmek için yapılmıştır.

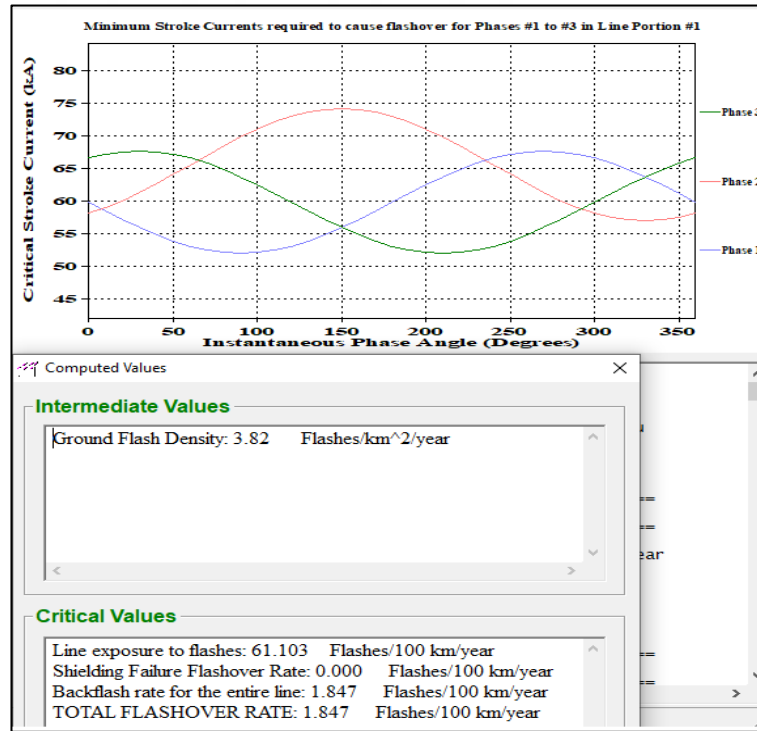
4.4.3.1. İletim hattının topraklama değerlerine göre açma sayısı ve minimum akım etkisi

İletim hattındaki direklerde ölçülen ve bize verilen topraklama değerleri ve Direk Tipi Listesi (DTL) kullanılarak yapılan analiz, hattın YEMD performansını değerlendirmektedir. Bu analiz, çeşitli parametrelerin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilir:

- Kullanılan Direk Tipleri: Hattın üzerinde bulunan farklı direk tipleri analiz edilerek, her bir direğin özellikleri belirlenir.
- Direk Boyları: Her bir direğin yüksekliği, YEMD çarpma olasılığını ve oluşacak gerilim değerlerini etkiler.
- İzolatör Boyları: İzolatörlerin uzunluğu, faz-toprak arası yalıtım seviyesini belirler ve dolayısıyla geri atlama (Back flashover) riskini azaltır.
- Ortalama İki Direk Arası Mesafe: Direkler arasındaki mesafe, hattın mekanik ve elektriksel davranışını etkiler.

Bu parametreler, YEMD performans analizinin temelini oluşturur. Özellikle yüksek GFD değerine sahip olan bölgelerde, bu tür ayrıntılı analizler, hattın güvenilirliğini ve YEMD karşı direncini artırmak için kritik öneme sahiptir.

Analiz sonuçları, topraklama değerlerinin ve diğer parametrelerin optimize edilmesiyle YEMD kaynaklı açmaların azaltılmasına yönelik stratejiler geliştirmemize olanak tanır.

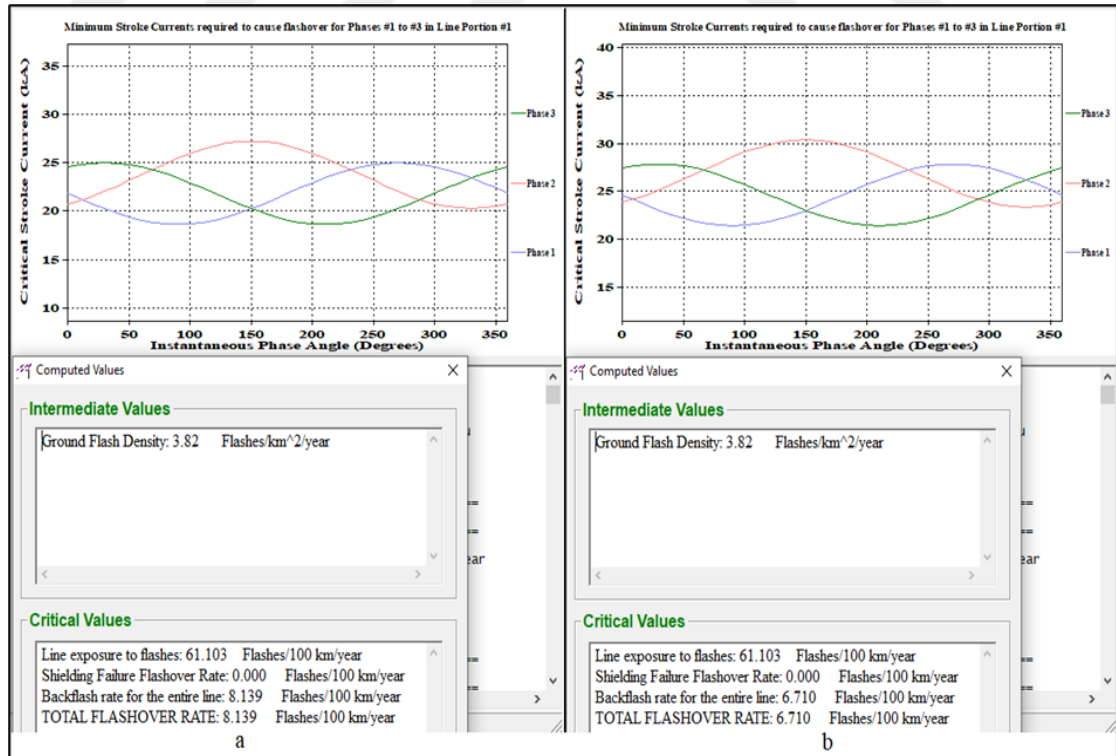


Şekil 4.32. Keçiörlü TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinde topraklama iyileştirmesi ile 10 ohm'a düşürülmesi sonucu

Bu kapsamda, mevcut topraklama iyileştirme çalışmaları, izolatör boylarının artırılması ve çift koruma teli kullanımı gibi önlemler değerlendirilir. Bu veriler ışığında, bu hat için hattın toplam açma sayısı 100 km başına 6.71 olarak hesaplanmıştır. Topraklamanın en kötü olduğu direklerde, direğe yaklaşık 21 kA şiddetinde bir YEMD çarptığında izolatör üzerinden atlama meydana gelebileceği öngörülmektedir. Bu hesaplamalar doğrultusunda, hattın uzunluğu 33 km olduğundan, YEMD kaynaklı yıllık açma sayısının 2.24 olacağı tahmin edilmektedir. Bu, hattın YEMD'den dolayı yılda yaklaşık 2 kez açma yapacağını veya daha kesin bir tahminle 10 yılda 22 kez açma yapabileceğini göstermektedir. Bu veriler, hattın YEMD performansını değerlendirmede önemli bir rol oynar ve topraklama iyileştirmeleri ile ilgili stratejik kararlar alınmasına yardımcı olur. Şekil 4.32'deki verilere göre, toplam açma sayısı 100 km başına 1.84 olarak hesaplanmıştır. Topraklamanın en kötü olduğu direklerde, direğe yaklaşık 52 kA şiddetinde bir YEMD çarptığında izolatör üzerinden atlama meydana gelebileceği öngörülmektedir. Hattın uzunluğu 33 km olduğundan, YEMD kaynaklı yıllık açma sayısının 0.62 olacağı tahmin edilmektedir. Bu, hattın YEMD'den dolayı yılda yaklaşık 0.62 kez açma yapacağını veya daha kesin bir tahminle 10 yılda 6 kez açma yapabileceğini göstermektedir. Bu veriler, hattın YEMD performansını değerlendirmede önemli bir rol oynar ve topraklama iyileştirmeleri ile ilgili stratejik kararlar alınmasına yardımcı olur.

4.4.3.2. İletim hattında izolatör etkisi

İzolatör boyunun açma sayısına etkisini değerlendirmek amacıyla izolatör boyunu iki farklı değer olarak 1.21 m ve 1.35 m olarak aldık. Bu değerler toplam izolatör boyunu değil, faz-toprak mesafesini belirtmektedir.

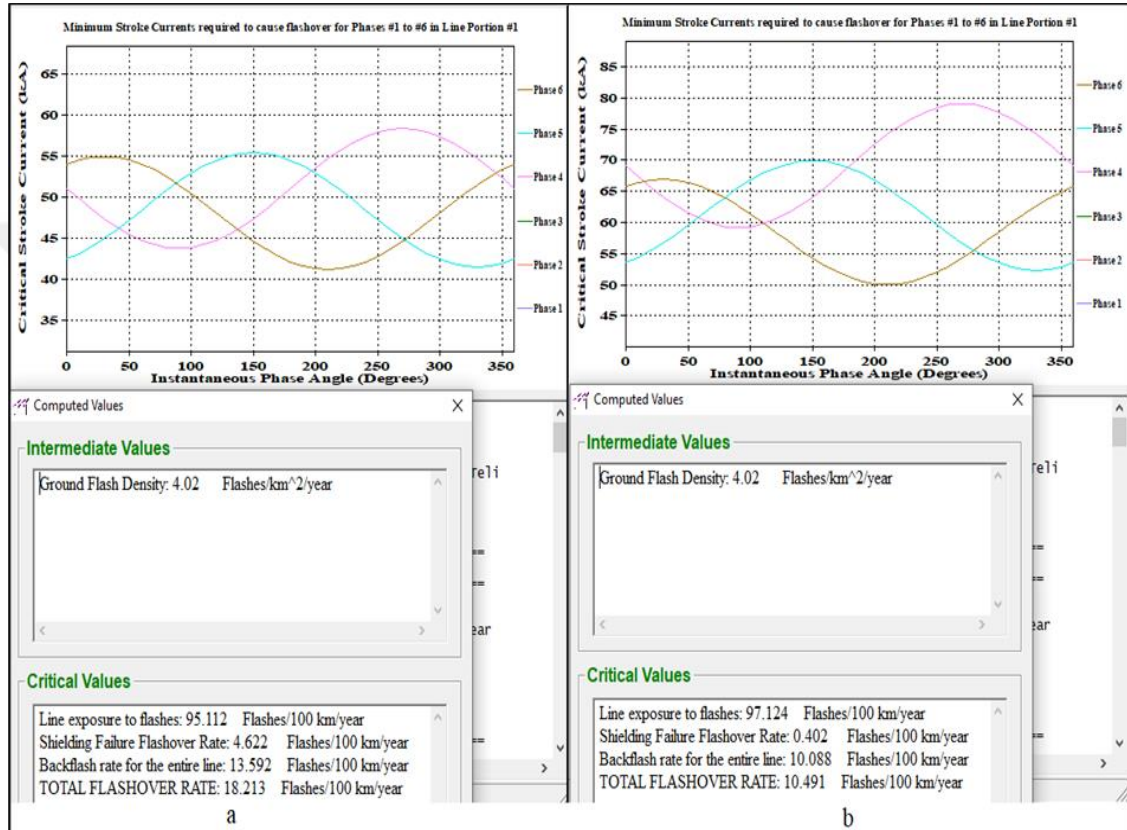


Şekil 4.33. Keçiborlu TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinde izolatör boyu a) İzolatör boyu 1.21m b) İzolatör boyu 1.35m olması durumu

Şekil 4.33'teki verilere göre izolatör boyunu artırmak, YEMD kaynaklı açmaları azaltmada etkili bir yöntemdir.

4.4.3.3. İletim hattında koruma iletkeni sayısının etkisi

Bu hatta, 2FA tipi direğin; Shielding Failure (Koruma Açısı Kaynaklı Açmalar) veya diğer bilinen adı ile Flashover (Atlama) ve Back Flashover (Geri Atlama) kaynaklı açma oranları ve toplam oran verilmiştir. Burada bilindiği üzere Tek Koruma İletkeni mevcuttur.



Şekil 4.34. Keçiörlü TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinde koruma iletkeni durumu **a)** Bir adet koruma iletkeni kullanılması **b)** İki adet koruma iletkeni kullanılması

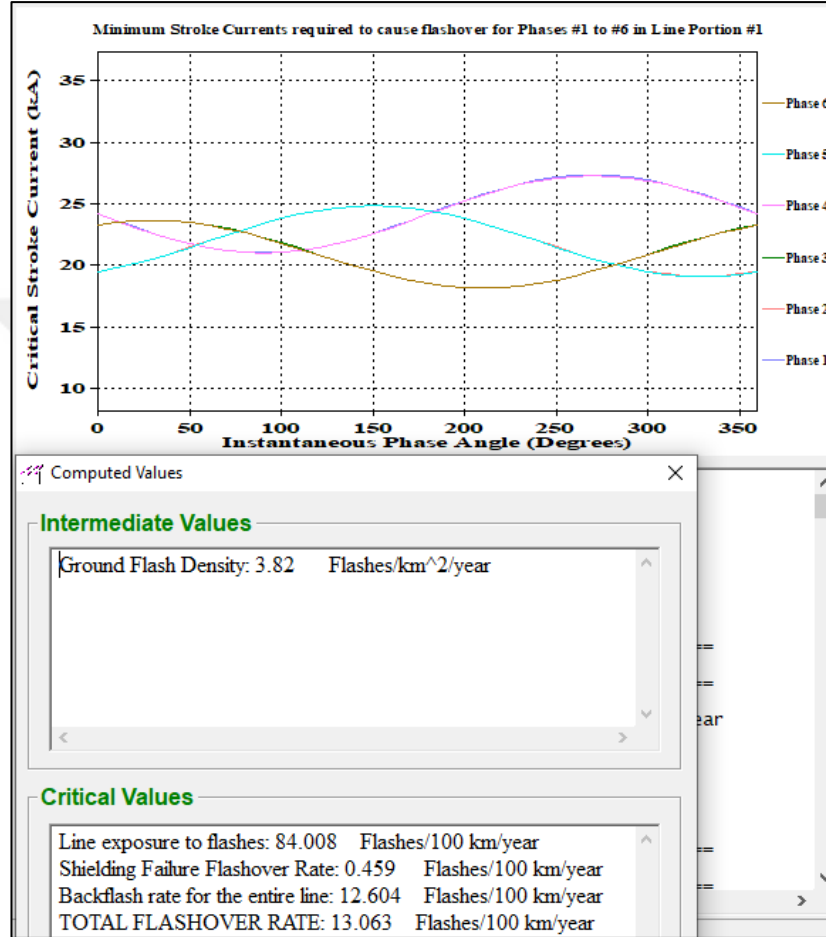
Şekil 4.34'te görüldüğü üzere, koruma iletkeni sayısını artırmak sonucunda hem Shielding Failure hem de Back Flashover oranları azalmıştır. Toplam açma sayısı 18.2'den 10.5'e düşmüştür, bu da iyileştirme oranının %42 olduğunu göstermektedir. Örneğin, bu bölgenin topraklama değerlerini de yarıya indirdiğimizde, açma oranı 5.66 olacak ve iyileştirme oranı %68 olacaktır.

4.4.3.4. İletim hattında direk yüksekliğinin etkisi

Eğer Burdur-Keçiörlü hattı çift devreli ve tek koruma teline sahip olsaydı, açma sayıları bu kadar düşük olmayacaktı. Ayrıca, hattın 1272-MCM 2FA tipi direklerle donatılmış olması durumunda, açma sayılarının artması beklenirdi. Şekil 4.35'te bu durum da gösterilmeye çalışılmıştır.

Direklerde iyileştirme yaparak topraklama değerlerini 10 ohm'a düşürdüğümüzde bile, açma sayısı/100 km oranı 13 olarak hesaplanmaktadır. 33 km uzunluğundaki hat için bu oran 4.33 olacaktır.

Bu durumda, 10 yılda yaklaşık 43 açma meydana gelmesi öngörülmektedir. Şu anki durumda, arazide kullanılan direklerin çift toprak teline sahip olması ve direk boylarının küçük olması nedeniyle açma sayıları düşük kalmaktadır.



Şekil 4.35. Keçiörlü TM-Budur TM arasında bulunan EİH'nin direklerinin tipi değişmesi durumu

Bu çalışma sayesinde, topraklama iyileştirmeleri, YEMD kaynaklı açmaları azaltacaktır; ancak, bu iyileştirmeleri fayda-maliyet açısından değerlendirerek sadece gerekli yerlerde ve gerektiği kadar uygulama yapmak israfı önleyecektir. Özellikle 154 kV çift devre bir hattın tek toprak teli olduğu durumlarda, yapılacak her iyileştirme açma sayısını önemli ölçüde azaltacaktır. YEMD yoğunluğunun yüksek ve YEMD akım genliğinin büyük olduğu hatlarda, yüksek direklerin kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Bununla birlikte, eğer hattın YEMD kaynaklı açma sayısı düşürülürse ve hat oldukça eskiyse, topraklama iyileştirmeleri konusunda dikkatli bir değerlendirme yapılması gerekmektedir.

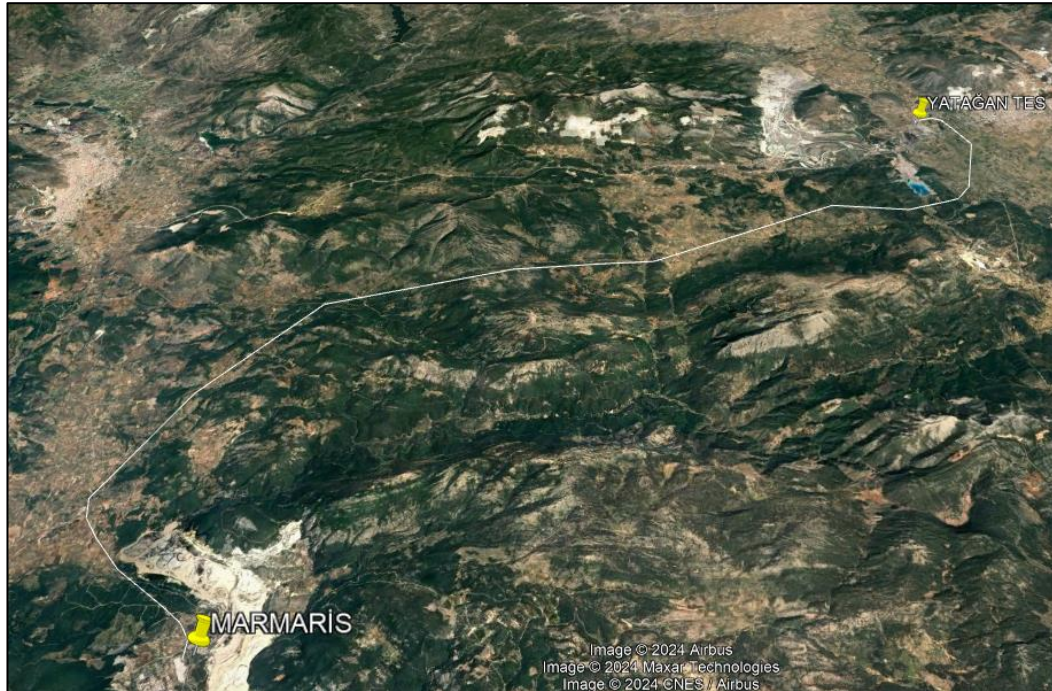
Topraklama değerlerini düşürmek için yatay iletkenler kullanmak gerekmektedir. Bu bağlamda iki yaygın yöntemden biri, direğin etrafına çelik iletkenler serilerek oluşturulan

halka sistemidir. Bu yöntemde, çelik iletkenler direğin etrafında bir halka oluşturacak şekilde döşenir ve bu iletkenler ayaklarla irtibatlandırılır. Diğer bir yöntem ise Counterpoise uygulamasıdır; burada direktten hat yönünde yatay iletkenler serilir ve bu iletkenler çelik örgü ile birleştirilir. Bu yöntemler, topraklama direncini azaltarak, topraklama sisteminin etkinliğini artırır.

Hatlarda yapılacak topraklama iyileştirmelerini yalnızca kazık kullanımı ile sınırlı tutmamak gerekir; yatay iletken uygulamaları da göz önünde bulundurulmalıdır. İlgili şartnamelerde bu tür uygulamaların belirtilmesi önemlidir. Yalnızca bentonit dökerek yapılan topraklama iyileştirmeleri, yağmur suyunun etkisiyle zamanla etkisini yitirebilir ve yüksek toprak geçiş dirençleri yeniden ortaya çıkabilir. Bu nedenle, topraklama sistemlerinin etkinliğini artırmak için yatay iletkenlerin de kullanılması gerekmektedir.

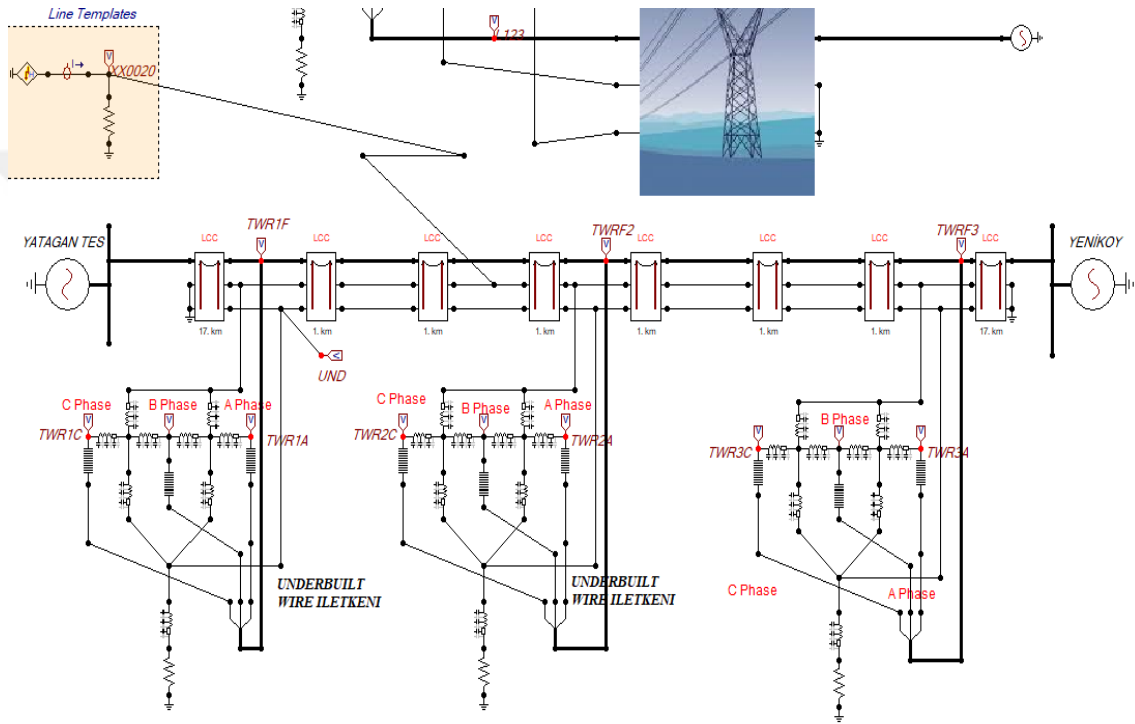
4.5. 400 kV Elektrik İletim Sisteminde YEMD' e Karşı Yeni Bir Koruma Yöntemi Olan Underbuilt Wire Yapısının Gerçek Bir Hat için Modellenmesi

Çalışmada YEMD için önemli bir değer olan topraklama direnç değerleri incelenen hatta bulunan tüm direkler için sahada tespit edilmiştir. Simülasyona gelince, elektrik güç sisteminin elemanlarını modellemek için alternatif bir geçici program (ATP) ortamı kullanılmıştır. ATP, geçici olayları simüle etmek için güçlü bir araca sahiptir: özellikle, hata zaman alanında ayrıntılı dalga biçimleri oluşturur. ATP-EMTP yazılımı kullanılarak, gerçekte bulunan Yatağan-Yeniköy 400 kV tek devreli havai iletim hattının YEMD' den korunmasında yeni bir korunma metodu önerilmiş ve katkısı araştırılmıştır. Buna ilaveten literatürdeki modellerle karşılaştırılmış, hat parafuduru - alt topraklama kablosu (underbuilt ground wire (UGW)) matematiksel modellemesi tespit edilerek bu bölgedeki enerji nakil hatlarının YEMD arızalarına karşı iyileştirilmesi için simülasyonlara dayalı çözüm önerilerinde bulunulmuştur. Şekil 4.36'da simüle edilen gerçek hattın uydu görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 4.36. Çalışmada simüle edilen enerji iletim hattının gerçek uydu görüntüsü

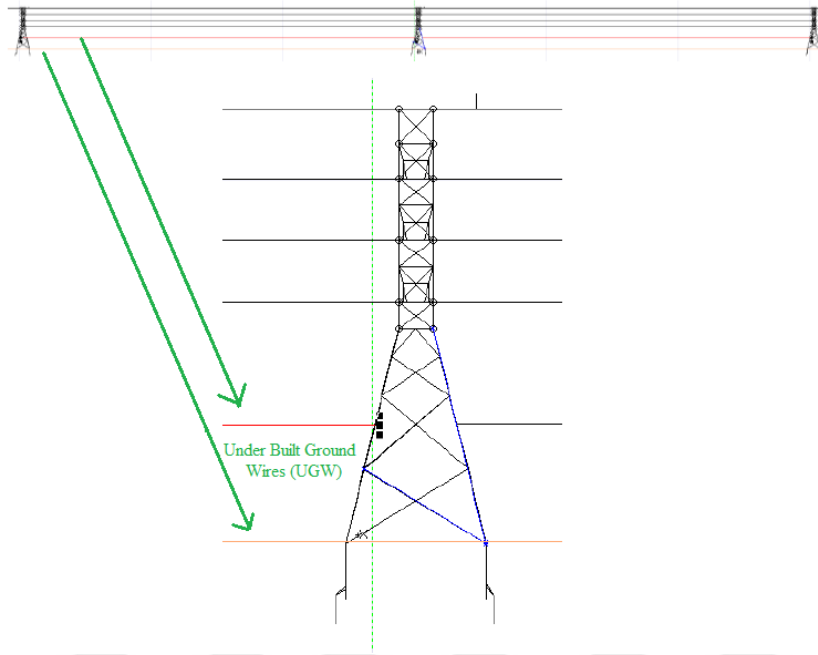
Çalışmada YEMD için önemli bir değer olan topraklama direnç değerleri incelenen hatta bulunan tüm direkler için sahada tespit edilmiştir. Simülasyona gelince, elektrik güç sisteminin elemanlarını modellemek için alternatif bir geçici program (ATP) ortamı kullanılmıştır. ATP, geçici olayları simüle etmek için güçlü bir araca sahiptir: özellikle, hata zaman alanında ayrıntılı dalga biçimleri oluşturur. ATP-EMTP yazılımı kullanılarak, gerçekte bulunan Yatağan-Yeniköy 400 kV tek devreli havai iletim hattının YEMD' den korunmasında yeni bir korunma metodu önerilmiş ve katkısı araştırılmıştır. Buna ilaveten literatürdeki modellerle karşılaştırılmış, hat parafuduru - alt topraklama kablosu (underbuilt ground wire (UGW)) matematiksel modellemesi tespit edilerek bu bölgedeki enerji nakil hatlarının YEMD arızalarına karşı iyileştirilmesi için simülasyonlara dayalı çözüm önerilerinde bulunulmuştur.



Şekil 4.37. Yeniköy-Yatağan TES 400 kV YG hattı simülasyon modeli

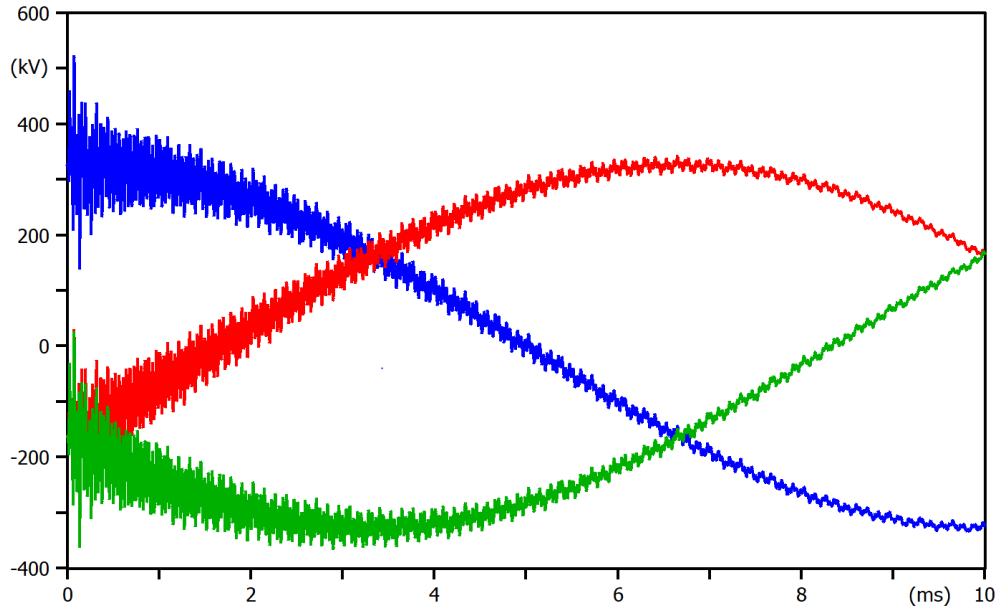
Şekil 4.38'de ise YEMD bloğunun hatta eklenmiş halinde gösterilmiştir. YEMD bloğunun içerisindeki YEMD'in akım büyüklüğü 50 kA olarak seçilmiştir. Topraklama kablosunun hattın faz kablosuna paralel ve en düşük faz iletkeninin altına döşenmesi aslında UGW kullanmanın prensibidir. UGW, ekranlama telleri gibi faz iletkenlerini korumaz, ancak sadece faz iletkenleri ile kuplaj faktörünü artırır, bu nedenle TL'nin izolasyonlarındaki gerilimi azaltır (A. R. Hileman 1999, S. Visacro vd. 2012, N. Ninh vd. 2017).

Bu uygulamada, yüksek topraklama değerine sahip olan direğin yanındaki iki direkle faz altından çelik iletken aracılığıyla irtibatı sağlanmıştır (Şekil 3.24). Bu yöntemle YEMD akımının diğer direklere daha fazla iletilerek direkte oluşan gerilimin azaltılması hedeflenmiştir. Şekil 4.38'de Underbuilt ground wire (UGW) yapısının detaylı direk yapısı da gösterilmiştir.



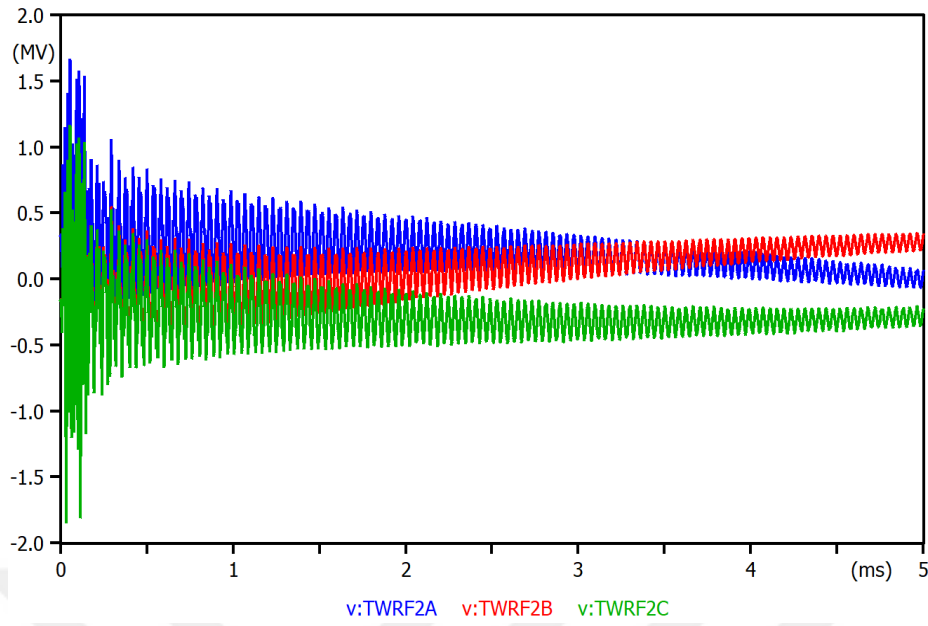
Şekil 4.38. Underbuilt Ground Wires yapısının detaylı bağlantı şeması

4.5.1. Simülasyon bulguları



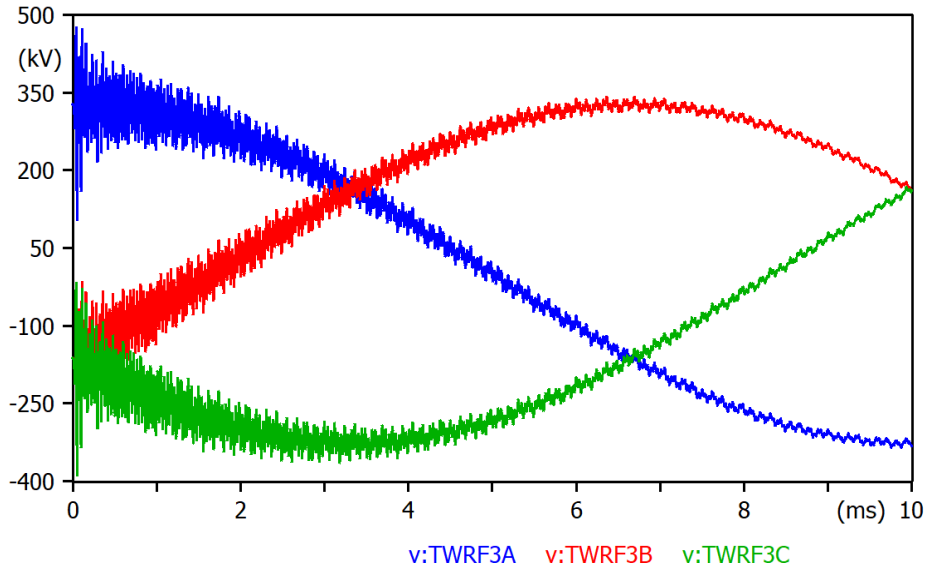
Şekil 4.39. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 19 km gerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim

Şekil 4.37'de modellenen hat analizinde YEMD büyüklüğü 30 kA seçilmiştir. Hattın ortasına (koruma iletkenine düşen) düşen YEMD, hattın iki tarafına yayılmaya başlamıştır. Düşen noktadan 19 km gerisinde fazlar üzerinde indüklenen gerilim Şekil 4.39'da gösterilmiştir.



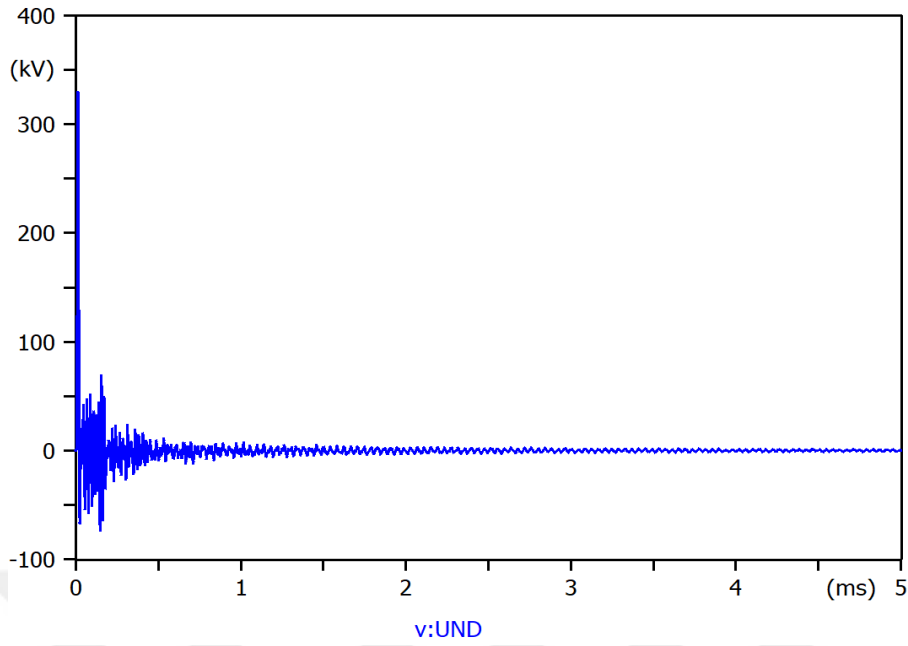
Şekil 4.40. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 1 km ilerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim

Hattın ortasına düşen YEMD, hattın iki tarafına yayılmaya başlamıştır. Düşen noktadan 1 km ilerisinde fazlar üzerinde indüklenen gerilim Şekil 4.40'ta gösterilmiştir.



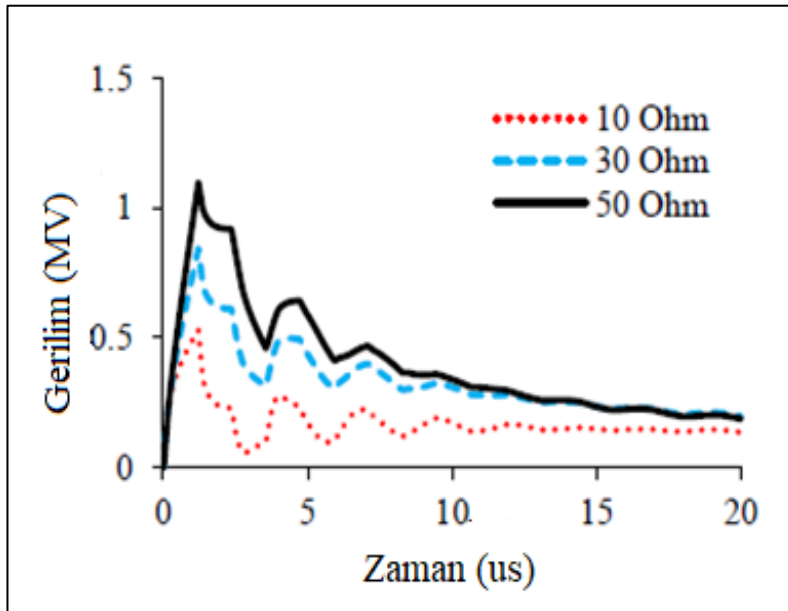
Şekil 4.41. YEMD darbesinin düştüğü bölgeden 21 km ilerisinde fazlar üzerindeki indüklenen gerilim

Hattın ortasına düşen YEMD, hattın iki tarafına yayılmaya başlamıştır. Düşen noktadan 21 km ilerisinde fazlar üzerinde indüklenen gerilim Şekil 4.41'de gösterilmiştir. Şekil 4.42 de ise YEMD'in UGW iletkeninde oluşturduğu gerilim gösterilmiştir.



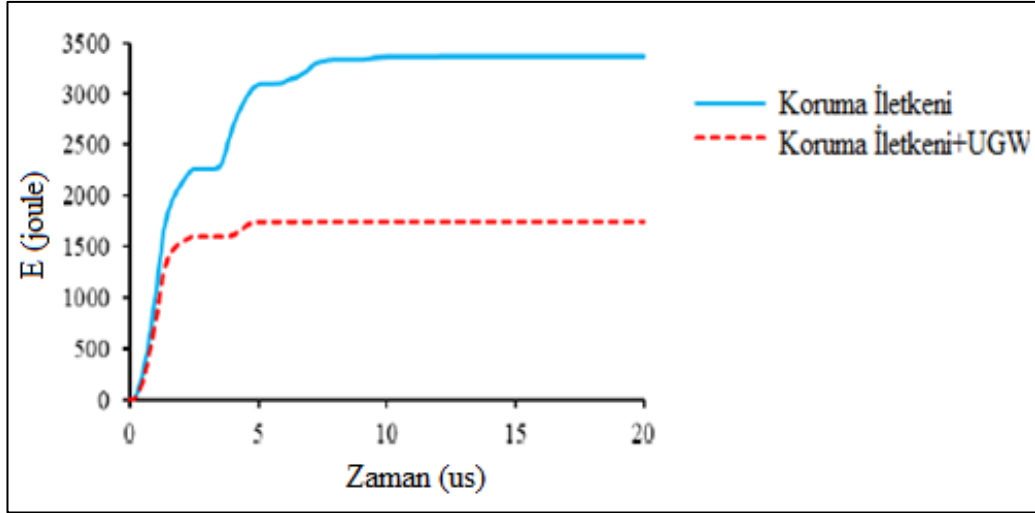
Şekil 4.42. YEMD koruma iletkenine düşmesi sonucu hat boyunca UGW iletkeninde indüklenen gerilim

Simülasyon çalışmasında aynı büyüklükteki YEMD darbesinin direk tepesine (gövde metaline) düşmesi sonucu belirli parametreler değiştirilerek (temel topraklama direnci, koruma iletkeni, UGW ve hat parafudru) indüklenen gerilimler tespit edilmeye çalışılmıştır.



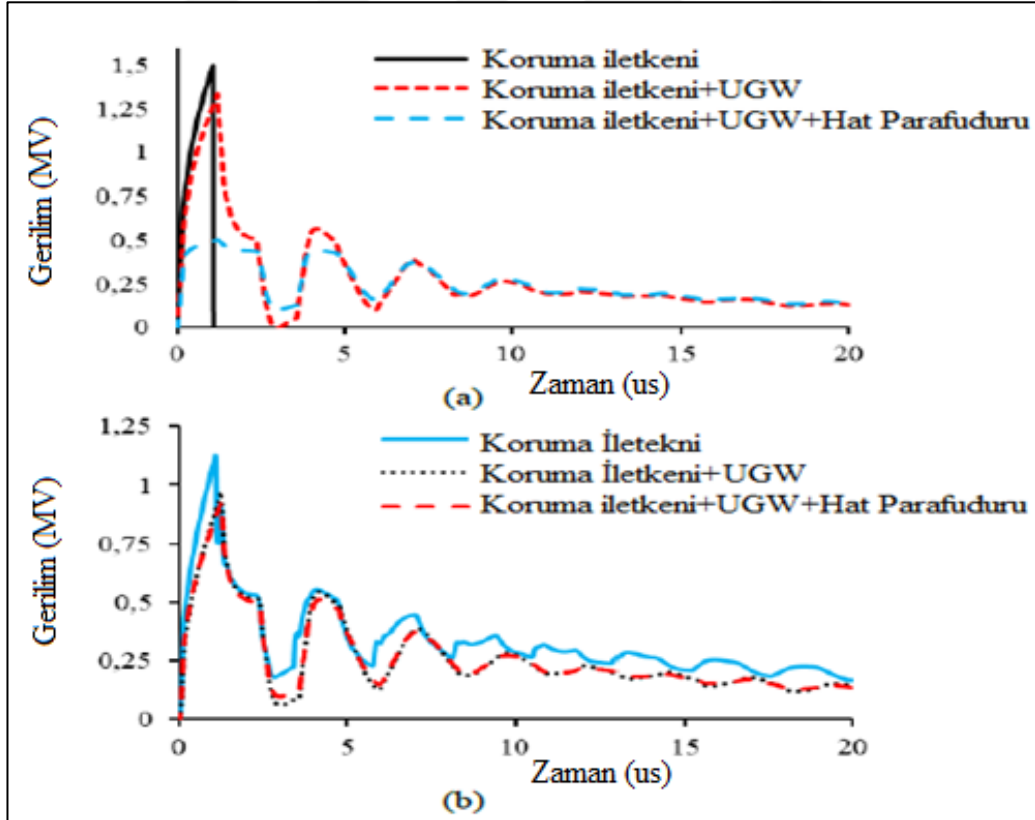
Şekil 4.43. YEMD'in direk tepesine düşmesi sonucu hatta indüklenen gerilim

YEMD'in, direğin tepesine düşmesi sonucu, direğin temel topraklama direnç değerlerine göre indüklenen gerilim tespit edilmiştir.



Şekil 4.44. YEMD'in direk tepesine düşmesi sonucu hatta absorbe edilen enerji büyüklüğü

Şekil 4.44'te YEMD'in, direğin tepesine düşmesi sonucu koruma iletkeninin sadece olduğu durumdaki absorbe edilen enerji ile koruma iletkenine ilaveten tek UGW iletkeninin eklenmesi sonucu absorbe edilen enerji miktarı gösterilmiştir.



Şekil 4.45. a) Tek koruma iletkenine sahip direktte YEMD'in direk tepesine düşmesi sonucu L₁ fazında indüklenen gerilim **b)** Tek koruma iletkenine sahip direktte YEMD' in direk tepesine düşmesi sonucu L₂ fazında indüklenen gerilim

Şekil 4.45.a’ da YEMD’in, (darbe büyüklüğü 30 kA) direğin tepesine düşmesi sonucu tek koruma iletkenine sahip olduğu durumdaki L_1 fazında indüklenen gerilim, tek koruma iletkeni + tek UGW iletkenini eklenmesi durumdaki L_1 fazında indüklenen gerilim ve tek koruma iletkeni + tek UGW + hat parafuduru eklenmesi durumdaki L_1 fazında indüklenen gerilim değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.45.b’ de ise YEMD’in, (darbe büyüklüğü 30 kA) direğin tepesine düşmesi sonucu tek koruma iletkenine sahip olduğu durumdaki L_2 fazında indüklenen gerilim, tek koruma iletkeni + tek UGW iletkenini eklenmesi durumunda L_2 fazında indüklenen gerilim ve tek koruma iletkeni + tek UGW + hat parafudru eklenmesi durumunda L_2 fazında indüklenen gerilim değerleri gösterilmiştir.

Bir UGW kullanıldığında fazın maksimum kuplaj faktörü %30'a kadar artırılabilir, böylece yalıtımda deşarja neden olan gerilim azalır, bu da enerji iletim hattının YEMD’ e karşı korunma performansını artırabilir. 220 kV iletim hattının izolatöründeki voltaj, bir UGW ve iki UGW kurulduğunda %19 ile %32 arasında düşer (S.Visacro vd. 2012). Ek olarak UGW, faz iletkenleri arasındaki kuplaj faktörünü artıracak ve YEMD akımının bir kısmını komşu direklere dağıtacak ve YEMD çarptığı bir direğin korunma iletkenindeki voltajı düşürecektir. Hat parafudurları her bir hat direği için kullanıldığında yatırım maliyeti çok fazladır. UGW ise kolay kurulum ve düşük maliyet sağlaması, bu korunma metodunun kullanılmasını gittikçe artırmaktadır. Bu çalışmada ise 400 kV’ lık enerji iletim hatlarının bu korunma türü kullanılarak detaylı olarak incelenmiş ve çözüm önerileriyle yeni bir bakış açısı getirilmeye çalışılmıştır. Direk parametreleri, faz iletkenleri, koruyucu iletkenler, izolasyonlar ve temel direnç verileri Türkiye’deki TEİAŞ kurumundan alınmıştır. Analizlerde çift korunma iletkeni, çift korunma iletkeni + tek UGW ve çift korunma iletkeni + çift UGW, çift korunma iletkeni + tek UGW + tek hat parafuduru durumları için karşılaştırma yapılır. 400 kV’lık Yeniköy – Yatağan TES hattında UGW ve hat parafudru kullanılması durumunda YEMD’e bağlı hatta indüklenen gerilim %25 ila %50 arasında düşmüştür.

Çalışma da yapılan tespitlere göre en iyi koruma şekli tek koruma iletkeni + tek UGW + hat parafudru veya çift korunma iletkeni + çift UGW + hat parafudru kullanılması gerektiği tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında yapılan çalışmalar, enerji iletim hatlarının güvenilirliğini artırmak ve YEMD kaynaklı arızaları minimize etmek amacıyla gerçekleştirilen kapsamlı analizleri ve iyileştirme önerilerini içermektedir. Bu tez, farklı topraklama tekniklerinin etkinliğini değerlendirerek, izolatör ve parafudr kullanımı gibi ikincil koruma yöntemlerinin önemini vurgulamaktadır. Çeşitli simülasyonlar ve saha incelemeleri aracılığıyla elde edilen veriler, farklı hat tasarımlarının ve koruma yöntemlerinin etkinliğini değerlendirmemize olanak sağlamıştır. Sonuç olarak, enerji iletim sistemlerinin güvenilirliğini artırmak ve aşırı gerilimlere karşı daha dirençli hale getirmek için optimal stratejiler belirlenmiştir. Bu bağlamda hem teknik hem de ekonomik açıdan en uygun çözümler önerilmiş ve enerji iletim hatlarının güvenliği ve performansının nasıl artırılacağına dair kapsamlı bir bakış açısı sunulmuştur. Bu bölümde son olarak elde edilen bulguların detaylı bir değerlendirmesi yapılacak ve gelecekteki araştırma ve uygulamalara yönelik önerilerde bulunulacaktır.

Yapılan kublaj etkisi tespiti çalışmasında, Heidler ve Rusck fonksiyonlarını kullanarak YEMD filizleri oluşturarak kublaj etkileri ve transient olayların enerji iletim hatları ve santraller üzerindeki etkisini inceledi. Rusck'ın hat-ile-alan kublaj modelinde, kublaj denklemlerinde kullanılan elektrik alanı, Rusck'ın modelinin ifadelerinden biri olan sabit bir hızla ilerleyen bir dikey kanal boyunca yayılan geri vuruş akımının elektrik alanından türetilmiştir (Çakıl T. 2017). İlk analizde, YEMD filizinin dolaylı düşüşünün (boşaltımın) yakındaki EİH'ler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Farklı düşen YEMD akımları, YEMD tarafından dağıtılan yükten kaynaklanan dikey elektrik alanını elde etmek için kullanılmıştır. Bu çalışma, YEMD akımının artışı, dikey elektrik alanı ve indüklenmiş gerilimin değerinde bir artışa yol açtığını ortaya koymuştur. Özellikle, 160 kA'lık bir YEMD'in, 100 m uzaklıktaki bir havai hattın tabanında oluşturduğu elektrik alan değeri -3.87 kV/m olarak ölçülmüştür. Ayrıca, aynı büyüklükteki bir YEMD'in, zamanın etkisine bağlı olarak 1.5 ms'de, 100 m uzaklıktaki bir havai hattın tabanında 200 kV/m skaler bir değer oluşturduğu bulunmuştur. Bu bulgu, Aigner'ın önerisini desteklemektedir. Ayrıca, farklı YEMD akım seviyeleri için dikey elektrik alanının vektör bileşeni de incelenmiştir. Literatürdeki önceki çalışmaların aksine, bu çalışma farklı YEMD değerleri için dikey elektrik alanının hem skaler hem de vektör bileşenlerini araştırmaktadır. Sonuçlar, aynı akım değeri için skaler bileşenin (100 m uzaklıktaki 200 kV/m) vektör bileşenden (100 m uzaklıktaki -3.87 kV/m) daha yıkıcı olduğunu göstermiştir. Bu çalışma ayrıca, farklı düşen akım değerleri için YEMD tarafından oluşturulan manyetik alan değerlerini de elde etmiştir. Analizler, 160 kA'lık bir YEMD'in, 100 m uzaklıktaki havai hattın temelinde 1.5 ms içinde 0.4 mT manyetik alan yoğunluğu oluşturduğunu ortaya koymuştur (Delfino, F. vd. 2002).

Bu çalışmada, YEMD filizlerinin topraktaki yayılma hızındaki artışın, enerji iletim hatları ve enerji tesislerinde indüklenen gerilim artışlarıyla doğru orantılı olduğu bulunmuştur. Bu sorunu önlemek için, belirli hatlardaki direklerin topraklama temellerinin, yıldırım düşme sıklığının en yüksek olduğu bölgelerde korunması gerekmektedir. Bu bölgelerde elektromanyetik uyumluluğu artırılması gerekir. Çalışma, YEMD filizlerinin yayılma hızına göre EİH'lerde ve enerji tesislerinde ortaya çıkan geçici gerilim değerlerini bölge-hat ilişkisi temelinde analiz etmiştir. Sonuçlar, YEMD'lerin yayılma hızının ışık hızına yaklaştıkça EİH'lerde ve güç ekipmanlarında indüklenen gerilimi arttığını göstermiştir. Ayrıca, bu çalışma, YEMD filizinin lider

filizinin etkinliğini ve yerden düşmeden önce bölgede oluşturduğu elektriksel koşullar da incelemiştir. Çalışma, YEMD filizinin düştüğü bölgedeki nem seviyelerine ve yüksek irtifalı bölgelerdeki elektriksel koşullara da odaklanmıştır. YEMD filizinin oluşma süresi yaklaştıkça, elektrik alan değeri artmıştır. Özellikle, kanala düşmeden önce oluşan 15 kA YEMD'in 15 m yükseklikteki direktteki iletkenlerdeki elektrik alan değeri, kanalın oluştuğu noktadan 70 m uzaklıkta 0.5 μ s içinde 1.5 kV/m olarak ölçülmüştür (Helhel S., Özen Ş. 2008,). YEMD filizinin düşme konumu, YEMD'lere en çok maruz kalan bölgelerdeki belirli hatlardaki elektrik alan değerlerini seçerek tahmin edilebilir. Ayrıca, YEMD deşarjı gerçekleştikten sonra etkisi, vuruş noktasından uzaklık ve zaman bazında elektrik alan değeri analiz edilmiştir. Sönümleme süresi ve mesafesi arttıkça elektrik alan değerinin azaldığı sonucuna varılmıştır. 15 kA YEMD filizinin kanalının oluşmasından sonra, 70 m uzaklıktaki 15 m yükseklikteki direktteki iletkenlerde 0.5 μ s içinde oluşturulan elektrik alan değeri 2.4 kV/m olarak belirlenmiştir. Hat üzerindeki etkinin zamanla kaybolduğu gözlemlenmiştir. 500 metre uzakdaki bir hattın direğinde ilerleyen YEMD filizinin hareketinin ürettiği elektrik alanının hesaplandığı, 0.3 kV/m olduğu bulunmuştur. Bu tespit edilen sonuçlar çok yüksek değerlere sahiptir (IRPA/INIRC, TEİAŞ, 2013). Bu sonuçlar, Bewley'in konuya yönelik perspektifini destekler ve YEMD'lerin enerji iletim hatları ve tesisleri üzerindeki dolaylı kuplaj etkilerini açıklamıştır. Bu çalışmanın uluslararası literatürdeki çalışmalardan farkı Rusck yaklaşımının ve Heidler dalga denklemi kombinasyonunun, havai enerji iletim hatlarının dolaylı YEMD performansını yüksek doğrulukla değerlendirmek için kullanılabileceği, bu sayede önemli doğruluk kayıplarından kaçınılabileceği belirtilmiştir. Kısaca Rusck denklemi modifiye edilerek (akım denklemindeki düzenleme) daha gerçekçi sonuçlar çıkarılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalardan bir farkı da geleneksel dipol yaklaşımı yerine hareketli yükler yaklaşımını ile elektromanyetik alan fonksiyonlarını kullandığı için, interpolasyona gerek duymadan grafiksel sonuçlar sunmasıyla benzersizdir.

Yapılan topraklama iyileştirme çalışmaları sonucunda, YEMD yoğunluğu yüksek ve toprak geçiş direnci yüksek olan işletmelerde bulunan direklerde YEMD kaynaklı açmaları en aza indirmek için aşağıdaki uygulamaların yapılması gerekmektedir:

- İzolatör Ekleme: Eğer klerans yeterli ise izolatör eklenmelidir.
- Toprak İyileştirmesi Yapmak: Mesh grid, kazık, counterpoise, örgü iletken gibi yöntemlerle toprak iyileştirmesi yapılmalıdır.
- Underbuilt Wire: Faz iletkenlerinin altından toprak iletkeni bağlantısı yapılmalıdır. OPGW underbuilt wire olarak kullanılabiliyorsa bu bir avantaj sağlar.
- Guy Wire: Direktten dört noktadan toprak ile bağlantı yapılmalıdır (ancak hırsızlık riski bulunmaktadır).
- Parafudr Kullanımı: Hat parafudrları ve transformatör merkezlerinin hat ile bağlantı oluşturduğu ön bölüme (primer) eklenmelidir.

Kış aylarında toprak teli sehim problemi olan ve toprak teli kesilmek zorunda kalınan bölgelerde underbuilt wire uygulaması yapılmalıdır. Bu işlemi yaparken, çift devre direklerde üst fazlara parafudr yerleştirilmelidir. Bu yöntem, üst fazların sanki toprak teli gibi aşağıdaki fazları koruduğu için çok etkili olmaktadır. Klerans yetersiz olan bölgelerde ise, daha az sehim veren ve dayanıklı olan Japon yapımı ACFR iletken türü veya benzeri iletkenler kullanılmalıdır. Yapılacak analizler sonucunda bazı durumlarda toprak iyileştirmesi yapılması, bazı durumlarda ise parafudr kullanımı daha iyi sonuçlar

verebilir. Ancak, ülkemizde yaygın olarak kullanılmayan fakat diğer ülkelerde kullanılan underbuilt wire ve guy wire gibi uygulamalar da devreye sokularak YEMD kaynaklı açmalar en aza indirilebilir.

Bir diğer çalışma olan hat parafudr yerleştirme çalışmasında, Türkiye’de aktif olarak kullanılan Yeniköy-Yatağan TES hattı ATP-EMTP’de modellenmiştir. Ayrıca, Yeniköy-Yatağan TES hattının elemanları birebir gerçek parametreler kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada belirtilen sonuçlar, YEMD’in zararlarından korunmak için YEMD akımının karakteristiklerinin (genlik, etki süresi), doğrudan temel toprak empedansının ve hattın karakteristik empedansının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Yapılan çalışmada YEMD’e bağlı aşırı gerilim akımının büyük bir kısmı topraklama iletkeni üzerinden toprağa aktarılmıştır. Ancak, dalgalanma akımının bir kısmının düşen YEMD tarafından komşu direklerde gerilim oluşturduğu tespit edilmiştir. Hat parafudrlarının kullanımıyla, YEMD kaynaklı aşırı geçici (transient) gerilimlerin etkili bir şekilde bastırıldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, iletim hatlarının performansını artırmak için sadece hat parafudrlarının kullanımı yeterli koruma sağlamaz; bu durumda ikincil korumalara da ihtiyaç duyulabilir. İkincil koruma olarak, izolatörlerin darbe dayanım gerilimlerinin artırılması önerilmiştir (örneğin, izolatör dilimlerinin artırılması). Bu çalışmada kullanılan izolatör segmentlerinin her birinin darbe dayanım gerilimi 110 kV olarak belirlenmiştir. Örneklendirilen hat modeli için 18-20 dilimli izolatör yapılarının kullanılmasıyla hattın YEMD’e karşı başarılı bir şekilde korunduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, enerji iletim hatlarının tasarımında, potansiyel tehlikeli gerilim sıçramalarına karşı uygun izolatör seçiminin son derece kritik olduğu da unutulmamalıdır. Bu çalışmadaki YEMD analizlerinin gerçek bir hat modeli üzerinde yapılarak elde edilen sonuçların, güç iletim sistemlerinde aşırı gerilimlere karşı koruma ve izolasyon seviyelerinin belirlenmesine önemli katkılar sağlayabileceği belirtilmektedir.

Bir diğer çalışma olan Burdur-Keçiborlu hattı CDEGS ile modellenmiştir. Bu çalışma sayesinde, geri atlama, darbe atlama, topraklama iyileştirmeleri ve YEMD kaynaklı açmaları azaltacaktır; ancak, bu iyileştirmeleri fayda-maliyet açısından değerlendirerek sadece gerekli yerlerde ve gerektiği kadar uygulama yapmak israfı önleyecektir. Özellikle 154 kV çift devre bir hattın tek toprak teli olduğu durumlarda, yapılacak her iyileştirme açma sayısını önemli ölçüde azaltacaktır. YEMD yoğunluğunun yüksek ve YEMD akım genliğinin büyük olduğu hatlarda, yüksek direklerin kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Bununla birlikte, eğer hattın YEMD kaynaklı açma sayısı düşükse ve hat oldukça eskiyse, topraklama iyileştirmeleri konusunda dikkatli bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Topraklama değerlerini düşürmek için yatay iletkenler kullanmak gerekmektedir. Bu bağlamda iki yaygın yöntemden biri, direğin etrafına çelik iletkenler serilerek oluşturulan halka sistemidir. Bu yöntemde, çelik iletkenler direğin etrafında bir halka oluşturacak şekilde döşenir ve bu iletkenler ayaklarla irtibatlandırılır. Diğer bir yöntem ise counterpoise uygulamasıdır; burada direktten hat yönünde yatay iletkenler serilir ve bu iletkenler çelik örgü ile birleştirilir. Bu yöntemler, topraklama direncini azaltarak, topraklama sisteminin etkinliğini artırır. Hatlarda yapılacak topraklama iyileştirmelerini yalnızca kazık kullanımı ile sınırlı tutmamak gerekir; yatay iletken uygulamaları da göz önünde bulundurulmalıdır. İlgili şartnamelerde bu tür uygulamaların belirtilmesi önemlidir. Yalnızca bentonit dökerek yapılan topraklama iyileştirmeleri, yağmur suyunun etkisiyle zamanla etkisini yitirebilir ve

yüksek toprak geçiş dirençleri yeniden ortaya çıkabilir. Bu nedenle, topraklama sistemlerinin etkinliğini artırmak için yatay iletkenlerin de kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmalar, iletim hatlarında yapılan topraklama iyileştirmelerinin ve koruma yöntemlerinin, YEMD kaynaklı açmaları azaltmada ve hattın güvenilirliğini artırmada önemli rol oynadığını göstermektedir. Yapılan iyileştirmelerin fayda-maliyet analizleri doğrultusunda sıralamak gerekirse, topraklama direncinin düşürülmediği durumlarda izolatör boylarının uzatılması (eğer direk tipi buna imkân vermediği takdirde) bu yöntem yerine ekstra iletken yapısı olan underbuilt wire (V. ve VI. İletken yapısı) kullanılabilir. Bu yapının da kullanılmaması durumunda hat parafudru takılması gerektiği tespit edilmiştir. Bu dörtlü yapının tamamı özel hatlarda kullanılması durumunda YEMD'e bağlı herhangi bir açma meydana gelmeyeceğini düşünmekteyiz.

Son olarak, YEMD'ler karmaşık doğal olaylardır. Bu darbeyi matematiksel olarak ne kadar gerçekçi bir şekilde modelleyebilirsek, elektrik tesislerinde geçici hasarları o kadar iyi önleyebiliriz. Bu modeller, YEMD'lere maruz kalan enerji iletim hatlarını korumak için aşırı akım değerlerinin önceden belirlenmesini kolaylaştıracak ve böylece koruyucu cihazlar için uygun seviyelerin seçilmesine yardımcı olacaktır. Ek olarak, bu matematiksel modellerin gelecekteki çalışmalarda YEMD'lerin enerjisinden yararlanmada önem kazanacağına inanıyoruz.

6. KAYNAKLAR

- AH. C. L., MAR S.C., Extension of the Chowdhuri – Gross Model for Lightning Induced Voltage on Overhead Lines, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 1, no. 2, pp. 240-247, 1986.
- AGRAWAL K., H. J. PRICE and S. H. GURBAXANI, Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Non-Uniform Electromagnetic Field, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. EMC-22, pp. 119-129, 1980.
- AGRAWAL K., H. J. PRICE, and S. H. GURBAXANI, Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by A Nonuniform Electromagnetic Field, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 22, No. 2, Pp. 119–129, May 1980.
- AIGNER V., Induzierte Blitzuberspannungen Und Ihre Beziehung Zum Ruck Wertigen, *Überschlag*, ETZ 56, pp. 497-500, 1935.
- ALMEDIA F. S., SILVEIRA H., CONTI A. and S. VISACRO Influence of tower modelling on the assessment of back flashover occurrence on transmission lines due to first negative lightning strokes, *Electric Power Systems Research*, Vol. 197, 2021.
- ALBERTO B., NUCCI C.A., PAOLONE M. and RACHIDI F., Characterization of Conference on Lightning Protection, ICLP'2000, Rhodes, Greece, Sep. 2000.
- ALBERTO B., GUITERREZ A., NUCCI C.A., PAOLONE M., E. PETRACHE, and RACHIDI F., Lightning-induced voltages on complex distribution systems: Models, advanced software tools and experimental validation, *J. Electrostatics*, vol. 60, pp. 163–174, 2004.
- ALBERTO B., K. ISHIMOTO, F. NAPOLITANO, C. A. NUCCI and F. TOSSANI, Assessment of the Effects of the Electromagnetic Pulse on the Response of Overhead Distribution Lines to Direct Lightning Strikes, in *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 8, pp. 522-531, 2021.
- ALEXANDRE P., Lightning-induced voltages on low-voltage distribution lines, *Electric Power Systems Research*, Volume 233, 2024.
- ANDERSON J.G., Lightning Performance of Transmissions Lines, Transmission line reference book 345 kV and above, pp 545-578, 1982.
- ANDRE M., OLIEVERIA D., MARCUS R., Mitigation of Insulator Lightning-Induced Voltages by Installing Parallel Low-Voltage Surge Arresters. *Energies*. 16, 2023.

- ARANEO and CELLOZİ S., Direct Time Domain Analysis Of Transmission Lines Above A Lossy Ground, *Inst. Electr. Eng. Proc. Sci. Meas. Technol.*, Vol. 148, pp. 73–79, 2001.
- BARKER P. P., SHORT T. T., EYBERT-BERARD A.R. and BERLANDIS J.P., Induced voltage measurement on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.11, no.2, pp. 980–995, April 1996.
- BEWLEY L. W. Traveling Waves due to lightning, *AIEE Trans.* 48, pp. 1050–1064, 1929.
- BRUCE C.E.R. and GOLDE R.H., The lightning discharge, *J. Inst. Elect. Eng. Pt.2*, vol.88, pp.487-520, 1941.
- ÇAKIL T., Investigation the Effects of Lightning Electromagnetic Structures on High Voltage Electrical Facilities, MSc Thesis in Electrical-Electronic Engineering, June 2017.
- ÇAKIL T., CARLAK H.F., ÖZEN Ş., Protection Analysis of Surge Arresters and Isolators Against Over Voltages Caused by Lightning Electromagnetic Pulses, International Conference on Advances and Innovations in Engineering, Elazig, Turkey, 10-13 May 2017.
- ÇAKIL T., CARLAK H.F., ÖZEN Ş., The Analysis of Transient Phenomena on Power Transmission Lines Due to Lightning Electromagnetic Pulses, Progress In, *Electromagnetics Research Symposium*, PIERS 2017, St Petersburg, Russia, 22,25 May 2017.
- ÇAKIL T., CARLAK H.F., ÖZEN Ş., The Indirect Effect of Lightning Electromagnetic Pulses on Electrostatic, Electromagnetic Fields and Induced Voltages in Overhead Energy Transmission Lines. *Appl. Sci.*, 14, 3090, 2024.
- CARLOS. A. N., RACHIDI F., IANOZ M. and MAZZATTI C., Lightning Induced Voltages on Overhead Power Lines”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 35, pp. 75-86, 1993.
- CARLOS. A. N., RACHIDI F., IANOZ M., MAZZETTI C., Comparison of Two Coupling Models for Lightning-Induced Overvoltage Calculations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, pp. 330-339, Jan. 1995.
- CARLOS. A. N., Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines. Part II: Coupling Models for the Evaluation of the Induced Voltages, *Electra*, No.162, Oct. 1995.
- CARLOS.A. N., DIENDORFER G., UMAN M.A., RACHIDI F., MAZZETTI F., Lightning return-stroke models with channel-base specified current: a review and comparison, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, No. D12, November 1990.

- CARLOS. A. N., BARDAZZI V., IORIO R., MANSOLDO A., and PORRINO A.,
A code for the calculation of lightning-induced overvoltages and its interface with
the electromagnetic transient program, presented at the 22nd Int. Conf. Lightning
Protection (ICLP), Budapest, Hungary, 1994.
- CELIO. F. B. and PAULINO J.O.S., A Closed Expression for the Lightning Induced
Voltage in Short Loops, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,
vol. 58, no. 1, pp. 172-179, Feb. 2016,
- CELIO. F. B. and PAULINO J.O.S., Effect of Rusck's Approximation on the Indirect
Lightning Performance Assessment of Aerial Power Lines, in IEEE Transactions
on Electromagnetic Compatibility, vol. 63, no. 1, pp. 181-188, Feb. 2021.
- CHRISTOPOULOS C., An Introduction to Applied Electromagnetism. John Wiley &
Sons, 1990.
- CHRISTOPOULOS C., The Transmission-Line Modeling Method TLM. Piscataway,
NJ: IEEE Press, 1995.
- ÇOLAK I, KOSALAY I., Elektrik Tesislerinde Yıldırımın Etkilerinin Elektromanyetik
Uyumluluk Açısından İncelenmesi. TÜBAV Bilim Dergisi, 1(1), 7-12, 2010.
- DANIELE M., M. BRIGNONE, R. PROCOPIO, A. PIANTINI and F. RACHIDI, A
New Channel-Base Lightning Current Formula with Analytically Adjustable
Parameters, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 63, no.
2, pp. 542-549, 2021.
- DANIELE. M. et al., An Efficient Methodology for the Evaluation of the Lightning
Performance of Overhead Lines, in IEEE Transactions on Electromagnetic
Compatibility, vol. 63, no. 4, pp. 1137-1145, Aug. 2021.
- DELFINO F., PROCOPIO R., ANDREOTTI A., VEROLINO L., Lightning Return
Stroke Current Identification Via Field Measurements. Electr. Eng. 2002.
- DIENDORFER G., UMAN M.A., An improved return stroke model with specified
channel-base current, *Journal of Geophysical Research*, v. 95, p. 13621-13644,
1990.
- EDWARD. T. P., Triggered lightning and some unsuspected lightning hazards, *Naval
Res. Rev.* vol. 25: pp.14-28, 1972.
- EDWARD.T.P., N. A. CIANOS, Ground-lightning environment for engineering usage,
Stanford: Research Institute, 1972, Report, Technical Report 1.

- FARHAD R., C. A. NUCCI, M. IANOZ, and C. MAZZETTI, Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, pp. 250–264, Aug. 1996.
- FARHAD R., C.A. NUCCI, and M. IANOZ, Transient Analysis of Multiconductor Lines Above a Lossy Ground, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.14, no.1, pp. 294-302, Jan. 1999.
- FARHAD R., C.A. NUCCI, M. IANOZ, C. MAZZETTI, Response of Multiconductor Power Lines to Nearby Lightning Return Stroke Electromagnetic Fields, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, pp. 1404-1411, July 1997.
- FARHAD R., Formulation of The Field-To-Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 35, No. 3, Aug. 1993.
- FARHAD R., C. A. NUCCI, M. IANOZ, and C. MAZZETTI, Importance of Losses In The Determination of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, presented at the Int. Symp. Electromagn. Compat. 1996.
- FARHAD R., S. LOYKA, C. A. NUCCI, and M. IANOZ, A New Expression For The Ground Transient Resistance Matrix Elements of Multiconductor Overhead Transmission Lines,” *Electr. Power Syst. Res. J.*, vol. 65, pp. 41– 46, 2003.
- FABIO T., NAPOLITANO F., ISHIMATO K., BORGHETTI A. and NUCCI C.A.,
A New Calculation Method of the Lightning Electromagnetic Field Considering Variable Return Stroke Velocity, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 1, pp. 152-159, Feb. 2021.
- FABIO T., BORGHETTI A., NAPOLITANO F., PIANTINI A. and NUCCI C.A.,
Lightning Performance of Overhead Power Distribution Lines in Urban Areas, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 581-588, 2018.
- FABIO. T., NAPOLITANO F., BORGHETTI A. and NUCCI C.A., Influence of the
Radial Electric Field Appraisal on Lightning-Induced Overvoltages Statistical Assessment, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, no. 3, pp. 637-643, 2019.
- FERETE, K., NIKOLOVSKI, S., KNEZEVIC, G., STOJKOV, M., KOVAC, Z.,
Simulation of Lightning Transients on 110 kV overhead-cable
Transmission Line Using ATP, EMTP, *IEEE*, 2010.
- GOLDE R. H., Indirect lightning Surges on overhead distribution lines, *The electrical research associations*, S/T 75, Leatherhead, 1954.

- GOMES R. M., SILVEIRA F. H. and VISACRO S., Influence of the Distribution of Lightning Strikes Along the Span of Transmission Lines on Their Back flashover Rate: The Span Factor, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 3, pp. 1403-1411, June 2022.
- GUERRIERI S., NUCCI C. A. and RACHIDI F., Influence of the Ground Resistivity On the Polarity and Intensity of Lightning Induced Voltages, Proceedings of 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, 24-30 Aug. 1997.
- HEIDLER F., Travelling current source model for LEMP calculation, Proc of the 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, Zurich, March 5-7, 1985.
- HELHEL S., ÖZEN Ş., Assessment of Occupational Exposure to Magnetic Fields in High-Voltage Substations (154/34.5 kV). *Radiat. Prot. Dosim.* 2008.
- HILEMAN A.R., Insulation coordination for power systems, CRC Press (1999).
- HONGCAI C., DU Y., YUAN M. and LIU Q. H., Analysis of the Grounding for the Substation Under Very Fast Transient Using Improved Lossy Thin-Wire Model for FDTD, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 6, pp. 1833-1841, 2018.
- HOIDALEN H.K., Analytical Formulation of Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines Above Lossy Ground, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol.45, no.1, pp.92-100, Feb. 2003.
- HUNT B.J., HEAVISIDE O., A first-rate oddity, *Physics Today*, vol. 65, no. 11, p. 48, 2012.
- http://apa19.apator.com.pl/pdf/ASA_en.pdf [Son erişim tarihi: 15.06.2024].
- IEC 60060-1 International standard, High Voltage Test Techniques. Part 1: General Definitions and Test Requirements, 2nd edition, 1989-11.
- IEEE Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution, IEEE Standard 1410, 2004.
- IEEE Standards 1410 “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”, 2004.
- IEEE Working Group 3.4.11, Application of Surge Protective Devices Subcommittee, Surge protective devices committee, Modeling of Metal Oxide Surge Arresters, *Transactions on Power Delivery*, Vol. 7 No.1, pp. 302-309, Jan. 1992.

- ISHII, M. VEDIG, Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 6, No.3, pp. 1327-1335, 1991.
- ISHIMOTO K., TOSSANI F., NAPOLITANO F., BORGHETTI A., NUCCI, C.A., LEMP and ground conductivity impact on the direct lightning performance of a medium-voltage line. *Electr. Power Syst. Res.* 2023.
- JAMES B.J., Power Distribution Engineering Fundamentals and Applications. New York: CRC Press, 1994. ISBN 978-0824792374.
- JINXIN C. et al., Comprehensive Assessment of Lightning Protection Schemes for 10 kV Overhead Distribution Lines, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 3, pp. 2326-2336, June 2022.
- JINXIN C. et al., Lightning Protection with a Differentiated Configuration of Arresters in a Distribution Network, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 1, pp. 409-419, Feb. 2023.
- JORDAN D.M., UMAN M. A., Variation in Light Intensity with Height and Time from Subsequent Lightning Return Strokes, *Journal of Geophysics Research*, Vol. 88, pp.6555-6562, 1983
- JOINT CIGRE/CIRE Working Group 05, Lightning Protection of Distribution Networks. Part II: Application to MV networks, 14th International Conference Exhibition on Electricity Distribution, Birmingham, UK, Conference Publication No.438, 1997.
- JUN. G., XIE W.C., XIE Y. and TKACHENKO S., An Efficient Model of High-Frequency Electromagnetic Field Coupling to Multiconductor Transmission Lines with the Presence of the Lossy Ground, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 6, pp. 2261-2272, 2022.
- KANNU P.D. and THOMAS M. J. Lightning Induced Voltages on Multiconductor Power Distribution Line, *IEEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 6, pp. 855-863, Nov. 2005.
- KAUCHE S. and NEKHOUL B. Modeling Of Lightning Surges On A Grounding System Of A Tower Cascade. *Electrical Engineering*. 2023.
- KAWAI, M., Studies of The Surge Response on a Transmission Line Tower, *IEEE Trans, Pas-83*, pp. 30- 34, 1964. Lastname, F. M., Book Title, Wiley-Interscience, New York, 1986.
- KAYGUSUZ, A. MAMIŞ, M.S. AKIN, Yıldırım Düşmesi Nedeniyle İzolatörler Üzerinde Oluşan Aşırı Gerilimler, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, 2003.

- KERSHAW S. S., GAIBROIS G. L. and STUMP K. B., Applying Metal-Oxide Surge Arresters on Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power delivery*, Vol. 4, pp. 301-307, Jan. 1989.
- KOGA H., T. MOTOMITSU, and T. TANIGUCHI, Lightning Surge Waves Induced on Overhead Lines, *Transactions on IECE of Japan*, Vol. E62, No. 4, pp. 216-223, 1979.
- KUFFEL E., ZAENGL W.S. and KUFFEL J., High Voltage Engineering Fundamentals, *Published by Butterworth-Heinemann*, pp. 472-489, 2nd Ed., 2000.
- KURNAZ O. and AKSOY S., Electromagnetic Fields Radiated by Lightning Return Stroke Over Lossy Ground with Rock Formation, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 5, pp. 1444-1451, Oct. 2021.
- LI. C. et al., Difference in Lightning Current Estimated by Lightning Location System Between Triggered Lightning to Ground and Distribution Line," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 6, pp. 2041-2049, 2021.
- LI C. et al., Characterization of Close Electric Field Waveforms from Triggered Lightning, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 6, pp. 2033-2040, 2021.
- LI C., et al., Electromagnetic Fields of Lightning Return Stroke to Wind Turbines With Discontinuous Impedance Model, *Electric Power Systems Research*, Volume 233, 2024.
- LEONID G., MARKOVSKI B. and TODOROVSKI M., Lightning Performance of Multiple Horizontal, Vertical and Inclined Grounding Electrodes, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 5, pp. 3782-3791, Oct. 2022.
- LEONID G., Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents, *IEEE Trans. on Elec. Comp.*, Vol: 51, Issue 3, pp. 559 - 571 2009.
- LUCAS J.R., High Voltage Engineering, 2001, Sri Lanka.
- LUNDHOLM R., Induced Over voltages on Transmission lines and their bearing on the lightning performance of medium voltage networks, Duplic Goteborg, 1955.
- MAT D. and MERCER D.R., Lightning Protection of Pole Mounted Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, pp. 1087 1095, April 1989.
- MAT. A. D., A Practical Extension of Rusck's Formula for Maximum Lightning-Induced Voltages That Accounts for Ground Resistivity. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2007.

- MASTER M. J., UMAN M. A., LIN Y. T., STANDLER R. B., Calculations of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields Above Ground, *J. Geophys. Res.*, vol. 86, pp. 2,127-12,132, 1981.
- MAXWELL J.C., A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 155, pp. 459-512, 1865.
- MORI R. and TATEMATSU A., Response of a Surge Arrester with a Series Gap for 6.6-kV Distribution Lines to Steep-Front Transients, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 6, pp. 2296-2300, 2022.
- MONTANO R., The Effects of Lightning on Low Voltage Power Networks, Ph.D. Thesis, Uppsala university, 2005.
- MUSTAFA T. et al., Investigation of Factors Affecting the Temporary Outages in 154 kV Overhead Lines due to the Lightning Overvoltages, CIGRE, 2022.
- NAPOLITANO F., BORGHETTI A., NUCCI C.A., PAOLONE M., RACHIDI F., and J. MAHSERIJIAN, An Advanced Interface Between the LIOV Code and the EMTP-RV, Presented at the 29th Int. Conf. Lightning Protection (ICLP), Uppsala, Sweden, 2008.
- NICORA M. et al., Estimation of the Lightning Performance of Overhead Lines Accounting for Different Types of Strokes and Multiple Strike Points, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, no. 6, pp. 2015-2023, Dec. 2021.
- NINH N. V., PHAM T., TRAN T., A Method to Improve Lightning Performance of Transmission Lines in High Footing Resistance Areas, Conference Proceedings of ISEIM, pp. 761-764, 2017.
- OLIVER. H., Electromagnetic Theory. London: "The Electrician" Printed and Published, 1893.
- PAOLONE M., Modeling of Lightning-Induced Voltages on Distribution Networks For the Solution of Power Quality Problems, And Relevant Implementation in A Transient Program, Ph.D. dissertation, Dept. Electr. Eng., Univ. Bologna, Bologna, Italy, 2001.
- PAOLONE M., NUCCI C.A., PETRACHE E. and RACHIDI F., Mitigation of Lightning-Induced Over voltages in Medium Voltage Distribution Lines by Means of Periodical Grounding of Shielding Wires and of Surge Arresters: Modeling and Experimental Validation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 1, Jan. 2004.

PAOLONE M. et al., Lightning Electromagnetic Field Coupling to Overhead Lines:

Theory, Numerical Simulations, and Experimental Validation, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 532-547, Aug. 2009.

PEREZ E., HERRERA J. and TORRES H., Sensitivity Analysis of Induced Voltages on Distribution Lines, IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23-26, Bologna, Italy, 2003.

PRINCEY C., GROSS E.T.B., Voltage Surge Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes, *Proceeding of IEE*, Vol. 114, No. 12, pp. 1899-1907, Dec. 1967.

PRINCEY C., Lightning Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines, *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, pp.658-667, April 1990.

PINCETI P. and GIANNETTONI M., A simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999.

PRIKLER, L. and HOIDALEN H. K.. ATPDraw version 6.1 for Windows XP/7/8, 2024, <http://www.atpdraw.net/index.php> [Son erişim tarihi: 22.06.2024]

PENGKANG X. And FANG Z., Lightning Performance of Unshielded 220 kV Transmission Lines Equipped With Metal Oxide Arresters, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 3, pp. 795-804, June 2022.

RAZZAK S. M. A, ALI M. M., SARKAR M. Z. I and AHMAD H., Lightning Induced Over Voltages on Overhead Distribution Lines Including Lossy Ground Effects, 3rd International Conference on Electrical and Computer Engineering ICECE 2004, Dhaka, Bangladesh, 28-30 December 2004.

RAPHAEL B., LOURO P., and PAULINO J., Lightning performance of a critical path from a 230-kV transmission line with grounding composed by deep vertical electrodes, *Electric Power Systems Research*, Vol. 195, 2021.

RUSCK S., GOLDE R. H., Protection of Distribution Lines in Lightning, Vol. 2, *London Academic Press*, pp. 747-771, 1977.

RUSCK S., Induced Lightning over-voltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low-voltage networks, *Trans. Royal Inst. Of Tech.*, no. 120, pp.1-118, 1958.

SANTOS M. N. N. and A. PIANTINI, Analysis of Lightning-Induced Voltages on a Matched Experimental Overhead Line, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 1, pp. 158-165, 2022.

- SILVA J. P., ARAUJO, PAULINO J., Calculation of lightning-induced voltages with RUSCK's method in EMTP, Part II: Effects of Lightning Parameter Variations, *Electric Power System Research*, Vol. 61, pp. 133-137, 2002.
- SIMON. R., WHINNERY J. R., and VAN DUZAR T., Fields and Waves in Communication Electronics, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- SHOZO S., AIBA K. and OKABE S., Lightning Over voltages on Low Voltage Circuit Caused by Ground Potential Rise, *International Power System Transients*, Lyon, France, June 4-7, 2007.
- SIEMENS, Siemens.com/energy/arrester, <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:32d96fc8-d12b-4972-a46b-15edfc66b893/catalogue-stationclass-surge-arresters-en.pdf> [Son erişim tarihi: 22.06.2024]
- SILVERIO V., Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines, *Journal of Lightning Research*, Vol. 1, pp. 60-68, 2007.
- SILVERIO V., Lightning: an Engineering Approach, Art Liber Edit-Sao Paulo, 2005.
- SILVERIO V., SILVEIRA F. H., CONTI A.D., The Use Of Underbuilt Wires To Improve The Lightning Performance of Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 27, No. 1, pp. 205- 213, 2012.
- SHAIDA, N., JAMOSHID, B.T., Lightning Simulation Study Line Surge Arresters and Protection Design of Simple Structures, Degree of Master Of Engineering, Faculty of Electrical Eng. Univ. Tech., Malaysia, 2008.
- SOTO E., PEREZ E. and RIO D.D., Use of Rusck Formula and Multi-Nonlinear Regression to Discard Events Required to Calculate the Lightning Performance of Overhead Lines, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 5, pp. 3590-3596, Oct. 2022.
- STEINSLAND V., SIVERTSEN L.H., CIMPAN E. and ZHANG S., A New Approach to Include Complex Grounding System in Lightning Transient Studies and EMI Evaluations. *Energies*, 12, 3142, 2019.
- STRACQUALURSI E., ARANEO R., RAVICHANDRAN N., ANDREOTTI A. and CELOZZI S., Modelling of Conductors Catenary in Power Lines: Effects on the Surge Propagation Due to Direct and Indirect Lightning, in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 65, no. 5, pp. 1464-1475, Oct. 2023.

- STRACQUALURSI E., ARANEO R., FARIA J. B., ANDREOTTI P. and B. KORDI,
On the Transient Analysis of Towers: A Revised Theory Based on Sommerfeld-Goubau Wave, in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 38, no. 1, pp. 309-318, Feb. 2023.
- SUNDE E.D., *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. New York: Dover, 1968.
- SZPOR S., A New Theory of The Induced Over Voltages, *Cigré Report 308*, 1948.
- TANTHANUCH N., LUDPA S. and YUTTHAGOWITH P., Waveform Parameter Evaluation of Lightning Impulse Voltage Based on Neural Network Method, *Sensors and Materials*, Vol. 33, No. 7, 2459–2470 MYU Tokyo 2021.
- TATEMATSU A., RACHIDI F. and RUBINSTEIN M., On the Representation of Thin Wires Inside Lossy Dielectric Materials For FDTD-Based LEMP Simulations. *IEEJ Trans Elec Electron Eng*, 14: 1314-1322, 2019.
- TATEMATSU A. and YAMANAKA A., Three-Dimensional FDTD-Based Simulation of Lightning-Induced Surges in Secondary Circuits with Shielded Control Cables Over Grounding Grids in Substations. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. PP. 1-11.,2023.
- TAYLOR C., SATTERWHITE. R.S., HARISON C.W., The response of a Terminated Two-Wire Transmission Line Excited by a Non-Uniform Electromagnetic Field, *IEEE Transaction on Antenna Propagation*, Vol. AP-13, 1965.
- TESCHE F. M., Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 34, no. 2, pp. 93–99, May 1992.
- TESCHE F. M., IANOZ M., and KARLSSON T., *EMC Analysis Methods and Computational Models*. New York: Wiley–Interscience, 1997.
- THANASAKSIRI T., Improving the Lightning Performance of Overhead Distribution Lines TENCON 2004. *IEEE Region 10 Conference*, 21-24 Nov. 2004.
- THEETHAYI N. and THOTTAPPILLIL R., Surge Propagation and Crosstalk In Multiconductor Transmission Lines Above Ground, in *Electromagnetic Field Interaction with Transmission Lines. From Classical Theory to HF Radiation Effects*, F. Rachidi and S. Tkachenko, Eds. Billerica, MA: WIT Press, 2008.
- THOTTAPPILLIL T, RAKOV V. A, and UMAN M. A., Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return stroke models, *J. Geophysics. Res.*, vol. 102, pp. 6887–7006, 1997.
- THOTTAPPILLIL R. and M. A. UMAN, Comparison of lightning return stroke models, *J. Geophysics. Res.*, vol. 98, no. D12, pp. 22 903–22 914, 1993.

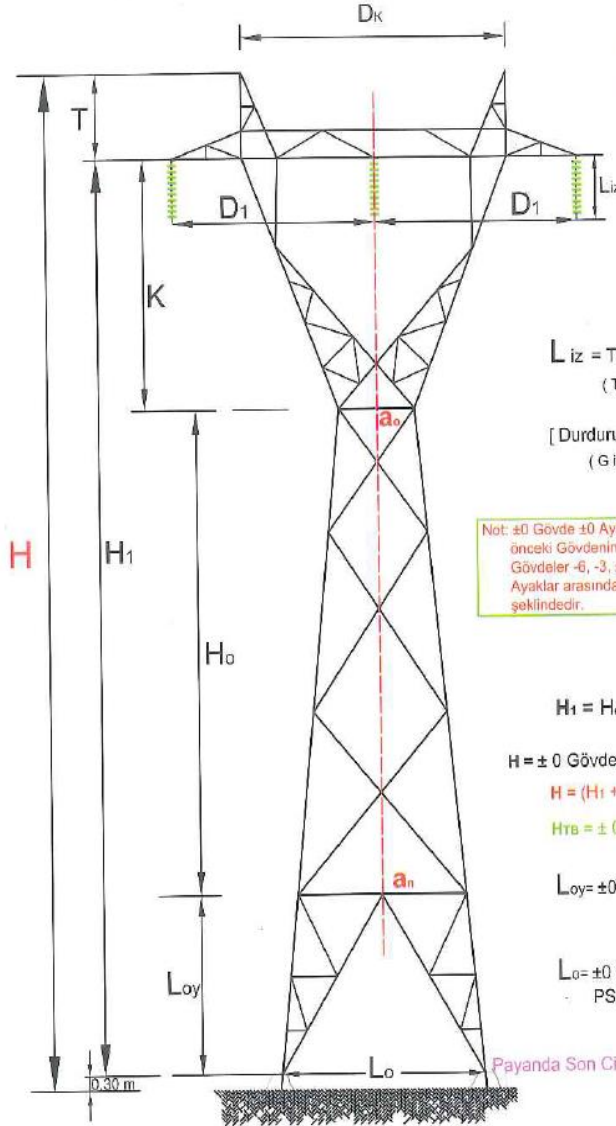
- TEİAŞ, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Jeneratörlerin Elektrik'i Karakteristiği, Sistem Araştırma ve Kontrol Müdürlüğü.
- UEDA, T., and DIG. A, Comparison between Two Tower Models for Lightning Surge Analysis of 77 kV System, *IEEE Trans.*, 2000.
- UMAN M.A., MCLAIN D.K., Magnetic Field of Lightning Return Stroke, *Journal of Geophysics Research*, Vol. 74, 1969.
- UMAN M.A., All about Lightning Toronto: Dover Publications, 1986.
- UMAN M.A., The lightning discharge, Academic Press, Orlando FL, 1987.
- UMAN M. A., MCLAIN D. K., KRIDER K. P., The electromagnetic radiation from a Finite Antenna, *American Journal of Physics*, vol.43, pp.33-38, 1975.
- UMAN M. A., All about Lightning. Toronto: Dover Publications, 1986. ISBN 978 0486252377.
- ÜÇLEROĞLU K., Yüksek Gerilim Elektrik Tesislerinde Koruma. 1980.
- VERHO P., MARTTILLA M., KANNUS K., PYLYANAINEN J. and POUTTU M. Optimization of Overvoltage Protection of Distribution Networks, 19th International Conference on Electricity Distribution, CIRED 2007, pp.1-272. Vienna, 21-24, May 2007.
- VERNON C., Calculating lightning-induced over voltages in power lines. A comparison of two coupling models, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol.36,no.3, pp. 179- 182, Aug. 1994.
- VERNON C., The Lightning Flash, Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2003.
- VERNON C., COORAY G., RUBINSTEIN M., RACHIDI F., Exact Expressions for Lightning Electromagnetic Fields: Application to the Rusck Field-to-Transmission Line Coupling Model. *Atmosphere* 2023.
- VINCENT. P. I., and ORVILLE R. E., Lightning Return Stroke Velocities in the Thunderstorm Research International Program, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 87, pp. 4903- 4915, 1982.
- VLADIMIR.A. R., and DULZON A. A., A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations, in Proc. 9th Int. Zurich Symp. Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland. Mar.1991.
- WAGNER C.F., G.D. MC CANN, Induced Voltages on Transmission Lines, *AIEE Transactions*, Vol. 61, pp. 916- 930, 1942.

- WAGNER K.W., Elektromagnetische Ausgleichs Vorgänge in Freileitungen und kabeIn (in German), par. 5, Leipzig, 1908.
- WAYNE B.H., Standard Handbook for Electrical Engineers. New York: McGraw-Hill Professional, 2006. ISBN 978-0071762328.
- WEIAHAN. Z., WANG J., ZHOU M., CAI L., HUANG J., CAO J., Lightning Current Risetime Influence on Inductive Coupling Effect of Secondary Shield Cable in Substation, Electric Power Systems Research, Volume 232, 2024.
- WEN. C. et al., Analysis of Lightning Interference and Protection Methods on Secondary Cables in Substation, Progress in Electromagnetics Research, 2021.
- XIAO. L, CUI T, WU Z., ZENG H., LIU Q. and LI L., Research on Resonance Overvoltage of EHV Transmission Lines Caused by Lightning Strike, in IEEE Access, vol. 9, pp. 123777-123785, 2021.
- YAMANAKA A., KAZUYUKI I. and TATEMETSU A. Direct Lightning Surge Analysis of Distribution Lines Considering LEMPs From Lightning Channel and Struck Pole in EMT Simulation. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. PP. 1-12. 10.1109, 2023.
- YAMANAKA. A., KAZUYUKI I and AKIYOSHI T., Incorporating the LEMP Impact on Lightning Surge Analysis of Transmission Lines in EMT Simulators. IEEE Transactions on Power Delivery. PP. 1-13. 10.1109, 2024.
- YICHONG L., et al., Measurement of Induced Current on Overhead Line Very Close to Triggered Lightning and Analysis of Return Stroke Velocity on the Current, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 63, no. 4, pp. 1146-1154, Aug. 2021.
- YOKOYAMA S., Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines, *IEEE Transactions PAS*, Vol. 103, No. 1, pp. 100-108, Jan. 1984.
- ZHANG B., LI C., LIU Z. and HE J., Analysis of Transient in Secondary Cable Due to a Direct Lightning Strike on Grounding Grid, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 65, no. 4, pp. 1183-1190, Aug. 2023.
- ZHANG Y, C. LIAO, Y. SHANG, X. ZHONG and W. CAO, Fast Evaluation of Lightning-Induced Voltages on the Transmission Lines Above a Lossy Ground, in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 63, no. 6, pp. 2050-2057, Dec. 2021.

- ZHANG Y, H. CHEN, Y. DU, Transients in solar photovoltaic systems during lightning strikes to a transmission line, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 134, 2022.
- ZHAO Y., WANG J., CAI L., FANG Y., SU R., WANG S., ZHOU M., Induced Voltage At The Closest Pole on Parallel Line Due to Direct Triggered Lightning On 10 Double Circuit Distribution Line. *IET Gener. Transm. Distrib.* 17, 790–799, 2023.
- ZHAO M., ZHAO W., ZHENG S., GUO Y., YANG Z., WANG J., CAI L., FAN Y. Lightning Inductive Coupling Characteristics of Parallel Cables: Computation and Measurement Validation. *IET Sci. Meas. Technol.* 17, 115–124 2023.
- ZACHARIAS G. DATSIOS, PANTELIS N. M., THOMAS E. T., EMMANUEL T. GRIGORIOS P. Investigation of Line Surge Arresters Application to the 150 kV System of Rhodes, *Electric Power Systems Research*, Volume 213, 2022.

7. EKLER

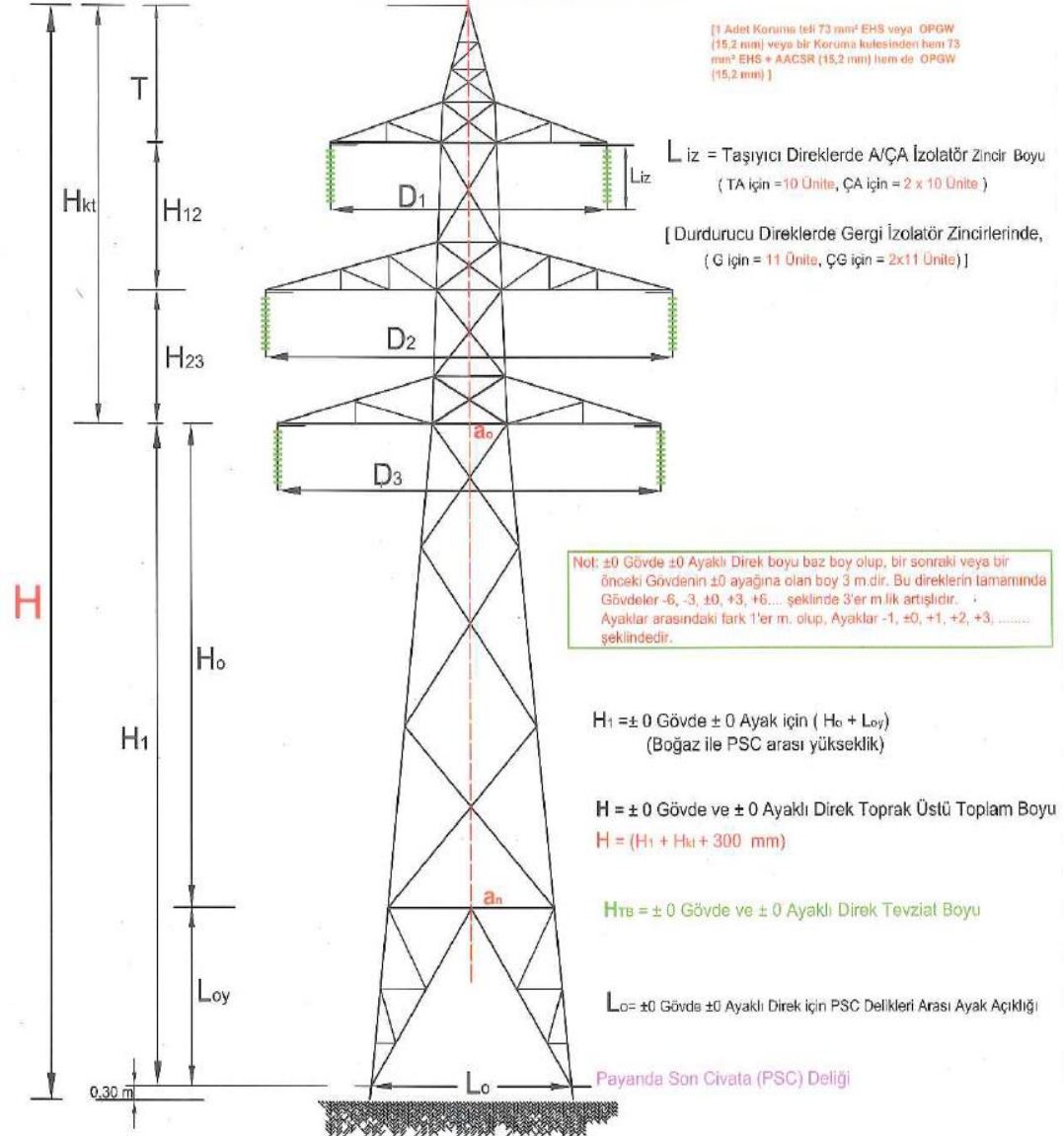
7.1. 154 kV'luk Tek Devre Enerji İletim Hattı Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri

154 kV'LUK TEK DEVRE ENERJİ İLETİM HATTI DİREKLERİNİN
ANA HAT ÖLÇÜLERİ

Kesit MCM	Direk Tipi	D ₁ (mm)	D _K (mm)	T (mm)	K (mm)	a ₀ (mm)	Gövde Eğimi (tg α)	a _n (mm)	L _{oy} (mm)	L ₀ (mm)	H ₀ (mm)	H ₁ (mm)	H _{tr} (mm)	H (mm)
1272 MCM	PA	6.000	7.300	2.400	7.400	2.050	0,09059833	3.952,50	2.300	4.369	10.500	20.200	18.250	22.900
	PB	6.650	8.300	2.250	7.400	2.200	0,10431655	4.286,34	2.800	4.870	10.000	20.200	18.250	22.750
	PC	7.500	9.500	2.800	7.400	2.400	0,11	4.626,40	2.680	5.216	10.120	20.200	18.250	23.300
	PD	6.800	8.600	4.350	7.000	3.500	0,115	5.605,42	1.996	6.065	9.154	18.150	18.350	22.800
	PE	9.800	12.000	6.500	8.000	4.000	0,175	6.621,50	2.660	7.553	7.490	16.150	18.350	24.950
795 ve 954 MCM	AS	6.000	7.600	2.000	7.350	1.900	0,07451923	3.330,00	2.200	3.658	9.595	19.145	17.195	21.445
	BS	6.200	7.800	2.100	7.400	2.050	0,09048507	3.787,00	2.200	4.186	9.598	19.198	17.248	21.598
	CS	6.300	7.600	2.500	7.800	2.200	0,10565111	4.144,00	2.150	4.598	9.200	19.150	17.200	21.950
	DT	6.000	7.600	4.000	6.800	3.000	0,14021164	5.047,00	2.600	5.776	7.300	16.700	16.900	21.000
	ET	6.800	8.200	4.600	7.000	3.300	0,15240642	5.464,00	2.600	6.256	7.099	16.699	16.999	21.599
477 MCM	A2	6.800	8.900	1.700	7.800	1.820	0,063489	3.186,00	1.747	3.407	10.758	20.305	18.355	22.305
	B2	6.800	8.300	2.500	8.000	2.100	0,090129	3.748,00	2.155	4.138	9.142	19.297	17.347	22.097
	C2	5.900	7.800	3.550	6.700	2.400	0,110048	4.106,00	2.400	4.634	7.751	16.851	17.051	20.701
	D2	7.150	8.900	4.600	7.000	2.900	0,128079	4.744,00	2.650	5.424	7.199	16.849	17.049	21.749

7.2. 154 kV'luk Çift Devre Enerji İletim Hattı Direklerinin Hat Ölçüt Değerleri

154 KV'LUK ÇİFT DEVRE ENERJİ İLETİM HATTI DİREKLERİNİN ANA HAT ÖLÇÜLERİ



Kesit	Direk	D ₁	D ₂	D ₃	T	H ₁₂	H ₂₃	a ₀	Gövde	a _n	L _{cy}	L _o	H _o	H _i	H _{TB}	H _{kt}	H
MCM	Tipi	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	Eğimi (lgα)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
2x1272	2FA	7.000	10.000	7.800	3.900	4.300	4.300	1.900	0,09	5.068,00	2.600	5.536	17.600	20.200	18.250	12.500	33.000
	2FB	7.600	10.600	8.200	4.400	4.300	4.300	2.000	0,10	5.510,00	2.650	6.040	17.550	20.200	18.250	13.000	33.500
	2FD	6.800	10.000	7.800	6.000	4.200	4.200	2.400	0,14	6.796,00	2.350	7.454	15.700	18.050	18.250	14.400	32.750
	2FN	7.600	11.600	9.400	6.900	4.300	4.300	3.200	0,17	8.300,00	3.050	9.337	15.000	18.050	18.250	15.500	33.850
2x1272	CP1	6.700	9.000	6.900	3.900	4.200	4.200	1.100	0,04	2.636,00	2.000	2.796	19.200	21.200	19.250	12.300	33.800
	CP2	5.600	8.200	6.100	4.900	4.100	4.100	2.000	0,0335	3.078,00	2.760	3.263	16.090	18.850	19.050	13.100	32.250
	CP3	6.200	8.700	6.600	5.450	4.200	4.200	2.315	0,05	3.946,50	2.535	4.200	16.315	18.850	19.050	13.850	33.000
	Kompakt	CP4	7.000	9.400	8.100	7.550	4.200	4.200	2.730	0,071364362	5.208,00	2.500	5.565	17.350	19.850	20.050	15.950
2x795	TA1	7.000	9.400	7.400	3.150	4.150	4.150	1.400	0,08242611	3.942,00	2.750	4.395	15.419	18.169	16.219	11.450	29.919
	RA1	7.400	10.000	8.000	4.100	4.200	4.200	1.600	0,089434	4.262,00	3.250	4.843	14.882	18.132	16.182	12.500	30.932
	VA1	6.400	9.000	7.000	5.300	4.150	4.150	1.800	0,133341	5.122,00	2.850	5.883	12.457	15.307	15.507	13.600	29.207
2x954	ZA1	7.800	10.400	8.400	5.300	4.150	4.150	2.200	0,16825	6.190,00	3.527	7.378	11.857	15.384	15.584	13.600	29.284
2x477	N1	6.600	9.200	7.200	3.300	4.100	4.100	1.200	0,0673575	3.517,20	2.600	3.867	17.201	19.801	17.851	11.500	31.601
	P1	7.200	9.800	7.800	3.900	4.100	4.100	1.450	0,0764249	4.048,40	2.800	4.476	17.000	19.800	17.850	12.100	32.200
	F1	6.600	9.200	7.200	5.450	4.100	4.100	1.600	0,0991254	4.494,60	2.250	4.941	14.601	16.851	17.051	13.650	30.801
	E1	7.600	10.200	8.200	5.450	4.100	4.100	2.000	0,122449	5.391,80	3.000	6.126	13.850	16.850	17.050	13.650	30.800

7.3. 154kV Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direk Ağırlık Değerleri

154 kV'LUK ENERJİ İLETİM HATTI DİREKLERİNİN

(0,0,0,0) AYAKLI AĞIRLIKLARI VE ± 0 AYAĞINA GÖRE AYAK AĞIRLIK FARKLARI (kg)

20.08.2009 tarihinden itibaren TEİAŞ tarafından (galvaniz ağırlığı %5 olarak) esas alınan tip proje (galvanizli, civatalı, çelik kafes) direk ağırlıklarıdır.
(Aksi belirtilmedikçe direk ağırlıkları iyi Zemin Temelli olarak dikkate alınacaktır.)

154 kV TEK DEVRE 477 MCM (HAWK)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	T.O.	
1	A2	A2-3	2.257	-20	54	59	137	29	
2		A2-3	2.551	-20	39	69	113	34	
3		A2±0	2.797	-25	25	59	103	39	
4		A2±3	3.150	-25	34	74	108	44	
5	B2	A2±6	3.484	-25	44	79	108	54	
6		B2-5	2.850	-25	39	69	108	34	
7		B2-3	2.993	-29	29	69	108	44	
8		B2±0	3.395	-25	39	79	118	49	
9	C2	B2±3	3.857	-20	34	83	123	83	
10		B2±6	4.366	-5	39	108	186	88	
11		B2±9	4.907	-34	83	128	182	103	
12		C2-6	3.739	-34	89	118	152	34	
13	D2	C2-3	4.337	-34	64	113	162	44	
14		C2±0	5.014	-29	69	123	172	59	
15		C2±3	5.495	-29	59	123	137	93	
16		C2±6	6.300	-49	59	113	186	88	
17	D2	D2-6	5.741	-44	64	128	260	44	
18		D2-3	6.585	-39	59	147	191	59	
19		D2±0	7.468	-106	54	123	265	88	
20		D2±3	8.292	-54	83	152	285	113	
21			D2±6	9.421	-83	69	216	265	147

T.O. = Taban Ormeyi ifade eder.
Değişik Ayaklı Direklerde Kullanılacaktır.

154 kV ÇİFT DEVRE 477 MCM (HAWK)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	T.O.	
1	N1	N1-6	3.543	-20	39				
2		N1-3	3.955	-20	44	88			
3		N1±0	4.436	-20	58	88			
4		N1±3	5.073	-34	49	88	127		
5	P1	N1±6	5.662	-34	49	83	127		
6		P1-6	4.416	-25	44	83			
7		P1-3	4.936	-34	59	93			
8		P1±0	5.584	-34	59	98			
9	F1	P1±3	6.320	-34	89	113	162		
10		P1±6	7.213	-29	54	98	167		
11		P1±9	8.125	-49	54	118	172		
12		F1-3	6.084	-44	74	113	182		
13	E1	F1-3	6.908	-44	64	118	182		
14		F1±0	7.939	-44	69	123	211		
15		F1±3	8.822	-44	69	132	231		
16		F1±6	9.754	-49	68	162	240		
17	E1	F1±9	10.951	-79	74	157	250		
18		E1-6	8.135	-49	64	137	211		
19		E1-3	9.185	-49	93	167	246		
20		E1±0	10.343	-69	123	221	285		
21			E1±3	11.678	-79	113	191	285	
22			E1±6	13.228	-74	123	206	299	

154 kV TEK DEVRE 795 MCM (DRAKE) veya 154 kV ÇİFT DEVRE 954 MCM (CARDINAL)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	T.O.	
1	AS	AS-6	2.640	-25	39	74	108	44	
2		AS-3	3.091	-25	25	54	93	69	
3		AS±0	3.376	-29	34	74	118	83	
4		AS±3	3.749	-25	39	98	128	93	
5	BS	AS±6	4.210	-20	39	63	118	108	
6		BS-6	3.013	-23	39	69	108	64	
7		BS-3	3.474	-25	20	64	108	83	
8		BS±0	3.898	-25	49	83	132	103	
9	CS	BS±3	4.386	-29	44	86	142	118	
10		BS±6	5.044	-25	54	98	123	0	
11		BS±9	6.055	-59	25	83	147	0	
12		BS±12	6.889	-79	15	88	157	0	
13	DT	CS-6	3.641	-29	39	74	108	69	
14		CS-3	4.102	-34	39	79	123	88	
15		CS±0	4.759	-29	44	98	132	113	
16		CS±3	5.397	-34	44	93	157	0	
17	ET	CS±6	6.212	-29	54	98	172	0	
18		DT-6	5.024	-39	49	83	167	0	
19		DT-3	5.996	-39	64	98	187	0	
20		DT±0	6.702	-39	69	128	211	0	
21	ET	DT±3	7.841	-59	79	118	216	0	
22		DT±6	8.685	-59	99	118	216	0	
23		ET-6	7.399	-59	64	118	216	0	
24		ET-3	8.498	-59	49	118	286	0	
25			ET±0	9.273	-64	59	142	226	0
26			ET±3	10.608	-59	93	157	260	0
27			ET±6	11.786	-64	103	166	270	0

T.O., Adırlığı Sıfır olarak gösterilen Taban Ormeyi, direk ağırlığına dahil olup, ayaklar eşli de esas kullanılmaktadır. Sıfır olmayan eşit ayaklıda kullanılmayacak, değişik ayaklı direklerde kullanılmaktadır.

154 kV ÇİFT DEVRE 795 MCM (DRAKE) veya 154 kV ÇİFT DEVRE 954 MCM (CARDINAL)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	+4	
1	TA1	TA1-6	4.023	-49	34	88			
2		TA1-3	4.612	-34	39	79			
3		TA1±0	5.152	-39	39	98	177		
4		TA1±3	5.741	-39	44	103	172		
5	RA1	TA1±6	6.329	-44	69	93	191		
6		RA1-6	5.122	-29	54	88			
7		RA1-3	5.760	-34	49	88	137		
8		RA1±0	6.457	-49	64	103			
9	VA1	RA1±3	7.232	-49	74	118	172		
10		RA1±6	8.174	-79	49	98	186		
11		RA1±9	9.440	-103	59	103	182		
12		RA1±15	12.688	-68	104	184	276		
13	ZA1	VA1-6	7.448	-69	69	147	216		
14		VA1-3	8.508	-64	74	157	245		
15		VA1±0	9.587	-69	98	147	231		
16		VA1±3	11.000	-79	108	162	226		
17	ZA1	VA1±6	12.904	-93	103	172	231		
18		VA1±9	13.984	-108	98	162	255		
19		ZA1-6	9.831	-69	79	167	285		
20		ZA1-3	11.697	-93	123	226	319		
21	ZA1	ZA1±0	13.238	-69	103	240	383		
22		ZA1±3	15.260	-103	132	226	402		
23		ZA1±6	17.340	-59	128	294	442	540	
24		ZA1±9	19.901	-93	142	235	339		
25	ZA1	ZA1±12	21.854	-113	137	295	343		
26		ZA1±15	25.190	-126	168	240	324		
27		ZA1±18	27.575	-126	137	280	383		

Taban Orme, Direk ağırlığına dahil olup, mutfaka kullanılmaktadır.

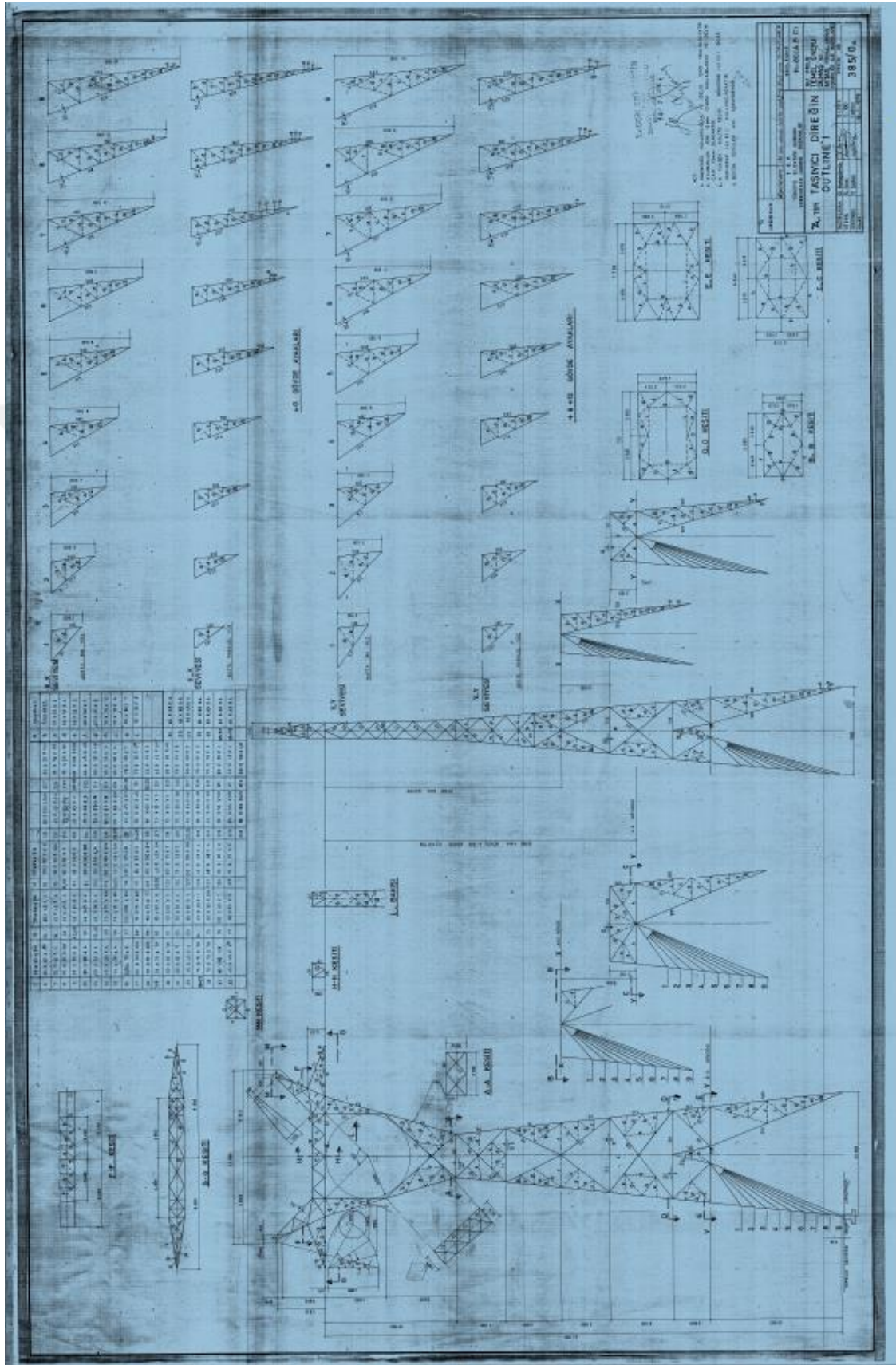
154 kV TEK DEVRE 1272 MCM (PHEASANT)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	+4	
1	PA	PA-6	2.689	-25	25	59	98		
2		PA-3	3.130	-29	29	69	108		
3		PA±0	3.523	-20	34	89	103		
4		PA±3	4.004	-34	25	99	98		
5	PB	PA±6	4.396	-39	44	94	118		
6		PB-6	3.170	-25	34	59	103		
7		PB-3	3.680	-29	39	83	113		
8		PB±0	4.141	-34	39	79	118		
9	PC	PB±3	4.740	-39	44	83	118		
10		PB±6	5.319	-34	29	83	123		
11		PB±9	6.015	-29	25	84	123		
12		PB±12	6.791	-25	34	83	128		
13	PD	PC-6	3.778	-29	29	69	123		
14		PC-3	4.269	-29	39	93	118		
15		PC±0	4.839	-39	44	88	137		
16		PC±3	5.525	-39	44	88	123		
17	PE	PC±6	6.231	-39	25	83	132		
18		PD-6	7.048	-54	59	128	191		
19		PD-3	7.880	-64	49	113	182		
20		PD±0	8.891	-59	44	108	177		
21	PE	PD±3	10.157	-54	54	123	191	260	
22		PD±6	11.226	-49	49	123	196	275	
23		PD±9	12.688	-49	49	132	201	275	
24		PE-6	9.980	-54	54	128	186		
25	PE	PE-3	11.235	-64	49	118	186		
26		PE±0	12.326	-49	44	126	182		
27		PE±3	13.768	-44	59	137	201	275	
28		PE±6	15.367	-60	79	167	221	314	
29	Dir. Göv. 0,0,0,0 Ay.		-6	-3	+0	+3	+6		
30			0,254	10,510	11,969	13,042	14,661		

PE(N) Ayak ağırlık farkları PE direğinin yanısıdır.
Taban Orme, Direk ağırlığına dahil olup, mutfaka kullanılmaktadır.

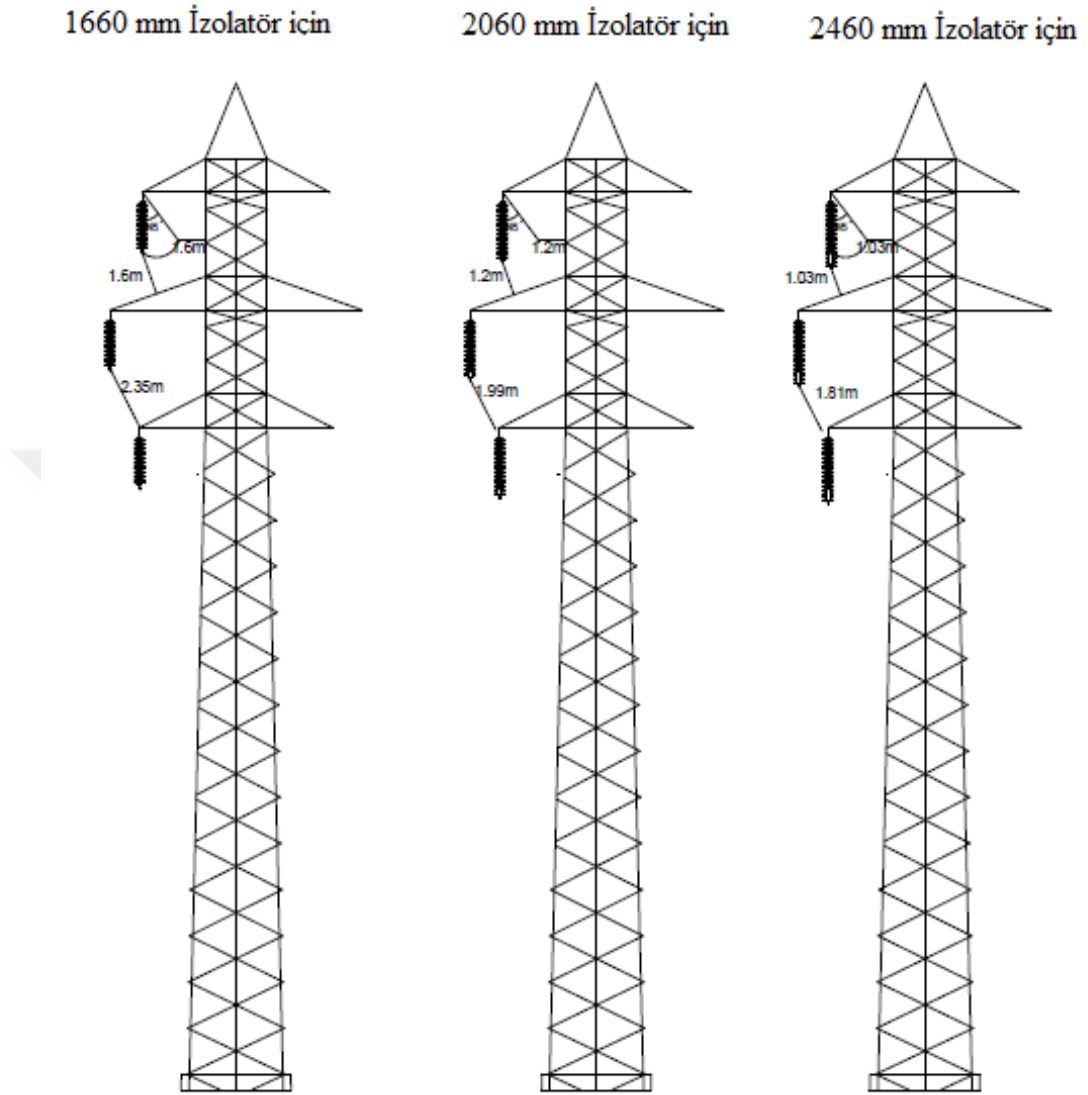
Projesinde olmayan sonradan ilave edilen Ayakların ± 0 ayağına Göre Ayak Ağırlık Farkları									
No.	Direk Tipi	+5	+6	+7					
1	2FB±9	315							
2	2FD±3	504							
3	2FD±0	501	601	731					
4	2FD±3	539							
5	2FD±6	542	653	794					
6	2FD±9	516	631	737					
7	2FD±15	442	609	712					
8	2FN±6	505							
9	ZA1±3	795	898						
10	VA1±3	565							
11	2FB±3	258							
12	2FB±18	475							
13	2FN±0			637					

154 kV ÇİFT DEVRE 1272 MCM (PHEASANT)									
Sıra No	Direk Tipi	Direk Gövdesi	0,0,0,0 Ayaklı	-1	+1	+2	+3	+4	
1	2FA	2FA-6	5.829	-34	34	88	182		
2		2FA-3	6.437	-39	44	93	157	165	
3		2FA±0	7.046	-44	29	113	162	239	
4		2FA±3	7.968	-20	54	103	157		
5	2FB	2FA±6	8.832	-34	59	113	191		

7.4. 400kV Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direk Ölçüt Değerleri



7.5. CP1 Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Direk Ölçüt Değerleri



7.6. Enerji İletim Hatlarında Yeni Kullanılmaya Başlanan PA₁ Tipi Direklerinin Hat Görüntüsü



(Van-Erciş İletim Hattı için PA1/PB1 tipi kullanılmaya başlanmıştır.)

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Not 1:Tüm ayaklarda payanda son civata deliginden zemine olan mesafesi ayak dikmelerinin toprakla temasını önlemek için 50 cm olarak alınacaktır.
Not 2:Tüm ayaklarda payanda son civatası ile beton üst kolu arasındaki mesafe 10 cm olacaktır.

[illegible]

7.12. 154 kV Sincan-Balgat Hattına Yakın Düşen YEMD'in Büyüklük, Zaman ve Konum Ölçütleri

	Akım	Enlem	Boylam	OrajTipi	Oraj Yüksekliği	Tarih
	123	39.8615	32.7761	Yıldırım	0	29.04.2024 05:22:40
	7	39.8446	32.7695	Yıldırım	0	29.04.2024 05:22:40

Analiz Genişliği(km2)	Düşen Yıldırım Adedi	Yıldırım Akımı(maks)	GFD Ortalaması
5	2	123	0

Yıldırım Düşme Oranı

50 kA ve Üzeri %	100 kA ve Üzeri %	150 kA ve Üzeri %	200 kA ve Üzeri %
0,5	0,5	0	0

Ortalama Değerler (kA)

1 %	5 %	10 %	50 %
123	123	123	123

Sınır Değerler (kA)

1 %	5 %	10 %	50 %
123	123	123	123

7.13. Enerji İletim Hatlarında Uluslararası Radyasyondan Korunma Birliği-Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyon Komitesi (IRPA/INIRC) Tarafından 50/60 Hz için Elektrik ve Elektromanyetik Alanlar İçin Sınır Değerleri

Enerji İletim Hattı güzergahı ile ilgili etüt çalışmaları devam etmekte olup, kesin hat güzergahında yukarıdaki tablolarda belirtilen yatay ve düşey mesafelere uyulacaktır.

Uluslararası Radyasyondan Korunma Birliği-Uluslararası İyonize Olmayan Radyasyon Komitesi (IRPA/INIRC) ve Dünya Sağlık Örgütü (WHO) Çevre Sağlığı Bölümü'nün işbirliği ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı'nın (UNEP) desteği ile 50/60 Hz' lik elektrik ve elektromanyetik alanlar için belirtilen sınır değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 69 50/60 Hz Elektrik ve Elektromanyetik Alanlar İçin Sınır Değerler

Maruz Kalma Koşulları		Elektrik Alanı (kV/m)	Elektromanyetik Alan (Gauss)
Çalışanlar	Tam gün	10	5
	Kısa Süre (2 saat/gün)	30	50
	Uzunlar	-	250
Halk	24 saat/gün	5	1,05
	Günde Birkaç Saat	10	10,05

Kaynak: Zipse, 1993

Ülkemizde alternatif akımda işletilmekte olan enerji iletim hatlarının frekans değeri 50 Hz' dir.

500 kV iletim hatları için yapılan bir başka çalışmada maksimum elektromanyetik alan şiddeti 800 mG olarak tespit edilmiştir. Bu değer, IRPA/INIRC' nin belirlemiş olduğu halkın sürekli olarak maruz kalabileceği doz olan 1.000 mG' un altındadır. Buna göre, bu proje kapsamında tesis edilen EİH' lerin etkileri aşağıdaki tabloda verilen değerler ile karşılaştırıldığında elektromanyetik alan için kabul gören değerlerin altında olduğu söylenebilir.

Yüksek Gerilimli Elektrik İletim Tesislerinden Kaynaklı Elektrik ve Elektromanyetik Alanlar (Havalı Hattın Tam Altında, Yer Altı Hattının Tam Üstünde, TM' nin Çiğnde Yaklaşık Ölçüm Aralığı)

Gerilim (kV)	Elektrik Alan Şiddeti	Max. Alan Şiddeti (mG)
154 kV EİH	0.82-364 (V/m)	7.00-13.6
154 kV Yer Altı Kablo	0.65-3.80 (V/m)	2.60-26.90
380 kV EİH	0.222-5.0 (kV/m)	2.70-86
(154+34.5) kV GIS	0.62-4.90 (V/m)	35-165
(154+34.5) kV TM	0.187-4.38 (kV/m)	29.1-149
(380+154) kV TM	0.63 (V/m)-6.0 (kV/m)	0.60-71

Not: EİH: Enerji İletim Hattı TM: Trafo Merkezi GIS: Gaz İzoleli Kompakt Tip Trafo Merkezi

380 kV Gerilime Sahip Elektrik İletim Tesislerinden Kaynaklı Elektrik ve Elektromanyetik Alanlar

Tesis Tipi	Elektrik Alan (kV/m)	Elektromanyetik Alan (mG)
154 kV EİH	0.00082-0.364	7-13.6
380 kV EİH	0,222-5,0	2,7-86
Avrupa Konseyi Tavsiye Kararı	5	1000

Elektriksel alan ve elektromanyetik alan ile ilgili olarak 154 kV ve 380 kV' luk Havalı hatlar ile ilgili yapılan başka bir çalışma yukarıdaki tabloda verilmiştir. Söz konusu tablo incelendiğinde de görüleceği üzere 154 kV ve 380 kV gerilimine sahip hatlar için elektromanyetik alan (mG) değeri Avrupa Konseyi Tavsiye Kararı olan 1000 mG değerinden çok daha düşük seviyelerdir.

Sonuç olarak elektromanyetik alanların biyolojik yaşam üzerine olumsuz etkileri henüz kanıtlanmamış olmakla birlikte günlük hayatımızda sıkça kullandığımız elektrikli ev aletlerinin yaydığı elektromanyetik alan şiddetlerinin bile enerji iletim hatlarına göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

7.14. Doktora Döneminde Tez Konusuyla İlgili Uluslararası Yapılan Çalışmaların Katılım ve Onay Sertifikaları

PIERS 2021 in Hangzhou

Photonics & Electromagnetics Research Symposium
also known as Progress In Electromagnetics Research Symposium

PIERS OFFICE

The Electromagnetics Academy (TaxID: 043063830)
Suite 207, 777 Concord Avenue
Cambridge, MA 02138, USA
Email: office@piers.org
www.piers.org

November 26, 2021

■ Participation Certificate for PIERS 2021 in Hangzhou

This letter certifies that Dr. Turan Cakil participated in the Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS) held in Hangzhou, China on November 22, 2021.

PIERS Registration Fee includes entrance to the Technical Sessions and Discussion Area, Coffee Break, the PIERS Program and handouts. It does not include any other meal or lodging cost.

Sincerely yours,

Hongsheng Chen
General Chair
PIERS 2021 in Hangzhou

7.15. Doktora Döneminde Tez Konusuyla İlgili Uluslararası Yapılan Çalışmaların Katılım ve Onay Sertifikaları-2



ÖZGEÇMİŞ

TURAN ÇAKIL

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2018-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., Elektrik-Elektronik Müh. ABD. Antalya
Yüksek Lisans 2015-2017	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., Elektrik-Elektronik Müh. ABD. Antalya
Lisans 2010-2015	Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Antalya
Ön-Lisans 2019-2021	Anadolu Üniversitesi Açık Öğretim Fakültesi, Adalet Programı

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Uzman/Müfettiş 2023-Devam Ediyor	T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı- BTGM Gelir İdaresi Başkanlığı Uygulama ve Veri Yönetimi Daire Başkanlığı Yazılım Geliştirme ve Proje Yönetimi Müdürlüğü Ankara
-------------------------------------	---

IT-Sistem Yöneticisi/Uzman Yd. 2018-2023	T.C. Hazine ve Maliye Bakanlığı – BTGM Gelir İdaresi Başkanlığı Uygulama ve Veri Yönetimi Daire Başkanlığı Bilgi Teknolojileri ve Bilgi Güvenliği Müdürlüğü Ankara
---	--

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Cakil T, Carlak H F, Özen S, 2015. Modelling of Power Network System of the High Voltage Substation: A Simulation Study. International Journal of Engineering and Applied Sciences, (IJEAS) Vol.7, Issue 3(2015) 39-57.
- 2- Cakil, T.; Carlak, H.F.; Ozen, S. The Indirect Effect of Lightning Electromagnetic Pulses on Electrostatic, Electromagnetic Fields and Induced Voltages in Overhead Energy Transmission Lines. Appl. Sci. 2024, 14, 3090

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Yıldırım Elektromanyetik Darbesinin Etkisine Karşı Dış Korunmanın Önemi, Elektrik Mühendisleri Odası (Chamber of Electrical Engineers) 2023 (4), 15-19
- 2- Türkiye’de Elektrik Enerjisi Gelişimi ve Tarihi, Elektrik Mühendisleri Odası (Chamber of Electrical Engineers) 2023 (3), 27-30
- 3- Analysis of Acoustic Waves on Living-inanimate Media Surfaces Using Finite Differences Time Domain Method, 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2433-2441.
- 4- Driveline Infection Detection in Left Ventricular Assist Device Implanted Patients Using Image Processing Methods, 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS),1559-9450.
- 5- Protection against Lightning Electromagnetic Pulses Using Surge Arresters: A Simulation Study for the Realistic High-voltage Power Line Region, 2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2465-2473.
- 6- Analysis of pressure and velocity effects of acoustic waves on different ambient surfaces using FDTD Method, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 8 (3), 844-855.
- 7- Protection Analysis of Surge Arresters and Isolators Against Overvoltages Caused by Lightning Electromagnetic Pulses, International Conference on Advances and Innovations in Engineering (ICAIE), Fırat University, 2018.

8- Güneş Enerji Santrallerinin Ulusal Şebeke'ye Bağlı Olarak Modellenmesi ve Analizi, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu 1 (1), 136-143, 2017.

9- Yıldırım Elektromanyetik Darbesinin Enerji Tesislerinde Meydana Getirdiği Geçici Olayların Analizi ve Koruma Önlemleri, Elektrik Mühendisleri Odası, V. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre, 2017.

10- The analysis of transient phenomena on power transmission lines due to lightning electromagnetic pulses, 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring (PIERS), 3000-3005. 2017.

11- Yüksek Gerilim Güç Hatlarının Matlab Simulink ile Modellenmesi: Kısa Devre Hata Analizi, Elektrik Mühendisleri Odası, IV. Elektrik Tesisat Ulusal Kongre, 2015.

12- Android cihazlar ile DC motor kontrolü, TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, EMO Bilimsel Dergi, vol. 4/7, 2014.