



YILDIRIM KAYNAKLI ENERJİ İLETİM HATTI ARIZALARININ İZOLATÖR BOYU VE TOPRAKLAMA DİRENCİ AÇISINDAN SINIR DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Ahmet Yaşar YOLDAŞ^{1,2*}, Hamza Feza CARLAK¹, Şükrü ÖZEN¹

¹ Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye
² TEİAŞ Genel Müdürlüğü, 19. Bölge Müdürlüğü, Tesis ve Kontrol Müdürlüğü, Antalya, Türkiye

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Yıldırım, İletim hattı, Kesinti, Bergeron, Topraklama.</i>	Yıldırım, doğanın en etkileyici fiziksel fenomenlerinden biri olarak, yüksek enerjiye sahip elektriksel boşalma olarak tanımlanabilir. Dünya üzerinde 3 milyar yıldan beri var olduğu düşünülen ve kontrolsüz elektrik hareketi olarak özetlenebilecek yıldırım, havai enerji iletim hatları için en büyük arıza kaynağıdır. Bu çalışmada işletmede bulunan ve yıllık bazda en fazla yıldırım alan mevcut enerji iletim hattı karakter özellikleriyle (direk temel topraklama direnci, izolatör boyu, koruma iletken tipi, iletken tipi) Bergeron Yöntemi ile PSCAD kullanılarak modellenmiştir. Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan yıldırım verilerine göre hangi yıldırım şiddetinde hatta arızanın meydana geldiği ve hattın enerjisiz kaldığı belirlenmiştir. Hattın işletmecisinden mesafe koruma rölesi arıza bilgileri alınarak arızanın olduğu direk belirlenmiştir. Bu veriler ışığında hazırlanan modele değişik akım şiddetlerinde yıldırım enjekte edilerek, yıldırım akım şiddeti, direk topraklama direnci ve izolatör boyu arasında korelasyon elde edilmiştir. Bu korelasyon sonucunda yıldırım akım şiddetine bağlı olarak, hangi izolatör boyunda ve direk toprak değerinde hatların enerjisiz kalıp kalmayacağı belirlenmiştir.

DETERMINATION OF LIMIT VALUES OF LIGHTNING-INDUCED POWER TRANSMISSION LINE FAULTS DUE TO INSULATOR LENGTH AND GROUNDING RESISTANCE

Keywords	Abstract
<i>Lightning, Transmission line, Outage, Bergeron, Grounding.</i>	Lightning, a spectacular natural phenomenon, can be defined as a high-energy electrical discharge. Existing on Earth for an estimated 3 billion years and characterized as uncontrolled electrical movement, lightning is a major cause of failures in overhead power transmission lines. This study models an existing power transmission line—the one experiencing the highest number of lightning strikes annually within the power company—using its characteristics (grounding resistance of the tower, insulator length, protective conductor type, conductor type) and the Bergeron Method within the PSCAD simulation software. Using lightning data obtained from the Regional Meteorological Directorate, the study determines the lightning intensity at which faults occur on the line, causing power outages. Fault location data from the line operator's distance protection relay is used to identify the specific tower where the fault occurred. By injecting lightning strikes of varying current intensities into the developed model, a correlation was established between lightning current intensity, tower grounding resistance, and insulator length. This correlation determined the insulator length and tower grounding resistance thresholds at which power outages are likely to occur depending on the lightning current intensity.

Alıntı / Cite

Yoldaş, A.Y., Carlak, H.F., Özen, Ş., (2025). Yıldırım Kaynaklı Enerji İletim Hattı Arıza Sebeplerinin İzolatör Boyu ve Topraklama Direnci Açısından Sınır Değerlerinin Belirlenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(1), 286-305.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process
A.Y. Yoldaş, 0000-0003-4852-4076	Başvuru Tarihi / Submission Date 07.01.2025
H.F. Carlak, 0000-0002-8561-4591	Revizyon Tarihi / Revision Date 06.02.2025
Ş. Özen, 0000-0002-5538-6786	Kabul Tarihi / Accepted Date 11.03.2025
	Yayın Tarihi / Published Date 20.03.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: ahmetyoldas@gmail.com, +90-242-346-5055

DETERMINATION OF LIMIT VALUES OF LIGHTNING-INDUCED POWER TRANSMISSION LINE FAULTS DUE TO INSULATOR LENGTH AND GROUNDING RESISTANCE

Ahmet Yaşar YOLDAŞ^{1,2†}, Hamza Feza CARLAK¹, Şükrü ÖZEN¹

¹ Akdeniz University, Engineering Faculty, Department of Electrical and Electronics Engineering, Antalya, Türkiye
TEİAŞ General Directorate, 19. Regional Directorate, Facility and Control Department, Antalya, Türkiye

Highlights

- The current intensity of the lightning strike on the transmission line was determined by comparing data from the Regional Meteorology Directorate and transmission line data with high fault indices.
- The existing power transmission line with the highest annual lightning strikes was modeled using PSCAD, incorporating its characteristic features such as pole grounding resistance, insulator length, shielding type, and conductor type.
- By injecting lightning at different current intensities into the model, a correlation was established between lightning current intensity, pole grounding resistance, and insulator length, determining under which conditions power outage would occur.

Graphical Abstract

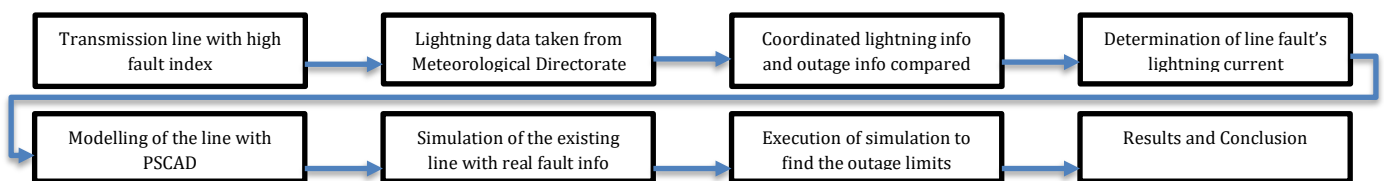


Figure. Flowchart of the Study

Purpose and Scope

Transmission line faults, predominantly caused by lightning strikes, result in significant power outages and economic losses. This study aims to investigate the correlation between lightning current intensity, tower grounding resistance, and insulator length in determining the susceptibility of transmission lines to lightning-induced failures. The study focuses on a transmission line, known for its high incidence of lightning strikes, analyzing the relationship to identify optimal parameters for improved lightning protection.

Design/methodology/approach

The research utilizes a PSCAD/EMTDC simulation model of the line, incorporating its actual characteristics including pole grounding resistance, insulator length, shielding type, and conductor type. Lightning data obtained from the Regional Directorate of Meteorology was used to establish a baseline for failure analysis. By injecting lightning impulses of varying current intensities into the model, the impact on the transmission line was assessed. Distance protection relay fault information from the line operator was used to pinpoint affected towers, validating the simulation results. Analysis was employed to determine the correlation between lightning current intensity, grounding resistance, and insulator length in causing line faults.

Findings

The simulations revealed a strong correlation between lightning current intensity, pole grounding resistance, and insulator length. Specifically, increasing grounding resistance above 19Ω significantly increased the probability of failure. Similarly, insulators shorter than 1660mm were more prone to flashover. The analysis identified specific thresholds for each parameter, indicating safe operating ranges to minimize lightning-induced faults.

Research limitations/implications

This research is limited to the specific characteristics of the transmission line. Extrapolation to other lines requires consideration of their local parameters such as grounding resistance, tower type, insulator length.

Practical implications (if applicable)

The findings of this study can be directly applied to improve the design and maintenance of transmission lines to enhance lightning protection. The identified thresholds for grounding resistance and insulator length provide valuable guidance for optimizing line design and mitigating the risk of lightning-induced faults. This can lead to reduced power outages, improved grid reliability, and significant cost savings.

Originality

The originality of this work lies in the detailed analysis of the relationship between lightning current intensity, tower grounding resistance, and insulator length using a validated PSCAD model of a specific high-risk transmission line. This provides specific, actionable data for engineers and utilities to improve lightning protection strategies in similar high-risk environments. The findings offer valuable insights for improving grid resilience and reducing the economic and social impacts of lightning strikes.

[†] Corresponding author: ahmetyoldas@gmail.com, +90-242-346-5055

1. Giriş (Introduction)

Yıldırım, dünya üzerinde yaklaşık 3 milyar yıldır var olduğu düşünülen en ilginç doğa olaylarından biridir. Eski Yunanlar, yıldırımın Zeus'un silahı olduğuna inanır ve bilgelik tanrıçası Minerva'nın bunu icat ettiğini düşünürdü. Tanrıların bir tezahürü olarak kabul edilen yıldırımın düştüğü yerler kutsal sayılırdı. Yıldırıma, İskandinav mitolojisindeki Thor'dan, panteistik Hindu inanışındaki Indra'ya kadar dünyanın hemen her yerinde kutsallık, sağlık, bereket ve şeytanları kovma gibi birçok anlam yüklenmiştir.

Dünya genelinde her yıl ortalama 8-9 milyon yıldırım gözlemlenmektedir (Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman, 2014). Buna bağlı olarak yıldırım çarpması nedeniyle yaklaşık 24.000 kişi hayatını kaybetmekte, on katı kadar insan ise yaralanmaktadır (Holle, 2008). Türkiye'de ise yıldırım kaynaklı ölüm sayısının yılda ortalama 400 olduğu tahmin edilmektedir (Kadioğlu, 2012). Yıldırım, can güvenliğinin yanı sıra konut ve endüstriyel elektrik tedarikini aksatabilecek kesintilere de yol açmaktadır. Modern yıldırım araştırmalarının temeli, Benjamin Franklin'in 1752'deki meşhur uçurtma deneyinde yıldırımın elektrik kaynaklı bir fenomen olduğunu kanıtlanmasına dayanır (Jernegan, 1928).

Yıldırım, havai enerji iletim hatlarında meydana gelen arızaların başlıca nedenlerinden biridir. Yüksek gerilim enerji iletim hatları, üretilen enerjiyi en az kayıpla tüketim merkezlerine ulaştırmayı amaçlar. Ancak yıldırım çarpması, hattın enerjisinin kesilmesine ve şebekede harmonikler, frekans dalgalanmaları gibi istenmeyen etkilere yol açabilir. Eğer yıldırım, indirici veya yükseltici merkeze yakın bir noktaya isabet ederse, yıldırımın şiddetine bağlı olarak yüksek gerilim anahtarlar elemanları (kesici, ayırıcı), ölçü transformatörleri (akım ve gerilim transformatörleri), parafudrlar ve hatta güç transformatörleri zarar görebilir (Ravaglio, ve diğerleri, 2019).

Türkiye'de ortalama yıldırım yoğunluğu 0,5-1,7 yıldırım/km²yıl iken, bu oran Antalya'dan Muğla'ya kadar Akdeniz kıyısında 4,4-7,1 yıldırım/km² yıla çıkmaktadır (Öztopal, 2017). Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden (MGM) alınan verilere göre Antalya sınırlarında 2015-2022 arası 360.000'den fazla yıldırım gözlenmiştir. Bugüne kadar dünya üzerinde ölçümlenen en yüksek yıldırım gerilimi 1,3 milyar volt (GV) olarak belirlenmiştir (Marshall & Stolzenburg, 2001). Küresel ısınmanın artması ile her yıl gözlenen yıldırım sayısında %10'luk bir artışın beklendiği görülmektedir (Price, 2009). Bu çalışmanın temelini oluşturan yüksek gerilim işletme operatöründen alınan bilgilere göre 2015 -2022 yılları arasında havai hatlarda Antalya sınırları içinde 713 yıldırım kaynaklı arıza tespit edilmiştir ve küresel ısınmayla birlikte bu sayının artacağı da öngörülmektedir.

Enterkonnekte sistemin temeli olan hatların işletilmesindeki en büyük problemi yıldırım oluşturmaktadır. Hatların yıldırıma karşı korunması, işletme esnasında problem yaşanmaması, yıldırıma maruz kalınması halinde elektrik sisteminde sorun yaşanmaması enerji arz ve güvenliği için çok önemlidir. Yıldırımın oluşturduğu istenmeyen harmonikler, gerilim ve frekans dalgalanmaları, kesintiler enerjinin akışındaki arz ve güvenlik için en önemli tehdittir (Agrawal & Nigam, 2014). Bu çalışmanın temelini hatların yıldırıma karşı ne gibi analizler yapılarak korunması gerektiği ve yıldırıma karşı alınması gereken proaktif önlem olarak nitelendirilebilecek unsurların neler olması gerektiği sorgulanmaktadır.

Yıldırımın havai hatta düşmesi sonucu direkt istenmeyen elektriksel yük oluşur. Bu yükün en hızlı yolla toprağa akararak devresini tamamlaması gerekir. Direk üzerindeki bu istenmeyen yükün oluşturduğu gerilim izolatörün yalıtkanlık seviyesini geçtiği anda geri atlama (Back Flashover) meydana gelir. İzolatör yüzeyinden iletken doğru akım akmaya başlar (Hardi vd, 2021). Hatta akan kontrolsüz akımın oluşturduğu iletken kanal istenmeyen yük boşalana kadar devam eder. Boşalma tamamlandıkça iyonize olan havanın yardımıyla ters yönde hattın toprağa doğru akım akmaya başlar. Bu noktada hattın gerilim bilgisini kontrol eden gerilim transformatörüne gelen bilgi sonucunda ilgili röle devreye girerek hat kesicisine devreyi açma sinyali gönderir ve hattın enerjisi kesilir (Nguyen & Holt, 2003). Bu duruma karşı yapılabilecek önlemlerin başında direk topraklama direncinin düşürülmesi (Chisholm & Petrache, 2010) ya da izolatör boyutunda değişikliklerin yapılması gelmektedir (Visacro vd., 2021).

Bu çalışmada örnek olarak seçilen ve işletmede bulunan enerji iletim hattı (154kV Oymapınar – Mahmutlar EİH) Antalya sınırları içinde en yüksek yıldırım maruziyetine sahip olan hattır. MGM'den alınan akım şiddeti, tarihi, saati ve koordinatı bilinen yıldırım verileri ile hat güzergahı üst üste bindirilmiştir (MGM, 2025). Hattın üzerine düşen yıldırım verileri filtrelenerek, hattın işletmecisinden alınan arıza verileriyle karşılaştırılmıştır. Arıza verilerinin tarih, saat ve km bilgileri ile eşleştirilen arızalar filtrelenmiştir. Tespit edilen arıza noktalarındaki direklere ait topraklama dirençleri, izolatör boyu, direk tipi, iletken ve koruma teli kesit bilgileri belirlenmiştir. Yıldırımın düştüğü noktadaki hat ve direk bilgileri ile eşleştirilen yıldırım verisinden akım bilgisi alınarak hattın kısmi olarak modellenmesi PSCAD ortamında yapılmış ve yaşanan arızalar tekrar simüle edilmiştir. Yıldırım kendi içinde geçici durum olarak değerlendirilmekte olup bunu için geçici durum analizi (Transient Analiz) yapılmıştır. Geçici durum analizinde noktasal dağıtılmış parametreler kullanılmış olup, bu parametreler için Bergeron Yöntemi seçilmiştir. Hazırlanan simülasyonun gerçek verilerle kontrolü yapılmıştır. Yapılan kontrol sonucu modelin

sağlıklı çalıştığı tespit edilmiştir. Farklı akım şiddetinde yıldırımlar, farklı topraklama direncine sahip ve değişik izolatör boylarında simülasyonlar tekrar denenmiştir. Önce yıldırım şiddeti sabit tutularak topraklama değeri ve izolatör boyu değiştirilerek hangi izolatör boyunda kaç ohm değerde hatta arıza yaşanacağı tespit edilmiştir. Devamında direk topraklama direnci sabit tutularak yıldırım şiddeti ve izolatör boyunda değişikliklere gidilerek hangi topraklama direncinde arıza yaşanacağı belirlenmiştir. Son olarak ise izolatör boyu sabit tutulmuş ve topraklama direnç yıldırım şiddetinde değişiklik yapılarak hangi boyda izolatörün hangi yıldırım şiddetinde kullanılacağı tespit edilerek bu durumlara ilişkin oluşturulan senaryolara çözüm önerileri sunulmuştur.

Çalışmanın devamı olan ikinci bölümde literatür taraması yapılarak, konuya ilişkin yapılan benzer çalışma örnekleri sunulmuş ve bu çalışmanın literatüre katkısından bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde neden Bergeron yöntemi kullanılması gerektiğinden bahsedilmiştir. Ayrıca geçici durum analizleri ve kullanılan hat modeline ilişkin gerekli bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde hazırlanan PSCAD modeline ilişkin bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde ise modelin sonuçlarına ilişkin tablolar ve sayısal sonuçlar paylaşılmıştır. Son bölümde ise genel değerlendirme yapılarak çalışmanın sınırları, faydaları ve gelecekte yapılacak çalışmalara ilişkin sonuçlar için önerilerde bulunulmuştur.

2. Kaynak Araştırması (Literature Survey)

Enerji iletim hatlarının yıldırımdan korunmasına yönelik çalışmalar geniş bir literatüre sahiptir. Konuyla ilgili bazı önemli çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Literatürde Bulunan Konuya İlişkin Bazı Çalışmalar (Some Studies On The Subject In The Literature)

YAZARLAR - YILI	ÇALIŞMANIN KAPSAMI	YAKLAŞIM NOKTASI
(Alves, ve diğerleri, 2025)	Yıldırım erken uyarı sistemleri için karar destek mekanizması	Otomatik karar destek sistemi
(Dan, ve diğerleri, 2024)	Yüksek arazilerdeki direk topraklama elektrotlarının performansı	Method of Moments ve 3-probe
(Chowdhuri & Gross, 1967)	Havai hatlarda yıldırım geri dönüş darbesi	Bipolar dalga
(Chowdhuri P., 1990)	Çoklu iletkenli havai hatlarda yıldırım darbesi	Koruma telinin fonksiyonu
(Cooray, 1994)	Yıldırım kaynaklı aşırı gerilimler	Kublaj modeli
(Djalel, H., & Fayçal, 2007)	Yıldırım geri dönüş darbesinin oluşturduğu elektromanyetik alan	Yıldırım kanal modellemesi
(Erduman & Yıldız, 2019)	IEC62305-2’ye göre yıldırım risk analizi	Risk Analizi
(Chisholm, ve diğerleri, 2010)	Yıldırımın hatlardaki güç kalitesine etkisi	Topraklama ve Zed-Metre
(Luo, 2014)	Yıldırıma karşı korumada topraklama tekniği geliştirilmesi	Yanal topraklama kazığı
(Silveira, ve diğerleri, 2017)	Hibrit elektromanyetik model ve Yıkıcı etki modeli ile topraklama direnç sınırlandırması	BFOR Geri atlama kesinti oranı
(Martínez-Velasco & Castro-Aranda, 2010)	EMTP Zaman domeninde izolatör ve diğer malzeme tercihi için analiz	Monte Carlo yöntemi
(Izadi, ve diğerleri, 2017)	Yıldırıma karşı havai hatlarda izolatör seçiminde cam, seramik ve polimer karşılaştırması	Sonlu elemanlar yöntemi
(Malelak & Zoro, 2017)	Doğrudan yıldırım darbesi, koruma teli arızası ve topraklama direnci	EMT
(Tiliev-Tanriover, ve diğerleri, 2015)	Türkiye’de yıldırım çarpmalarına bağlı yaralanma ve ölümler	Yıldırımın toplumsal etkileri
(Yoldaş & Özen, 2023)	Havai hatların güzergâh seçiminde yıldırım faktörü	Yıldırım yoğunluk haritaları
(Yücelbaş, ve diğerleri, 2021)	Meteorolojik parametrelerle yıldırım tahmini	Yıldırım erken uyarı sistemi
(Yan, Vukovic, & Sewell, 2024)	Yıldırım sonrası plazma oluşumu ve Elektromanyetik alan	Elektrotermal model

2.1. Yıldırımın Enerji İletim Hatlarına Etkisi (Impact of Lightning on Power Transmission Lines)

Yıldırım, havai enerji iletim hatlarında aşırı gerilimler oluşturarak sistem arızalarına, enerji kesintilerine ve ekipman hasarına neden olmaktadır. Çeşitli araştırmalar, yıldırımın enerji iletim hatlarına etkisini farklı açılardan incelemiştir. Bunların başında (Djalel, H., & Fayçal, 2007), yıldırımın oluşturduğu elektromanyetik alanların enerji iletim hatlarında neden olduğu aşırı gerilimleri analiz etmiştir. Çalışma, izolatörlerin yalıtım koordinasyonunun iyileştirilmesi gerektiğini vurgulamakta ve yıldırımın geri dönüş darbesi modellemelerini karşılaştırmaktadır. Ancak, farklı yıldırım akım seviyelerinin izolatör boyu ve direk topraklama direnciyle nasıl etkileşime girdiği bu çalışmada ele alınmamıştır. Bir diğer çalışmada ise (Luo, 2014), enerji iletim hatlarını yıldırımdan korumada topraklama sistemlerinin önemini vurgulamış ve yanal topraklama kazıkları ile koruma performansının

artırılabilceğini göstermiştir. Ancak, topraklama direncinin yıldırım akım şiddetiyle nasıl değiştiği detaylı şekilde incelenmemiştir. Türkiye ölçeğinde yapılan çalışmalardan biri olan (Yoldaş & Özen, 2023), havai hat güzergâh seçiminde yıldırım yoğunluk haritalarının kullanılmasını önermektedir. Çalışma, yıldırım istatistiklerine dayalı olarak hat tasarımında proaktif önlemler alınmasının önemini vurgulamakta, ancak izolatör ve topraklama direnci parametreleri üzerine odaklanmamaktadır.

Yıldırımın havai hatlarda geri dönüş darbesi oluşturduğunu ve bunun aşırı gerilimlere neden olabileceğini (Chowdhuri & Gross, 1967) göstermiştir. Daha sonra (Chowdhuri P., 1990), çoklu iletkenli havai hatlarda yıldırım darbelerinin nasıl yayıldığını incelemiş ve koruma tellerinin etkisini analiz etmiştir. Yıldırım çarpmasının fiziksel ve elektromanyetik etkilerini inceleyen bir diğer çalışma ise (Yan, ve diğerleri, 2024) tarafından önerilen iki boyutlu elektrotermal modeldir. Bu model, yıldırım çarpması sırasında oluşan plazma kanalını Drude modeli kullanarak simüle etmekte ve elektromanyetik alan ile sıcaklık değişimlerini zaman içinde analiz etmektedir. Bu tür simülasyonlar, havai enerji iletim hatlarında yıldırım sonrası oluşabilecek aşırı gerilimlerin ve ısınma etkilerinin daha gerçekçi şekilde incelenmesine olanak tanımaktadır. (Yan, ve diğerleri, 2024) çalışması bu çalışmanın devamında gelecek araştırmalar için yön gösterici olacaktır.

(Cooray, 1994) çalışmasında ise yıldırım kaynaklı aşırı gerilimleri öngörmek için kullanılan mevcut modelleri kıyaslamış ve bazı modelleme yöntemlerinin eksikliklerini vurgulamıştır. Daha güncel çalışmalardan biri olan (Yücelbaş, ve diğerleri, 2021), meteorolojik parametreleri kullanarak yıldırım düşme mesafesini tahmin etmeye yönelik bir model geliştirmiştir. Bu çalışma, yıldırımın düşme olasılığını öngörmeye yönelik önemli bir katkı sağlasa da enerji iletim hatlarının yıldırıma karşı korunması açısından spesifik mühendislik çözümleri sunmamaktadır. Standartlar üzerinden (Erduman & Yıldız, 2019) tarafından yapılan bir diğer çalışma, IEC 62305-2 standardına göre yıldırım risk analizlerini ele almış ve bir üniversite kampüsü için yıldırım risk değerlendirmesi yapmıştır. Ancak bu çalışma, doğrudan enerji iletim hatları üzerinde değil, bina ve tesisler açısından risk analizi sağlamaktadır. Türkiye’de yıldırım kaynaklı ölüm ve yaralanmalar üzerine yapılan bir analizde, (Tiliev-Tanriover, ve diğerleri, 2015), 1930-2013 yılları arasında Türkiye’de yıldırım çarpması nedeniyle 1000’den fazla ölüm vakasının rapor edildiğini belirlemiştir. Ölümün büyük çoğunluğu açık alanlarda meydana gelmiştir. Çalışma, yıldırımın genel etkilerine dair kapsamlı bir istatistiksel analiz sunmaktadır; ancak mühendislik çözümleri açısından doğrudan bir öneri içermemektedir.

2.2. Yıldırımdan Korunma Stratejileri (Lightning Protection Strategies)

Enerji iletim hatlarını yıldırımdan koruma stratejileri, genellikle topraklama sistemlerinin iyileştirilmesi, izolatör tasarımının optimize edilmesi ve yıldırım erken uyarı sistemlerinin kullanılması üzerine yoğunlaşmaktadır. (Chisholm, ve diğerleri, 2010), iyileştirilmiş topraklamanın koruma telleri ile kullanılması halinde yıldırım kaynaklı arızaların önemli ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir ancak mevcut topraklama hesaplama ve ölçüm yöntemleri, özellikle eğimli ve yüksek rakımlı arazilerde önemli hatalara neden olabilmektedir. (Dan, ve diğerleri, 2024) tarafından yapılan çalışma, kule topraklama elektrotlarının yüksek rakımlı arazilerde nasıl farklı davrandığını ve yaygın olarak kullanılan 3-probe yöntemi ile yapılan ölçümlerin bu tür arazilerde doğruluk açısından sınırlamalar taşıdığını ortaya koymuştur. Çalışma, eğimli arazilerde geleneksel topraklama hesaplama yöntemlerinin kullanılması durumunda, yıldırımın oluşturduğu gerilim yükselmelerinin yanlış değerlendirilebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, yıldırım çarpmasının etkilerini en aza indirebilmek için doğru ölçüm ve hesaplama yöntemleri geliştirilmelidir. Ancak, bu çalışmada hangi topraklama direnci seviyelerinde arızaların tamamen önlenebileceği belirtilmemiştir. (Martínez-Velasco & Castro-Aranda, 2010), EMTP simülasyonları kullanarak farklı izolatör tiplerinin yıldırım dayanıklılığı üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Bulgular, izolatörlerin mekanik yapısının yıldırım karşısında büyük önem taşıdığını göstermiştir. Ancak, bu çalışmada farklı yıldırım akım seviyelerine göre optimal izolatör boyu belirlenmemiştir. Farklı bir strateji olarak (Izadi, ve diğerleri, 2017), cam, seramik ve polimer izolatörlerin yıldırıma karşı dayanıklılığını karşılaştırmış ve polimer izolatörlerin daha üstün performans gösterdiğini tespit etmiştir. Ancak, bu çalışma yalnızca malzeme özelliklerine odaklanmış olup, izolatör boyu ve direk topraklama direncinin yıldırım performansına etkisini incelememiştir. (Alves, ve diğerleri, 2025) tarafından yapılan güncel çalışmada, otomatik karar destek sistemleri kullanılarak yıldırım erken uyarı sistemleri geliştirilmiştir. Çalışma, meteorolojik ve elektriksel verileri analiz ederek olası yıldırım düşme noktalarını tahmin etmeye odaklanmaktadır. Ancak, bu modelin enerji iletim hatlarında nasıl uygulanabileceği ayrıntılı şekilde ele alınmamıştır.

2.3. Mevcut Literatürdeki Eksiklikler ve Bu Çalışmanın Katkısı (Gaps in the Existing Literature and Contribution of This Study)

Yukarıda özetlenen çalışmalar, yıldırımın enerji iletim hatlarına etkilerini ve yıldırımdan korunma yöntemlerini kapsamlı şekilde ele almaktadır. Ancak, literatürde belirli yıldırım akım seviyelerinde hangi izolatör boyu ve topraklama direnci kombinasyonunun optimal koruma sağladığına dair eksiklikler bulunmaktadır.

Bu çalışma, bu eksiklikleri gidermek amacıyla aşağıdaki katkıları sunmaktadır:

- Farklı yıldırım akım seviyeleri için optimal izolatör boyu ve direk topraklama direnci sınırlarını belirlemek
- Bergeron yöntemi ve PSCAD simülasyonlarını kullanarak, enerji iletim hatlarının yıldırıma karşı hassasiyetini mühendislik temelli verilerle ortaya koymak
- Gerçek hat verileri kullanılarak, yıldırım şiddeti ile arıza oluşum eşiği arasındaki korelasyonu modellemek

Bu bağlamda, çalışma enerji iletim hatlarının yıldırımdan korunmasına yönelik daha kesin mühendislik parametreleri sunarak mevcut literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

3. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Yıldırım, mikrosaniye mertebesinde yüksek akım (kiloamper) ve gerilim atlaması (megavolt) oluşturan ani bir elektriksel boşalmadır. Bu boşalmalar, enerji iletim hatlarında geçici durum etkilerine neden olur. Bu nedenle, yıldırım kaynaklı arızaların analizinde geçici durum tepkilerinin modellenmesi büyük önem taşır. Bir sistemin geçici durum cevabı, giriş sinyalinin uygulanmasından durağan hale gelene kadar geçen süreçte gösterdiği davranıştır. Yüksek gerilim elemanlarının analizi için her bileşenin uygun bir güç sistemi içinde modellenmesi gerekmektedir (Yu & Watson, 2007; Farzanehrafat & Watson, 2013). Elektrik güç sistemleri; kaynak (generatör), güç transformatörü, iletim hattı ve yük bileşenlerinden oluşur (Özen, 2017). Bu bileşenlerin her biri, geçici durum analizinde belirleyici bir rol oynar. İletim hatları uzunluklarına göre sınıflandırılır (Enyong, 2017). İletim hatları, uzunluklarına bağlı olarak kısa, orta ve uzun mesafeli hatlar şeklinde sınıflandırılır. 0-80km arası olan kısa iletim hattı modelinde hat bir direnç ve ona seri bağlı bir bobinle modellenir. 80-240km arası orta uzunluktaki iletim hatları nominal π ve T eşdeğer devreleriyle ifade edilir. 240km ve üstü olan hatlar ise uzun iletim hattı olarak tanımlanırken, hat sabitlerinin homojen olarak dağıldığı modellerle analiz edilir (Leonidopoulos, 2019).

Uzun iletim hattı modeli, farklı hat uzunlukları için kullanılabilir. Daha kesin analizler yapmak için gezen dalga teorisine dayalı dağıtılmış hat modeli tercih edilir (Junzhang & Zhonghui, 2010; Zhong, ve diğerleri, 2014). Kısa mesafeli hatlar için de dağıtılmış parametrelere dayanan π modeli uygulanabilir (Yu & Watson, 2007; Monzani, 2012). Geçici durumların analizi için kullanılan Bergeron Modeli'nde, iletim hatlarının noktasal dağıtılmış parametreleri ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Junzhang & Zhonghui, 2010; Shariatinasab & Gholinezhad, 2017).

3.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Geçici durum analizinde yaygın olarak kullanılan Bergeron Modeli, iletim hatlarının noktasal dağıtılmış parametrelerini temel alır (Junzhang & Zhonghui, 2010). Bu model, dalga yayılım süresi ve karakteristik empedansı dikkate alarak yıldırım kaynaklı aşırı gerilim ve akım değişimlerini hesaplar (Watson & Arrillaga, 2003). Frekans Bağımlı Model, iletim hattı parametrelerinin frekansa bağlı değişimini dikkate alarak yüksek frekanslı bileşenleri daha ayrıntılı analiz edebilir. Ancak bazı dezavantajları vardır. Daha karmaşık matematiksel işlemler gerektirir ve PSCAD gibi simülasyon yazılımlarında hesaplama süresini uzatır. Yüksek frekanslı bileşenler için avantaj sağlasa da, ana şebeke frekansında (50-60 Hz) çalışan güç sistemleri için her zaman kritik değildir.

Bergeron Modeli ise geçici aşırı gerilimlerin analizi için daha stabil ve hesaplama açısından daha verimli bir seçenek sunar. Özellikle enerji iletim hatlarının temel frekans bileşenleri dikkate alındığında, Bergeron Modeli'nin sonuçları, saha ölçüleriyle daha iyi uyumaktadır. Bunun nedeni, bu modelin dalga yayılım süresini ve karakteristik empedansı doğrudan modellemesi, ancak yüksek frekans bileşenleri için gereksiz karmaşıklıkları içermemesidir. Buna ek olarak, PSCAD gibi elektromanyetik transient analizlerinde kullanılan yazılımlarda, Bergeron Modeli'nin numerik stabilitesi daha yüksektir. Frekans Bağımlı Model kullanıldığında bazı durumlarda stabilite sorunları ve hesaplama hataları ortaya çıkabilmektedir. Özellikle uzun süreli simülasyonlar ve karmaşık şebeke modellerinde, Frekans Bağımlı Model yerine daha az hesaplama yükü gerektiren Bergeron Modeli'nin kullanılması pratik mühendislik açısından daha uygundur.

Bu nedenlerle çalışmada Bergeron Modeli kullanılmış ve elde edilen sonuçlar saha verileri ile karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır.

Elektrik güç sistemlerinde RLC (direnç, endüktans, kapasitans) bileşenleri, kısa iletim hatları için genellikle π (π) ve T modelleri ile ifade edilir (Dommel, 1969). Ancak 15 km ve üzeri iletim hatlarında, Bergeron Modeli daha uygun bir yaklaşımdır çünkü dalga yayılım süresi (traveling wave time) çözüm adım süresinden daha büyük hale

gelir (Mamiş vd., 2010). İletim hatları yeterince uzunsa, gezen dalğanın hareket süresi çözüm süresi adımından daha büyük olacaktır. Örneğin; adım zamanı 50 μ s'lik genel bir çözüm durumunda, gezi zamanı için minimum hat uzunluğu limiti c^{-1} 'dir (c ışık hızı: 3×10^8 m/s). Bundan dolayı 15 km'den büyük hatlarda Bergeron Modeli kullanılmaktadır.

Bergeron Modeli'nde dağıtılmış LC (Endüktans ve Kapasite) hattı modeli 2 kavramla tanımlanır. İlki karakteristik empedans $Z_c = \sqrt{l/c}$ diğeri ise faz hızı $v = 1/\sqrt{lc}$ 'dir. l uzunluğu (metre) ve c ışık hızı (m/s) değişkenleri ile tanımlanmış olup, bunlar sırasıyla birim uzunluk başına hat empedansı ve hat kapasitansını temsil etmektedir. Şekil 5, 2 portlu kayıpsız Bergeron Modeli eşdeğer devresidir. Gelen bara ve giden bara arasındaki iletim hattının gezi zamanı, eşitlik 1'de belirtilmiştir (Mamiş vd., 2010). Dalga gezi süresi:

$$\tau = l/v = l/\sqrt{lc} \quad (1)$$

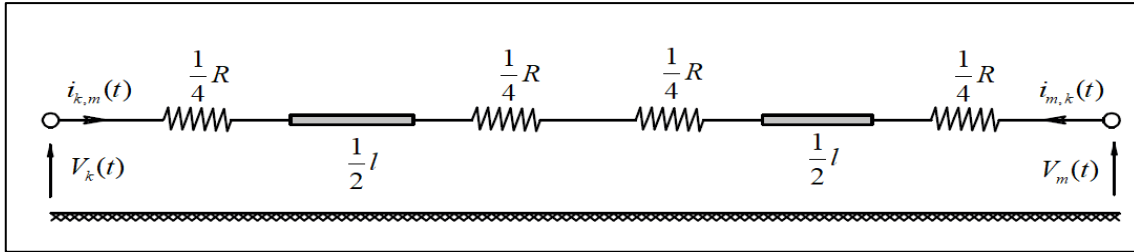
Bu çalışmada standart bir iletim hattı modelinde bulunan kaynağına seri L endüktansı ve paralel RC yükü eklenerek şekil 3 elde edilmiştir (Mamiş vd., 2010) Şekil 3'te kullanılan formüller eşitlik 2 ve 3:

$$\tau = \frac{l}{v} = \frac{l}{\sqrt{\gamma c}} \quad (2)$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2} \quad (3)$$

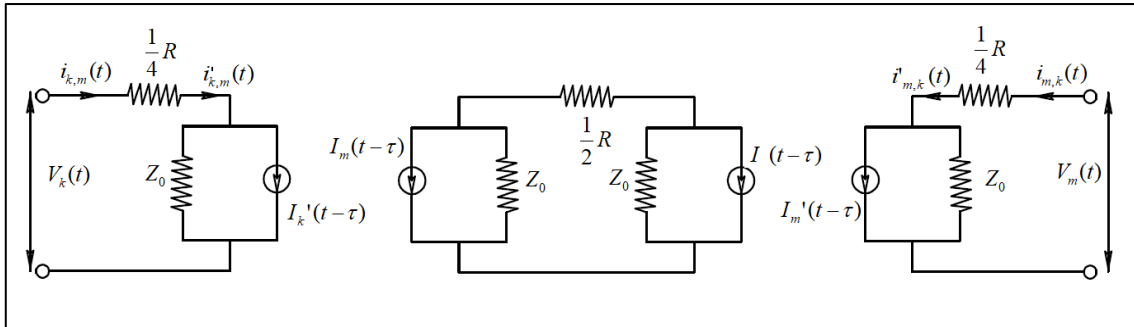
β : Geri dönüş darbe hızının ışık hızına oranı

Bergeron Modeli'nin sağladığı avantajlardan biri de çalışmaya hat direncinin dahil edilmesiyle ortaya çıkar. Bu nokta "Karakteristikler Yöntemi" ile yakından ilişkilidir. Hat boyunca dağıtılmış endüktans ve kapasite (L-C) ile gösterilen ideal modele sistem kayıpları için bir "R" direncini ekleyerek toplu direnç özelliğini dahil eder. Karakteristikler yöntemi üzerine eklenen seri toplu dirençler ile kayıplara daha doğru yaklaşımlar sunmaktadır. Toplam sistem direnci R olarak verildiğinde kayıpsız hat her iki uçta da $\frac{1}{4}R$ direnci olan ikiye ayrılır. Bu kısımlar birleştirildiğinde ortada 2 adet $\frac{1}{4}R$ ve her 2 uçta $\frac{1}{4}R$ toplu dirençleri oluşturur. Burada R iletim sisteminin toplam direnci olup ek direnç elemanları ile sistemin 2 ayrı kısma ayrılmasını şekil 2'de gösterilen kayıpsız hattın norton gösteriminde değişikliğe neden olur.



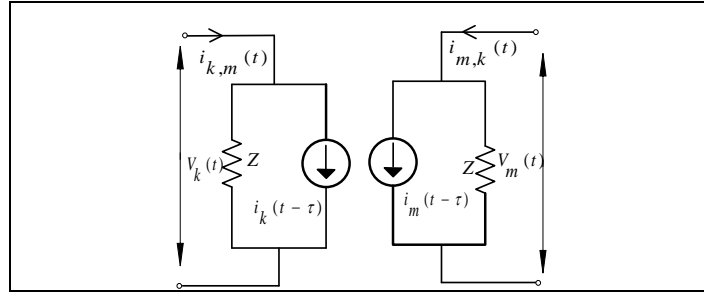
Şekil 2. Toplu direnç dahil edilmiş kayıpsız hat modeli (Loss-Less Line with Lumped Resistance Included)

Toplu hat direncine sahip kayıpsız hat modelinin eşdeğer devresi şekil 3 de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kayıpsız direnç ekli eşdeğer devre (Loss-Less Line with Lumped Resistance Equivalent Circuit)

Şekil 3'teki model 2 bağlantı noktalı olarak tekrar modellenirse şekil 4 elde edilir.



Şekil 4. 1 fazlı EMT Bergeron Modeli Zaman alanı (Single Phase EMTDC Bergeron Model Time Domain Interface)

Hattın her iki ucundaki Norton empedansı Z altta verilmektedir (Özen, Elektrik Elektronik Mühendisliğine Giriş, 2021).

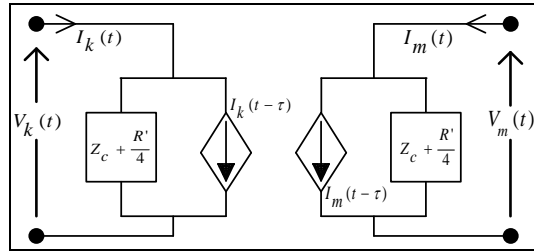
$$Z = Z_0 + \frac{R}{4} \quad (4)$$

Norton empedansı olan Z 'deki değişiklik Norton akım enjeksiyonları I_k ve I_m 'nin tanımına aşağıdaki şekilde yansıtılır:

$$I_k(t - \tau) = \left(\frac{1+H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_m(t - \tau) - H \cdot i_{m,k}(t - \tau)\right\} + \left(\frac{1-H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_k(t - \tau) - H \cdot i_{k,m}(t - \tau)\right\} \quad (5)$$

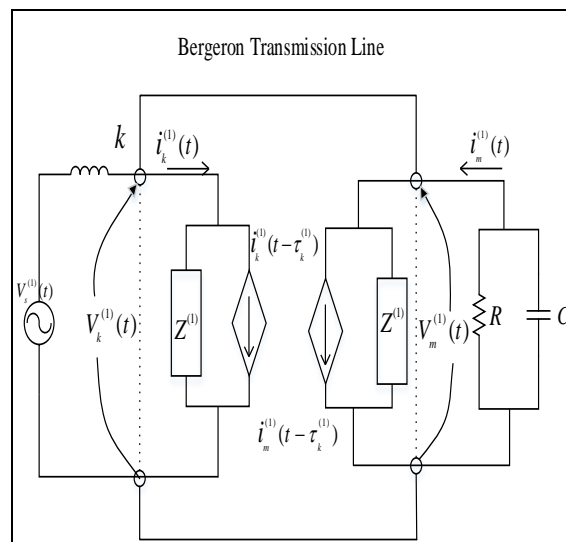
$$I_m(t - \tau) = \left(\frac{1+H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_k(t - \tau) - H \cdot i_{k,m}(t - \tau)\right\} + \left(\frac{1-H}{2}\right) \cdot \left\{-\frac{1}{Z} \cdot V_m(t - \tau) - H \cdot i_{m,k}(t - \tau)\right\} \quad (6)$$

$$H = \frac{Z_0 - \frac{R}{4}}{Z_0 + \frac{R}{4}} \quad (7)$$



Şekil 5. Çift Portlu Kayıpsız Eşdeğer Bergeron Modeli Devresi (Two-Port Lossless Equivalent Bergeron Model Circuit)

Bu çalışmada ele alınan Bergeron iletim hattı modeli, gerilim kontrollü gerilim kaynağı, seri endüktans ve paralel RC yüküyle Şekil 6'te pozitif sekans için tanımlanmıştır (Shariatinasab & Gholinezhad, 2017).



Şekil 6. Pozitif Sekans İletim Hattı İçin Bergeron Eşdeğer Devre Modeli (Bergeron Equivalent Circuit Model for Positive Sequence Transmission Line)

İndüktans akımı ve kapasitör gerilimi durum değişkenleri seçilerek diferansiyel eşitliklerle ifade edilir. Bergeron Modeli için tek fazlı durum eşitlikleri eşitlik 8'deki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_k}{dt} \\ \frac{dv_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{c} \left(\frac{Z+R}{ZR} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ v_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{Z}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s(t) \\ I_k(t-\tau) \\ I_m(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Bağımlı değişken eşitlikleri veya çıkış eşitlikleri, gönderilen uç gerilimi ve alınan uç gerilimleri eşitlik 9'da ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_k \\ i_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k \\ v_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s(t) \\ I_k(t-\tau) \\ I_m(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (9)$$

i_k ve i_m gönderen ve alan uç akımları, V_k ve V_m gönderen ve alan uç bara gerilimleridir. Akım kaynakları, tek ve çok fazlı sistemlerin elektromanyetik transienlerinin analizinde belirtildiği gibi altta kabul edilmiştir (Mamiş vd., 2010) (Watson & Arrillaga, 2003) (Dommel, 1969).

$$I_k(t-\tau) = \frac{-Z_c}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_m(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_m(t-\tau) \right] + \frac{\frac{R'}{4}}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_k(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_k(t-\tau) \right] \quad (10)$$

$$I_m(t-\tau) = \frac{-Z_c}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_k(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_k(t-\tau) \right] + \frac{\frac{R'}{4}}{\left(Z_c + \frac{R'}{4}\right)^2} \left[V_m(t-\tau) + \left(Z_c - \frac{R'}{4}\right) I_m(t-\tau) \right] \quad (11)$$

Karakteristikler yöntemi, kayıpsız (idealize) bir hattın modellenmesi için geçerlidir. Bu yöntemle kayıplı bir hat için de ayrı dirençlerle bağlanmış hatların parçaları incelenir. Efektif hat seri direnci, toplu dirençler ile temsil edilir. Hat zayıflamasının etkisi ise hat uçlarına $R'/4$ ve hattın ortasına $R'/2$ eklenerek ifade edilir. Sonuç olarak, Şekil 2'den şekil 5'teki $Z_c + R'/4$ empedansı üzerinden geçen akımlar belirlenir.

Eşitlik 8 ve 9, iki baralı tek fazlı Bergeron iletim hattı modelinin eşitlik gösterimidir ve üç fazlı sistemler için de kullanılabilir. Bergeron Modeli toprak arızası, aşırı gerilim ve yıldırım değerlendirmesinde Conseil International des Grands Reseaux Electriques (CIGRE) tarafından önerilmektedir ve Bergeron Modeli'nin önerildiği diğer konularla birlikte gösterilmektedir (Yoldaş A., 2019). CIGRE'nin raporlarına göre, temel frekans analizlerinde, yük akışı hesaplamalarında, rölelerin test edilmesinde ve yeraltı kablolarındaki aşırı akım arızalarının belirlenmesinde güvenilir ve doğru sonuçlar elde edilmiştir (Furgal, 2020).

Bergeron Modeli durum eşitliğinde, belirleyici olan sabit frekanslı sistemler için modelleme yapmaktır. Z_0 gibi hesaplanan tüm parametreler sabit frekansta bulunur (Bu çalışma için 50Hz). Bergeron Modeli, özellikle enerji iletim hatlarının yıldırım darbeleri gibi kısa süreli olaylara verdiği tepkiyi analiz etmek için uygun bir yöntemdir. Bergeron Modeli, iletim hattının karakteristik empedansını ve dalga yayılım süresini dikkate alarak, dalga yayılımını modelleyen bir yöntemdir (Velasco, 2019).

Alternatif olarak Frekans Bağımlı Model (Frequency Dependent Model) de kullanılabilir. Ancak Frekans Bağımlı Model, iletim hattının parametrelerinin frekansa bağlı değişimini dikkate alarak özellikle yüksek frekanslı bileşenleri daha detaylı analiz edebilmesine rağmen, hesaplama süresi açısından daha maliyetlidir ve PSCAD gibi simülasyon yazılımlarında stabilite sorunlarına neden olabilir (Tossani vd., 2018). Özellikle yüksek frekans bileşenleri ve fazlar arası kuplajın kritik olduğu durumlarda avantajlı olmasına rağmen, bu model aşırı karmaşık hesaplamalar gerektirir ve pratik mühendislik uygulamalarında her zaman tercih edilmez (Cooray, 1994).

Bergeron Modeli'nin bu çalışmada tercih edilmesinin başlıca nedenleri, Enerji iletim hatlarının kısa süreli geçici durum analizlerinde güvenilir sonuçlar vermesidir. Ayrıca temel frekans bileşenlerine (50 Hz - 60 Hz) odaklanarak mühendislik uygulamalarında pratik olması ve daha düşük hesaplama yükü ile hızlı ve stabil çözümler sunmasıdır. Bunlarla birlikte gerçek arıza verileri ile doğrulandığında güvenilir sonuçlar vermesi Bergeron Modelinin geçici aşırı gerilimlerin analizinde mühendislik uygulamaları açısından en uygulanabilir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Djalel, ve diğerleri, 2007; Silva, 2016). Bergeron Modeli'nin bir diğer avantajı da geçici durum analizlerinde gecikmeleri dikkate almasıdır. Aynı zamanda dezavantaj olarak yüksek frekanslarda yapay rezonanslar getirebilir (Watson & Yu, 2008). Yıldırım frekansı önceden bilinmediği için Bergeron Modeli'nde sistem durum vektörünü ilişkilendirmek için "z" gibi ölçüm vektör kümesinin olduğu bir "x" fonksiyonu kullanılır (Yoldaş A., 2019). Bu durum, Eşitlik (12)'da gösterilmiştir.

$$z = [H]\chi + \varepsilon \quad (12)$$

Burada, [H] ölçüm matrisi ve ε ise hata vektörüdür. Eşitlik 8'de d_{ik}/dt operatörünü içeren iletim hattının önceki durum formülasyonu, $t-\Delta t$ zamanındaki önceki sistem durumu açısından eşitlik 9 olarak düşünülebilir ve eşitlik 13 ve 14'teki gibi yeniden yazılır.

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(t)+i(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (13)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} \approx \frac{V(t)+V(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (14)$$

Bu çalışmada, üç fazlı iletim hattının sürekli eşitliklerini ayrıık eşitliklere dönüştürmek için modal dönüşüm tekniği ele alınmıştır. Bu sayede fazlar arasındaki ilave gerilim indüklenme etkisi ihmal edilebilmiştir. Üç fazlı gerilim ve akım üç bağımsız mod olarak hesaplanabilir ve her mod, tek fazlı bir iletim hattı olarak değerlendirilir (Dommel, 1969) (Suyaraj vd., 2017).

Modal ve faz arasındaki ilişki, Eşitlik (15) ve (16)'da gösterilmiştir.

$$[V_{mode}] = [T]^{-1}[V_{phase}] \quad (15)$$

$$[i_{mode}] = [T]^{-1}[i_{phase}] \quad (16)$$

Burada, V_{mode} , i_{mode} , V_{phase} ve i_{phase} sırasıyla modal gerilimi, modal akımı, faz gerilimi ve faz akımını gösterir. [T] modal dönüşüm matrisidir ve $[T]^{-1}$ ise [T] matrisinin tersi olarak kabul edilir. Transpoze üç fazlı bir hat için [T] ifadesi ile matrisin tersi, eşitlik 17'de belirtilmiştir (Mamiş vd., 2013).

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} [T]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

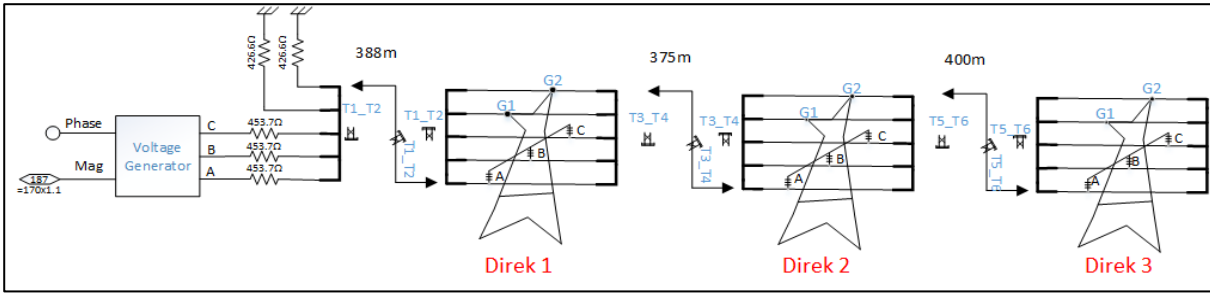
Bu yaklaşımlar göz önüne alındığında Bergeron iletim hattı, durum uzay eşitliğinde bir mod bölgesi olarak oluşturulabilir ve eşitlik 18 olarak tanımlanır.

$$\begin{bmatrix} i_k^{(0)} \\ i_k^{(1)} \\ i_k^{(2)} \\ V_k^{(0)} \\ V_k^{(1)} \\ V_k^{(2)} \end{bmatrix} t - \Delta t \begin{bmatrix} -\frac{Z^{(0)}}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dots^1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C} \frac{Z^{(0)}+R}{Z^{(0)R}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots^{(1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_k^{(0)} \\ i_k^{(1)} \\ i_k^{(2)} \\ V_k^{(0)} \\ V_k^{(1)} \\ V_k^{(2)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

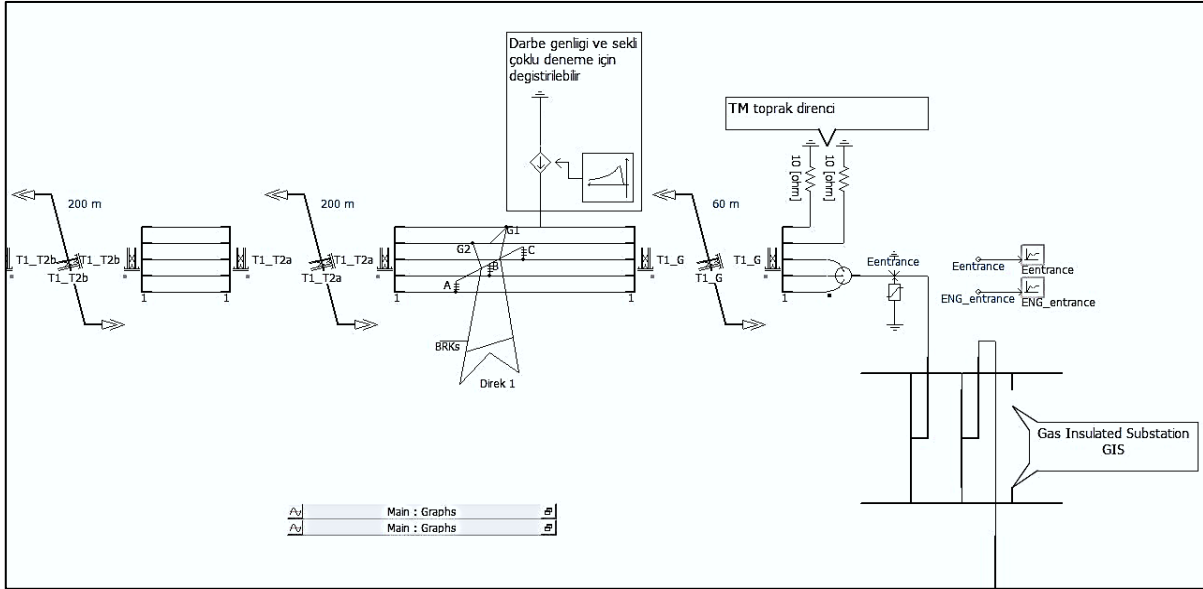
Eşitlik 18'teki üst simgeler ((0), (1) ve (2)) sırasıyla sıfır, pozitif ve negatif dizi parametrelerini belirtir. Her dizide $L^{(0)}=L^{(1)}=L^{(2)}=L$ olarak bir seri endüktans belirtilir. Her seri için direnç ve kapasitör ise sırasıyla $R^{(0)}=R^{(1)}=R^{(2)}=R$ ve $C^{(0)}=C^{(1)}=C^{(2)}=C$ olarak atanır. Model çözümlemesi V_k ve i_k olarak tamamlanır.

3.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

PSCAD programı ile EMTDC (Electromagnetic Transients including DC) analiz problemleri çözülmektedir. Güç sistemlerinde kısa süreli olayların analizini yapmak için kullanılan EMTDC tabanlı yazılımlar özellikle anlık gerilim değişimleri, kısa devreler, geri besleme olayları gibi hızlı dinamiklerin simülasyonunu gerçekleştirmek için kullanılır. EMTP yazılımı diferansiyel denklemler, zaman alaşımli çözümler, nümerik integrasyon, durum uzay modelleri, Fourier ve Laplace dönüşümleri kullanılır (Chowdhuri P. , 1996). Ayrıca zaman ve fazör düzleminde μs ölçeğinde incelemeler yapılabilmektedir (Yoldaş A. , 2019). Yıldırımın genel yapısı, oluşma ve arıza süreleri göz önüne alındığında bu ihtiyaca cevap vermekte ve seri modelleme yapılabilmektedir (Araneo vd., 2019). Şekil 7 iletim hattının PSCAD ile genel modellenmesi, Şekil 8 ise PSCAD ortamında arıza noktasının tasarımı sunulmuştur.

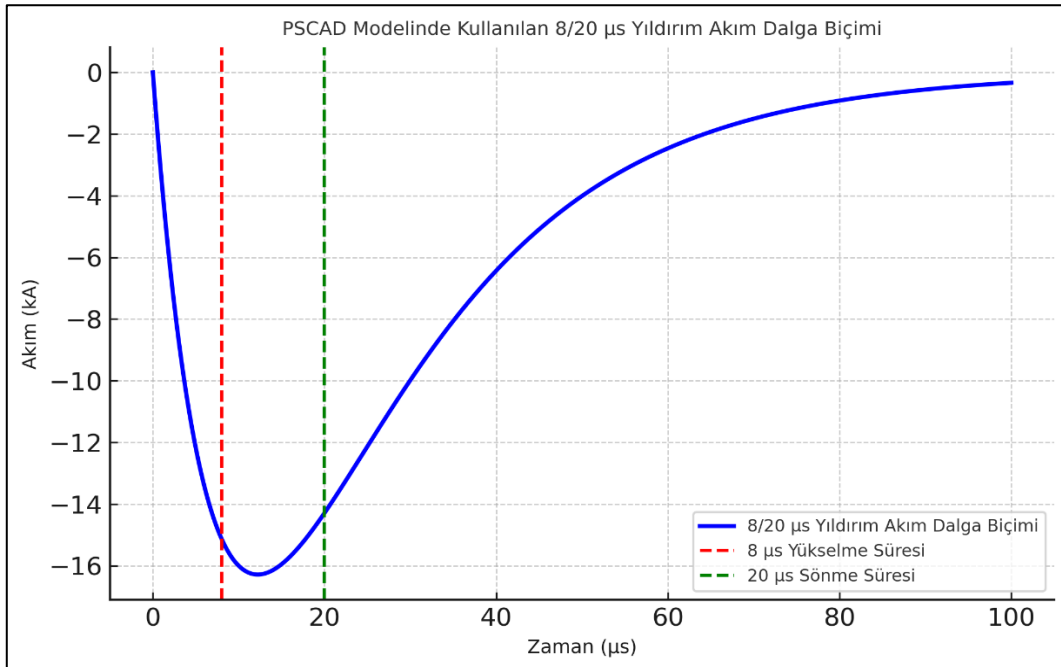


Şekil 7. Genel PSCAD Hat Modeli (General PSCAD Transmission Line Model)



Şekil 8. Arıza Noktaları ile PSCAD Hat Modeli (PSCAD Transmission Line Model with Failure Points)

Yıldırımın hatta düşürülmesinin simülasyonu için PSCAD ortamında paket olarak hazır bulunan akım darbe generatörü kullanılmıştır. Ayrıca yıldırım modellemesi yapılırken (IEEE Standard 1410, 2010) standardında verilen yıldırım modeli kullanılmıştır. Arıza kayıtlarına göre hattın en yüksek yıldırıma maruz kaldığı noktalar belirlenmiş ve modelleme bu noktalara göre hazırlanmıştır. Meteoroloji Bölge Müdürlüğü'nden alınan yıldırım bilgileri doğrultusunda net yıldırım akımı simülasyona dahil edilmiştir (MGM, 2025).



Şekil 9. PSCAD Modelinde kullanılan 8/20µs yıldırım akım dalga biçimi (8/20µs Lightning Current Waveform Used in the PSCAD Model)

Yıldırımın enerji iletim hatları üzerindeki etkilerini analiz etmek için IEEE Standard 1410 (2010) ve IEC 62305-1 (2010) yönergelerine uygun olarak yıldırım darbe akımı modeli kullanılmıştır. Yıldırım akımı zaman içinde değişen eksponansiyel bir dalga biçimi gösterir ve tipik olarak 10/350 µs veya 8/20 µs darbe akımları kullanılır (Chowdhuri, 1996; Cooray, 1994). Bu çalışmada PSCAD ortamında yıldırım darbesi modellemesi yapılırken şekil 9'da gösterilen 8/20 µs standardında darbe akımı formu tercih edilmiştir. Bu dalga biçimi doğrudan yıldırım darbesini temsil eden bir akım dalgasıdır ve özellikle elektriksel izolasyon ve aşırı gerilim hesaplamalarında sıkça kullanılır (Marshall & Stolzenburg, 2001). Yıldırım akımı aşağıdaki eksponansiyel fonksiyon ile modellenmiştir:

$$I(t) = I_0 x (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (19)$$

Burada:

I_0 : Yıldırımın tepe akımı (kA)

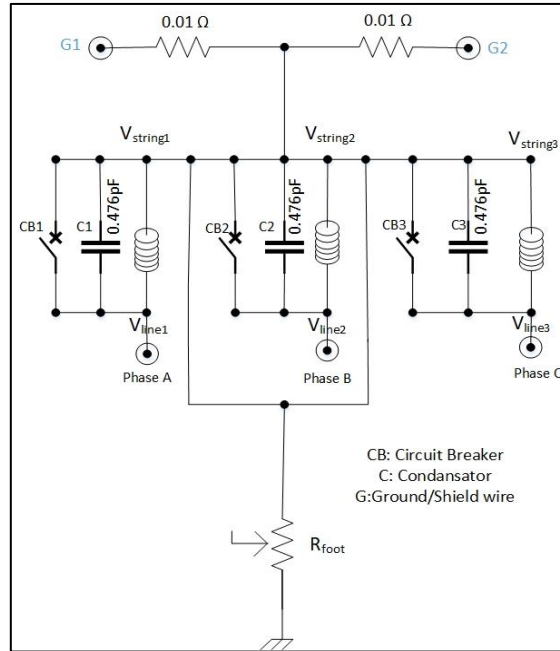
t: Zaman (µs)

α ve β : Yükselme ve düşme katsayısı

Yıldırım, havai hattın koruma teline gelecek şekilde tasarlanarak oluşan arızalar değerlendirilmiştir. İşletmede kullanılmakta olan hat karakteristiği 1x154 kV, 1272 MCM olup PA tipi direkler sahada bulunmaktadır. PA serisi direkler 154kV hatlarda uzun yıllardır kullanılmaktadır. PA, PB, PC tipi direkler hafif, orta, ağır taşıyıcı direkler, PD ve PE tipi direkler ise durdurucu ve ağır durdurucu direklerdir (Arı, 2012). Direğin ve izolatörün PSCAD modellemesi Şekil 10'da gösterilmektedir.

İzolatör üzerinde arızanın incelenebilmesi için devrede 1460 mm izolatörden başlayarak eşdeğer kondansatörler kullanılmıştır. Atlama mesafesini arttırmak için İzolatör boyu arttıkça kapasitans değeri de yükselmektedir. Direk üzerinde izolatör modeli tasarlanırken, ayarlanabilir kondansatörün paraleline yaylı, SF6 gazlı, devre kesici modeli yerleştirilmiştir. Atlama mesafesi ve zamana göre gerilim artış hızına bağlı olarak kesici çalışmaktadır (Simka, Straumann, & Franck, 2012). Kesici devreye girdiğinde yani atlama gerçekleştiğinde yük akışı durdurmaktadır. Bu durum grafikler yardımıyla incelenmiş, direk ve temel topraklama dirençleri kaynaklı oluşan istenmeyen gerilimin tepe değerleri tespit edilmiştir. Arıza noktaları da gerilimin pik yaptığı değerlerdir.

İlk model hazırlanırken direğe doğrudan gelen yıldırım baz alınmış ve diğer direkler arıza incelemesi için konuya dâhil edilmemiştir. İnceleme MKR'den alınan bilgiler doğrultusunda yapılmıştır (Zhao vd., 2011). Çalışmanın amacı, izolatör ile direk direnci arasında yıldırım akım bilgisine göre referans olabilecek değerler bulmaktır. Bu noktadaki amaç yine sınır değer tespiti ile arızaların önüne geçmektir.



Şekil 10. PSCAD Direk Modeli (PSCAD Tower Model)

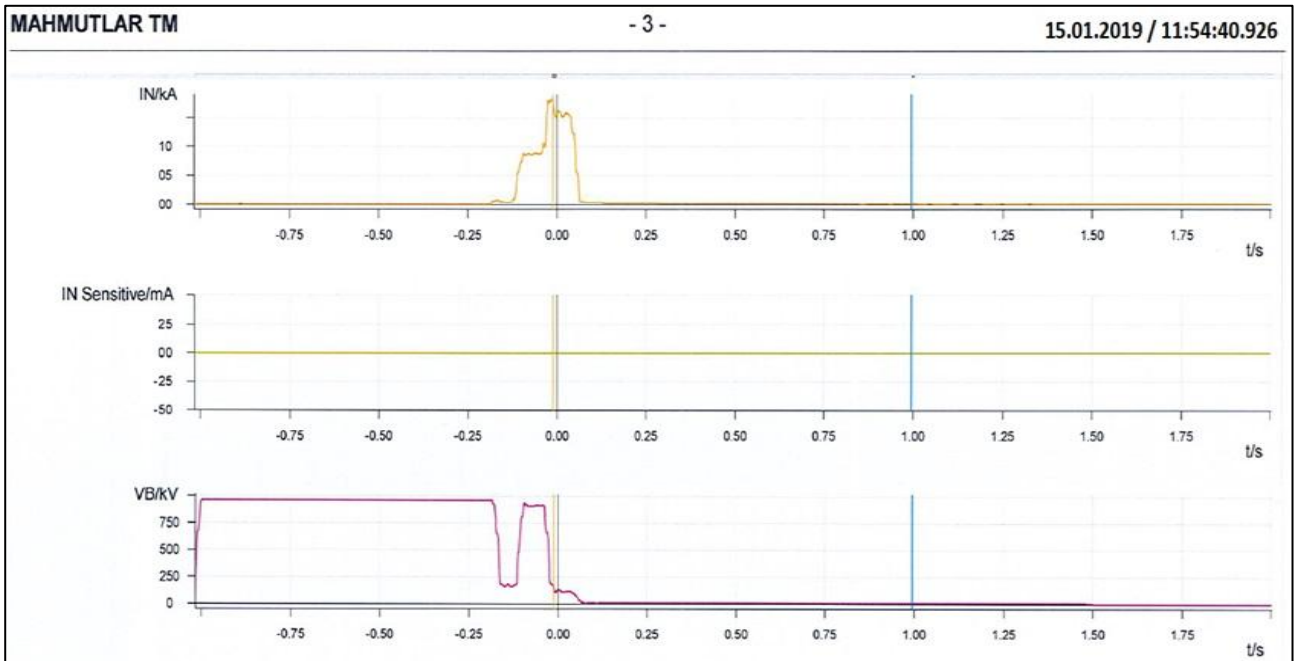
Yıldırım, öncül lider veya öncül yayılma adı verilen deşarjlar ile yaklaşık her 40 µs'de bir meydana gelir ve bu süreç ortalama 10-20 milisaniye devam eder (Shehab, 2013). Bu olayı elektriksel açıdan incelediğimizde (direk ve yıldırım kanalı birer elektrot olarak düşünülürse), ya tek elektrottan gelen lider akım diğer elektroda ulaştığında, ya da her iki uçtan gelen akım, izolasyon boşluğunun ortasında karşılaşıncaya devre tamamlanır. Bu karşılaşma

noktası, arızanın gerçekleştiği yerdir. Bu noktanın modellenmesinde PSCAD yazılımında oluşturulan direk, programın kütüphanesindeki çift koruma telli, tek devreli çatal direk modelinden yararlanılarak tasarlanmıştır. Model oluşturulurken PA serisindeki PB+12 tipi orta taşıyıcı direğin özellikleri temel alınmış; iletkenler arası mesafe, iletkenlerin yerden yüksekliği ve koruma tellerinin konumları buna göre belirlenmiştir (Zhao vd., 2011). Program, girilen iletken yüksekliği ve koruma parametrelerine dayanarak direk direncini otomatik olarak hesaplamıştır. Modelde iletken olarak 1272 MCM Pheasant kullanılmış ve koruma tellerinin kesiti 70 milimetrekare olarak ayarlanmıştır

4. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Hat karakteristikleri ve arıza bilgileri belirlendikten sonra, yıldırım kaynaklı arızanın meydana geldiği tarih tespit edilmiştir. Yıldırım ve arıza verileri eşleştirilerek, Şekil 10'da mesafe koruma rölesinden (MKR) alınan kayıt gösterilmiştir.

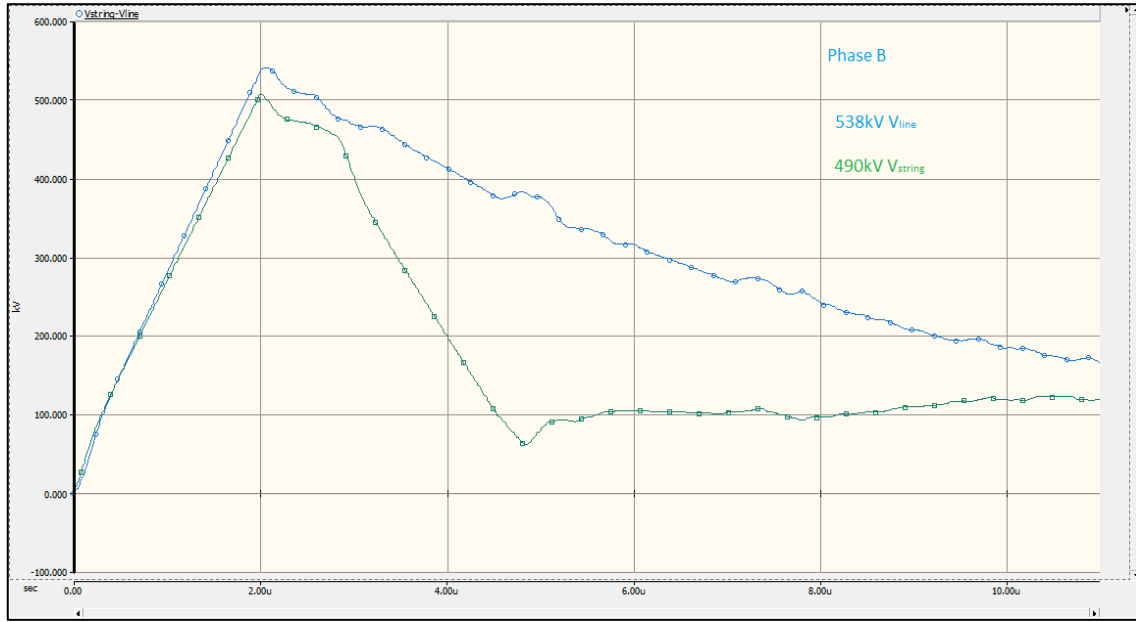
15 Ocak 2019'da saat 11:54'te yıldırım, 62 numaralı direğe düşmüştür. Arıza, B-Faz toprak olarak kaydedilmiş olup, B fazı orta konsolda yer almaktadır. MKR arıza kaydına göre arızanın meydana geldiği nokta 18.23 km'de yer almakta ve direk tipi PB olarak belirlenmiştir. Direğin +12 metre ilave gövdesi ile faz iletkeni arasındaki mesafe 31 metredir. 61-62 numaralı direkler arası 379 metre, 62-63 direkleri arası ise 424 metredir. 1460 mm izolatör kullanılan 62 numaralı direğin topraklama direnci 149 Ω olarak ölçülmüştür. Direğin bulunduğu zemin genel olarak kayalıktır.



Şekil 11. Oymapınar TM'den Mahmutlar TM'ye bakan Mesafe Koruma Rölesi bilgisi (Distance Protection Relay Information from Oymapınar Substation to Mahmutlar Substation)

(MGM, 2025)'den alınan verilere göre, 10 kA ve 25 kA şiddetinde iki yıldırım tespit edilmiş ve Tablo 12'de sunulmuştur. 10 kA yıldırım şiddeti için yapılan simülasyonda, hat üzerinde herhangi bir arıza meydana gelmediği Şekil 12'de gösterilmiştir.

Şekil 11'deki mesafe koruma rölesi arıza kaydı incelendiğinde hattın B fazında arıza yaşandığı ve bu arıza esnasındaki gerilimin 940kV, akımın ise 16.9 kA olduğu görülmektedir. Şekil 12'den de görüleceği üzere tablo 2'den alınan 10kA yıldırım şiddeti için hazırlanan simülasyona göre arıza oluşmamıştır. Tablo 2'de görüldüğü gibi, aynı anda birden fazla yıldırım düşebilir. Yakın noktalara arka arkaya yıldırım düşmesi, iyonizasyon nedeniyle ortam direncinin azalmasına yol açabilir. Bu da iletim hattını arızalara karşı daha hassas hale getirir. Bu nedenle, sık yıldırım alan bölgelerde topraklama direnç ölçümlerinin düzenli olarak güncellenmesi ve gerekirse ek iyileştirmeler yapılması önerilmektedir.



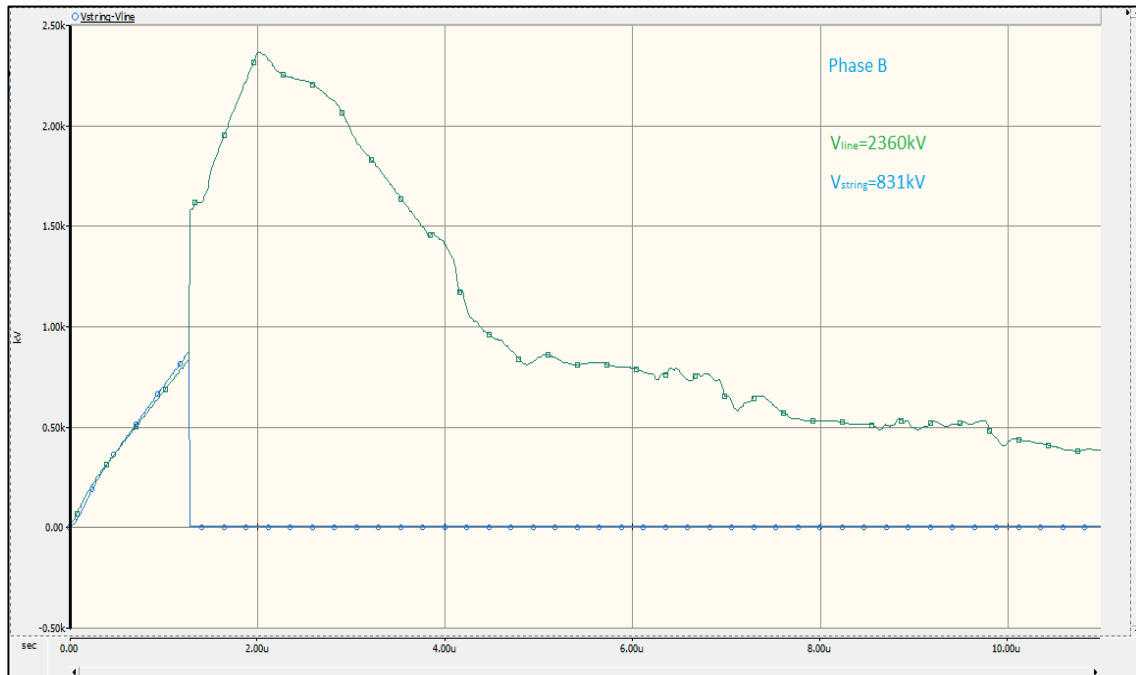
Şekil 12. 10 kA Yıldırım Şiddeti için Simülasyon Sonucu (Simulation Results for 10kA Lightning)

Tablo 2’de ise MGM’den alınan, 154kV Oymapınar Mahmutlar EİH güzergahıyla eşleştirilen yıldırım verileri bulunmaktadır. Bu veriler ile hattın işletme operatöründen alınan arıza verileri eşleştirilmiştir.

Tablo 2. MGM’den alınan koordinatlı yıldırım verileri (Coordinated Lightning Data taken from MDD)

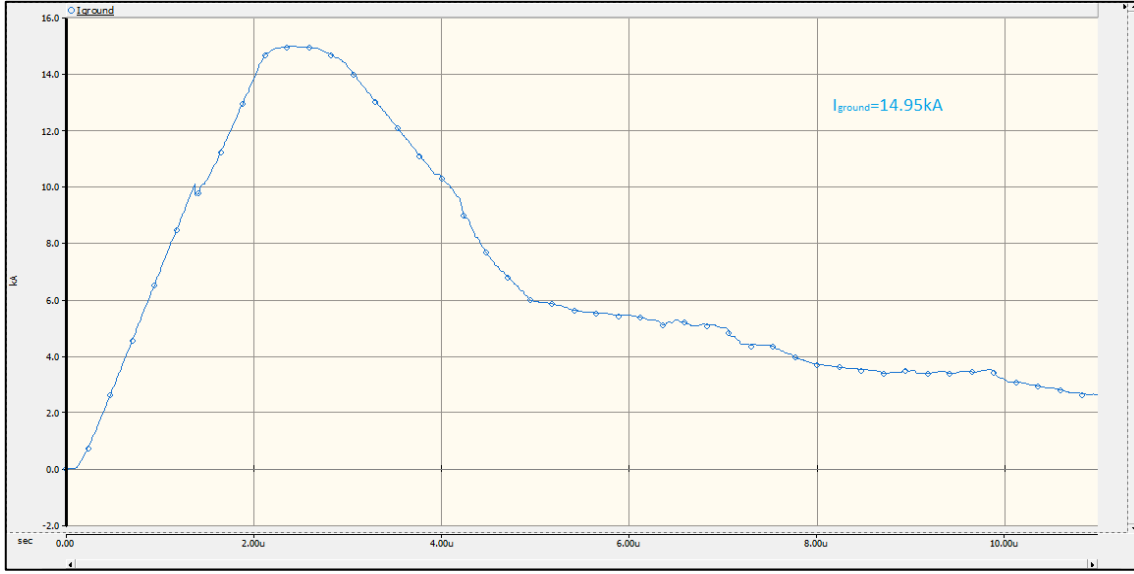
SAAT-TARİH	ENLEM	BOYLAM	YERDEN YÜKSEKLİK(km)	AKIM(kA)
15/01/2019- 11:54	36° 44' 33.69" N	31° 46' 57.06" E	7.9	24.95
15/01/2019- 11:54	36° 44' 33.67" N	31° 46' 57.07" E	10.1	10.02

25kA yıldırım şiddeti için oluşturulan simülasyon sonucu şekil 13’te verilmekte olup arıza görülmektedir. Elde edilen veri ile mesafe koruma rölesi verileri karşılaştırıldığında arıza esnasında toprağa 14.95kA akım aktığı (şekil 13), gerilimin tepe değerinin ise 831kV olduğu görülmüştür. Akım ve gerilim değerleri karşılaştırıldığında aradaki %7’lik farkın topraklama ölçümü yapılan tarihteki zeminin nemlilik durumundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil13. 25kA yıldırım şiddeti için simülasyon sonucu (Simulation results for 25kA Lightning)

Çalışma kapsamında, 62 numaralı direğin bulunduğu bölgede ortalama yıldırım şiddeti 36 kA olarak belirlenmiştir. 1460 mm izolatör kullanıldığında arızanın kaçınılmaz olduğu görülmüştür. Ancak, izolatör boyu 1660 mm'ye çıkarıldığında, 36 kA yıldırım şiddetinde toprak üst direnç değeri 19 Ω olarak hesaplanmıştır. Direk topraklamasının iyileştirilmesi veya daha uzun izolatör kullanılması halinde arıza önenebilir. Simülasyon verileri doğrultusunda farklı senaryolar analiz edilmiştir.



Şekil 14. 15/01/2019 Tarihli Arıza Esnasında Toprağa Akan Akım (Fault Current at 15/01/2019)

4.1. Farklı İzolatör Boylarına Göre Oluşan Gerilimler (Voltages According to Different Grounding Values)

"Tablo 3'teki veriler incelendiğinde, izolatör uzunluğunun artmasıyla birlikte direkte oluşan aşırı gerilimlerin atlama yapmasını önlemek için gereken arıza gerilim seviyesinin de yükseldiği görülmüştür. 10 kA şiddetindeki yıldırım için analiz yapıldığında:

- 1660 mm izolatör için arıza sınır direnç 525 Ω 'dur.
- İzolatör boyu 2460 mm'ye çıkarıldığında direnç sınır değeri 1411 Ω 'a yükselmiştir
- 1660 mm'lik izolatörde arıza gerilimi 870 kV olarak ölçülmüştür.
- Direk ayak direnci 525 Ω 'un altında olduğunda hatta arıza oluşmamaktadır.

Bu senaryo 50 kA şiddetindeki yıldırım için incelendiğindeyse:

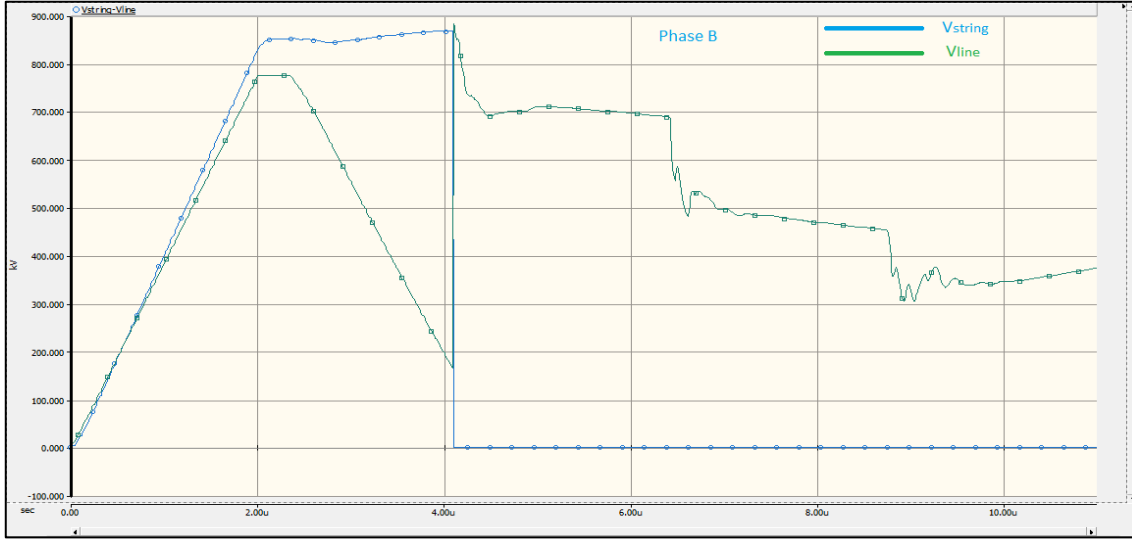
- 1660 mm'lik izolatörde arıza oluşması için sınır direnç 11 Ω 'dur.
- 2460 mm'lik izolatörde bu değer 34 Ω 'a yükselmiştir.
- 1660 mm'lik izolatörde arıza anındaki hat gerilimi 1550 kV olarak ölçülmüş ve 11 Ω ve üzerindeki tüm direk dirençlerinde arıza meydana gelmektedir.

Tablo 3. 1660, 2060 ve 2460 mm İzolatör için Değişen Yıldırım Akım Şiddetinde Arıza Limit Değerleri (Outage Limit Values for 1660, 2060 and 2460 mm Insulators at Varying Lightning Current Intensity)

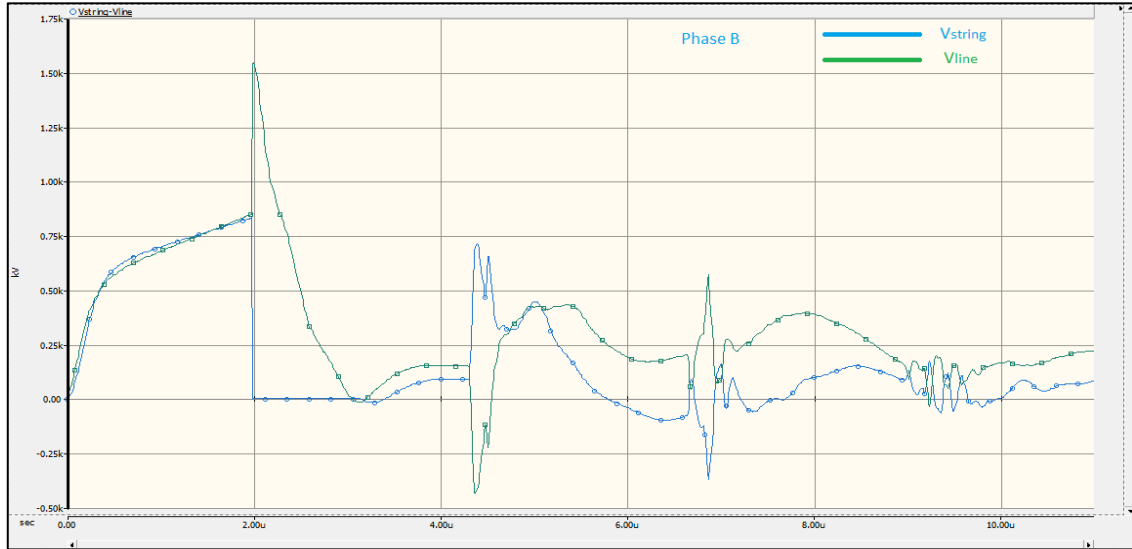
İZOLATÖR BOYU	1660 mm		2060 mm		2460 mm	
	R _{direk} (Ω)	Hat Gerilimi (kV)	R _{direk} (Ω)	Hat Gerilimi (kV)	R _{direk} (Ω)	Hat Gerilimi (kV)
10	525	871	835	1100	1411	1300
20	95	1550	149	1850	224	2250
30	43	1590	66	1900	93	2300
40	19	1500	37	1900	53	2330
50	11	1550	20	1800	34	2380
60	5	1590	12	1830	19	2180
75	1	1800	5	1900	10	2200
100	1	2500	1	2500	2	2500

Şekil 15'ten görüleceği üzere hatta yıldırım düştükten sonra 4 μ s içinde arıza gerilimi tepe noktasına çıkmakta, arıza oluştuğu anda PSCAD devre modelindeki devre kesici devreyi açmaktadır. İzolatör üzerindeki gerilim

sıfırlanırken hattaki gerilim harmonikler oluşturarak 100ms sonra tamamen sönümlenmektedir.



Şekil 15. 1660 mm izolatör boyunda 10kA yıldırımda 525Ω dirençte atlamının olduğu hat ve izolatör gerilimi (Line and insulator voltage at which a flashover occurs in 525Ω resistance in 10kA lightning with 1660 mm insulator length)



Şekil 16. 1660 mm İzolatör Boyunda 50kA Yıldırımda 11Ω Dirençte Atlamanın Oluştugu Hat ve İzolatör Gerilimi (Line and Insulator Voltage at Which a Flashover Occurs in 11Ω Resistance in a 50kA Lightning With 1660 mm Insulator Length)

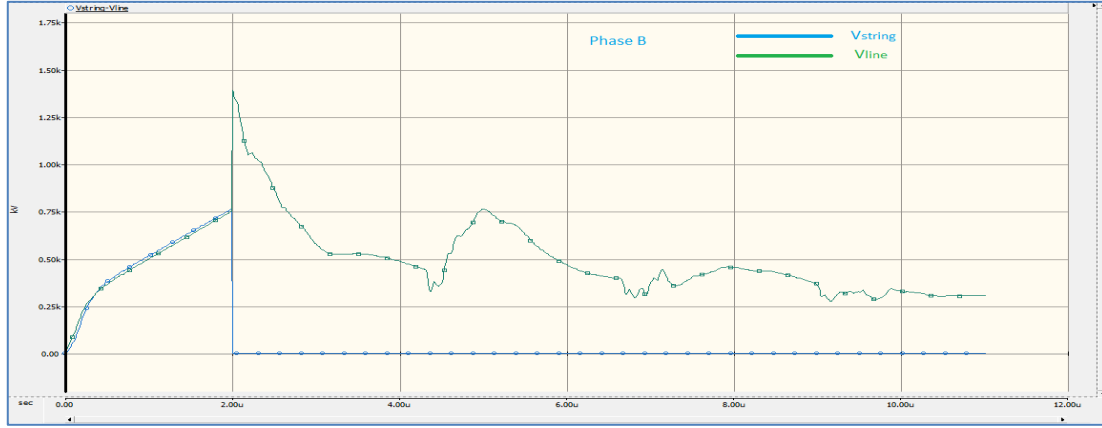
4.2. Farklı İzolatör Boylarına Göre Oluşan Gerilimler (Voltages According to Different Grounding Values)

Tablo 4'te, izolatör boyu ve direk topraklama direnci sabit tutulduğunda, hangi yıldırım şiddetinde arıza oluşacağı gösterilmektedir. İzolatör boyu arttıkça, arızaya neden olabilecek yıldırım şiddetinin de yükseldiği gözlenmiştir.

Tablo 4. Değişen İzolatör Boyuna Göre Direk Temel Direncinin 10 Ω Olması Halinde Atlama Gerilimleri (Fault Voltages in Case The Pole Base Resistance is 10 Ω According to the Varying Insulator Length)

İZOLATÖR BOYU	1460 mm		1860 mm		2460 mm	
	V _{İZOLATÖR} (kV)	V _{HAT} (kV)	V _{İZOLATÖR} (kV)	V _{HAT} (kV)	V _{İZOLATÖR} (kV)	V _{HAT} (kV)
10	161	165	163	167	163	167
20	325	333	323	332	325	333
30	486	497	488	489	488	500
40	651	651	648	662	649	663
45	728	1272 (arıza)	488	488	733	750
60	-	-	928	1819 (arıza)	977	1000
75	-	-	-	-	1220(arıza)	2146 (arıza)

Direk topraklamasının 10Ω , izolatör boylarının sırasıyla 1460, 1860 ve 2460 mm olması halinde 45 kA yıldırım şiddetinde arıza oluşmamaktadır. Bu durum 1860 mm izolatör kullanılması halinde 60kA yıldırımında arıza yaşanmıştır. İzolatörün uzatılarak 2460 mm'ye çıkartılması halinde ise 75kA yıldırım şiddetinde arıza meydana gelmiştir. Tablo 4'te arıza yaşandıktan sonraki veriler boş bırakılmıştır.



Şekil 17. 40 kA Yıldırım, 1460 mm İzolatör İçin 13Ω Sınır Değeri (13Ω Limit Value for 1460 mm Isolator in 40 kA Lightning) Tablo 4'te görülen 10Ω için 45 kA de yaşanan arıza, yıldırım şiddeti 40 kA'e düşürüldüğünde 13Ω 'da görülmektedir. Bu durum şekil 17'de gösterilmektedir.

4.3. Yıldırım Akım Değerinin Sabit Olduğu Anda Yaşanan Arızaya Esas Topraklama Değerleri (Fault Grounding Values On Constant Lightning Values)

Yapılan çalışmanın kapsamında yıldırımın akım değerinin sabit tutulması ve izolatör boyunun değiştirilmesi halinde hangi topraklama direnç değerlerinde açmaların yaşanacağına dair hazırlanan simülasyon çıktısı Tablo 5'te verilmektedir. Bu tabloda hatta okunan gerilimler anlık gerilimler olup simülasyonda tespit edilen tepe gerilim değerleridir. Okunan gerilimlerin tamamında arıza yaşanmıştır. Bir örnekle açıklanacak olursa; 30kA yıldırım için direktte 1660 mm izolatör kullanıldığı takdirde 43Ω ve üzeri tüm topraklama dirençlerinde arıza yaşanacaktır. Hatta görülen gerilim tepe değeri ise 1590kV olacaktır.

Tablo 5. 10,30 ve 50kA Yıldırımında Arıza Sınır Değerleri (Outage Limit Values for 10,30 and 50kA Lightning)

YILDIRIM ŞİDDETİ	10kA		30 kA		50 kA	
	$R_{direk} \Omega$	$V_{HAT} (kV)$	$R_{direk} \Omega$	$V_{HAT} (kV)$	$R_{direk} \Omega$	$V_{HAT} (kV)$
$L_{izolatör}(mm)$						
1460	357	710	33	1500	7	1510
1660	525	875	43	1590	11	1550
1860	664	990	54	1750	14	1610
2060	835	1100	66	1900	20	1800
2260	1068	1180	79	2120	28	2180
2460	1411	1300	93	2300	34	2380
2660	1953	1400	109	2500	40	2580

5. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Yıldırımın mevcut teknoloji ve yöntemlerle tamamen önlenmesi veya tehlikesiz hale getirilmesi mümkün değildir. Elektrik sistemleri modern yaşamın en temel gereksinimlerinden biridir. Ancak yıldırım, bu sistemler için en büyük risklerden birini oluşturmaktadır. Havai enerji iletim hatları, enerji sistemlerinin temel taşıdır ve dış etkilere karşı hassastır. Bu çalışmada, arıza indeksi yüksek olan bir havai iletim hattı incelenerek, yıldırım kaynaklı arızaların önlenmesi için alınabilecek önlemler değerlendirilmiştir. Seçilen hat üzerinde yıldırım kaynaklı arızalar belirlenmiş ve MGM'den alınan koordinatlı yıldırım verileriyle eşleştirilmiştir. Bu eşleştirme sonucunda; yıldırımın koordinatı, akım şiddeti, direklerin topraklama direnci, direk tipi, izolatör boyu ve arıza kayıtları ayrıntılı olarak elde edilmiştir. PSCAD programı ile eldeki arıza verileri ve işletmedeki hat bilgileri kullanılarak hat modellenmiştir. Alınan arıza kayıtları ile karşılaştırma yapılarak modelin doğruluğu sağlanmıştır. Modelleme sonucunda üç değişkenli bir sistem oluşturulmuştur:

1. Yıldırım şiddeti sabit tutularak izolatör boyu ve toprak direnci değiştirilmiştir.

2. İzolatör boyu sabit tutularak yıldırım şiddeti ve toprak direnci değiştirilmiştir.
3. Toprak direnci sabit tutularak yıldırım şiddeti ve izolatör boyu değiştirilmiştir.

Bu analizler sayesinde, bu parametrelerden herhangi biri bilindiğinde, iletim hattının yıldırıma karşı güvenli işletme koşulları belirlenebilmektedir.

Yıldırım şiddeti, ülke ve bölgelere göre büyük farklılıklar göstermektedir. Örneğin, Türkiye'de sahil bölgelerindeki yıldırım şiddeti, iç kesimlere kıyasla 10 kat daha yüksek olabilir (Öztopal, 2017). Bu çalışmada incelenen bölgede ortalama yıldırım şiddeti 20-30 kA olarak belirlenmiştir.

- 1460 mm izolatör için: 30 kA yıldırımda maksimum direnç değeri 33 Ω 'dur.
- 1660 mm izolatör için: Aynı yıldırım şiddetinde direnç değeri 74 Ω 'a çıkmaktadır.
- 1660 mm izolatör ile 20 kA yıldırım için: Limit direnç değeri 96 Ω olarak hesaplanmıştır.

İncelenen bölgede ortalama yıldırım şiddeti 20-30 kA olduğu düşünüldüğünde, 1460 mm izolatör için 30 kA yıldırıma karşılık maksimum direnç değeri 33 Ω olarak belirlenmiştir. 1660 mm izolatör kullanıldığında bu değer 74 Ω 'a çıkmaktadır. Analizler, 1660 mm izolatör için 20 kA yıldırımın kullanılması durumunda 96 Ω 'u limit değer olarak göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre, yıldırım şiddeti 20-30 kA ve üzeri olan bölgelerde topraklama sistemlerinin iyileştirilmesi zorunludur. Topraklama direncinin düşürülemediği durumlarda, izolatör boyunun artırılması önerilmektedir.

- Direk ayak direnci 10 Ω olduğunda: 45 kA yıldırımda arıza oluşmamaktadır.
- İzolatör boyu 1660 mm olduğunda: 50 kA'ya kadar güvenli sınır sağlanmaktadır.
- İzolatör boyu 2660 mm olduğunda: 80 kA'ya kadar arıza oluşmamaktadır

Türkiye'nin Akdeniz sahil şeridinde yıldırım ortalama şiddeti genellikle 20-30 kA arasında seyrederken, bu değer yıldan yıla ve bölgenin konumuna göre değişiklik gösterebilmektedir. Yıldırım şiddeti 30-40 kA aralığında olduğunda, 1660 mm izolatör boyuyla maksimum topraklama direnci 19 Ω olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma yüksek gerilim havai hatların modellemesiyle, bölgesel yıldırım verileri kullanılarak muhtemel arıza noktalarının önceden belirlenebileceğini göstermektedir. 154kV havai hatlarda sıklıkla kullanılan izolatör tipi 1660 mm'ye çekilmiş olup, bu değerde yıldırım kaynaklı arızaları önlemek için topraklama direncinin 19 Ω 'un altında tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır. Topraklama direnci bu değer ne kadar altına düşürülürse, yıldırım kaynaklı arızaların o oranda azalacağı öngörülmektedir. Bunların yanı sıra yıldırıma karşı topraklama ve izolatör boylarında değişiklik yapılmasıyla kısa, orta ve uzun vadede sağlanacak faydalar altta verilmiştir.

- İletim hatlarında tespit edilen yıldırıma karşı zayıf noktalara müdahale edilerek kalıcı arıza sayısı düşürülerek elektriğin arz ve güvenliğinde iyileşme sağlanacaktır.
- Kalıcı arızalarda zarar gören hırdavat değişimi, tamir maliyeti ve arızanın giderilmesi için kullanılan iş gücü azalacaktır.
- Yeni hatların tasarımında yıldırım göz önüne alınarak orta ve uzun vadede işletme giderlerinde azalma meydana gelecektir.
- Enerji kesintilerinde meydana gelen mali kayıp, birim maliyet düşünüldüğünde tüketicilerin lehine yarar sağlayacaktır.

Bu çalışmanın devamında yıldırım kaynaklı kalıcı arızaların ayrıntılı analiz edilmesiyle yıldırıma karşı farklı topraklama modellerinin simülasyonu ve uygulaması yapılması planlanmaktadır. Yıldırım şiddeti, topraklama direnci ve izolatör uzunlukları arasındaki korelasyon kullanılarak farklı izolatör modellerinin (Genişlik, tasarım vb.) yıldırım karşısındaki tepkileri elektrik alan açısından incelenecektir. Bununla birlikte yıldırım kaynaklı arızaların önüne geçebilmek için yapay zekâ destekli güzergâh seçim çalışmaları yapılacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Agrawal, S., & Nigam, M. (2014). Lightning phenomena and its effect on transmission line. *Recent Research in Science and Technology*, 183-187.
- Alves, M., Oliveira, B., Ferreira, D., Santos, A., Maia, W., Soares, W., . . . Pinto, O. (2025). An automated technique and decision support system for lightning early warning. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2289-2304.
- Araneo, R., Celozzi, S., Brandão, J., Andreotti, A., & Verolino, L. (2019). Lightning Performance of Overhead Distribution Lines with Underbuilt Ground Wires. *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)* (s. 1-2). Miami: IEEE.
- Arı, M. (2012). 154/380 kv Enerji İletim Hatları Proje Uygulamaları. Ankara: Karaca.
- Chisholm, W. A., Petrache, E., & Bologna, F. (2010). Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition* (s. 1-6). New Orleans: IEEE.
- Chisholm, W., & Petrache, E. (2010). Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection. *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Smart Solutions for a Changing World*. Bologna: IEEE.
- Chowdhuri, P. (1990). Lightning-induced voltages on multiconductor overhead lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 658-667.
- Chowdhuri, P. (1996). *Electromagnetic Transients in Power Systems (High-Voltage Power Transmission Series)*. Tennessee: Research Studies Pre.
- Chowdhuri, P., & Gross, E. T. (1967). Voltage surges induced on overhead lines by lightning strokes. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 114(12).
- Cooray, V. (1994). Calculating Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: A Comparison of Two Coupling Models. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 179-182.
- Dan, Y., Zhang, Z., Bu, S., Wong, C.-N., & Lin, P. (2024). Analysis of Grounding Performance of Tower Grounding Electrodes in Elevated Terrain. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3305-3315.
- Djalel, D., Ali, H., & Fayçal, C. (2007). The Return-Stroke of Lightning Current, Source of Electromagnetic Fields (Study, Analysis and Modelling). *American Journal of Applied Sciences*, 42-48.
- Dommel, H. (1969). Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 388-399.
- Enyong, P. (2017). Performance of a Developed Short Transmission Line Module: A Survey of Load Power-Factor Effects. *London Journals of Engineering Research*, 7-18.
- Erduman, A., & Yıldız, F. (2019). IEC62305-2'ye Göre Yıldırım Risk Analizi: Hakkâri Üniversitesi Örneği. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 58-65.
- Farzanehrafat, A., & Watson, N. (2013). Power Quality State Estimator for Smart Distribution Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2183-2191.
- Furgal, J. (2020). Influence of Lightning Current Model on Simulations of Overvoltages in High Voltage Overhead Transmission Systems. *Energies*, 13(2), 1-10.
- Hardi, S., Mirza, F., Bukit, F., & Rohana, R. (2021). Influence of Lightning Characteristics on Back Flashover in Extra High Voltage Transmission Line: A case study. *Journal of Physics*, 1811.
- Holle, R. L. (2008). Annual rates of lightning fatalities by country. *20th International Lightning Detect, on Conference* (s. 1-14). Tucson, Arizona: mtmt.
- IEEE Standard 1410. (2010, 9 30). IEEE 1410-2010. Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. IEEE.
- Izadi, M., Abd Rahman, M., & Zaina, M. (2017). The influence of lightning induced voltage on the distribution power line polymer insulators. *PLoS ONE*, 12(2).
- Jernegan, M. (1928). Benjamin Franklin's "Electrical Kite" and Lightning Rod. *The New England Quarterly*, 180-196.
- Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman. (2014). The physics of lightning. *Atmospheric Research*, 147-241.
- Junzhang, O., & Zhonghui, Z. (2010). The Research of Fault Location of Transmission Line Based on Bergeron Model. *International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)* (s. V5-300-V5-304). Chengdu, China : IEEE Xplore.
- Kadioğlu, M. (2012). Türkiye'de iklim değişikliği risk yönetimi. Ankara: T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı.
- Leonidopoulos, G. (2019). Analysis of Electric Power Transmission Line Presenting Only Long-Wise Inductance. *Modelling, Measurement and Control*, 94-97.
- Luo, L. (2014). Research on grounding technique used in lightning protection of transmission line. *BioTechnology*, 8787-8794.
- Malelak, M., & Zoro, R. (2017). Lightning Protection System for High Voltage Transmission Line in Area with High Grounding Resistance. *International Conference on High Voltage Engineering and Power System (ICHVEPS)* (s. 350-355). Denpasar, Indonesia: IEEE Xplore.
- Mamiş, M., Arkan, M., & Keleş, C. (2013). Transmission Lines Fault Location Using Transient Signal Spectrum. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 714-718.
- Mamiş, M., Kaygusuz, A., & Köksal, M. (2010). State Variable Distributed-Parameter Representation of Transmission Line for Transient Simulations. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Science*, 31-42.
- Marshall, T., & Stolzenburg, M. (2001). Voltages inside and just above thunderstorms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D5), 4757-4768.
- Martínez-Velasco, J. A., & Castro-Aranda, F. (2010). Modeling of overhead transmission lines for lightning overvoltage calculations. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 120-131.
- MGM. (2025, 01 05). Yıldırım Takip Sistemi. T.C. ÇEVRE, ŞEHİRCİLİK VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ BAKANLIĞI Meteoroloji Genel Müdürlüğü: <https://www.mgm.gov.tr/sondurum/yildirim-takip.aspx> adresinden alındı

- Monzani, R. C., Prado, A. J., Kurokawa, S., Bovolato, L. F., & Filho, J. P. (2012). Using a Low Complexity Numeric Routine for Solving Electromagnetic Transient Simulations. V. Katsikis içinde, *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 3* (s. 463-484). Rijeka Hırvatistan: IntechOpen.
- Nguyen, T., & Holt, R. (2003). Lightning protection of transmission lines: Optimal shielding design procedure. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, 659-667.
- Özen, Ş. (2017). *Düşük Gerilim Güç Sistemleri*. Ankara: TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası.
- Özen, Ş. (2021). *Elektrik Elektronik Mühendisliğine Giriş*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Öztopal, A. (2017, Mayıs 02). Türkiye'nin Yıldırım ve Şimşek Gözlemlerinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, s. 304-313.
- Price, C. (2009). *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*. C. Price içinde, *Thunderstorms, Lightning and Climate Change* (s. 521-535). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Ravaglio, M. A., Küster, K. K., França Santos, S. L., Ribeiro Barrozo Toledo, L. F., Piantini, A., Lazzaretti, A. E., . . . da Silva Pinto, C. L. (2019). Evaluation of lightning-related faults that lead to distribution network outages: An experimental case study. *Electric Power Systems Research*, 174.
- Shariatinasab, R., & Gholinezhad, J. (2017). The Effect of Grounding System Modeling on Lightning-Related Studies of Transmission Lines. *Journal of Applied Research and Technology*, 545-554.
- Shehab, A. (2013). Design of Lightning Arresters for Electrical Power Systems Protection. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 11(6), 433-442.
- Silva, F. (2016). Comparison of Bergeron and Frequency-dependent cable models for the simulation of electromagnetic transients. 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC) (s. 1-6). Coimbra: Portugal.
- Silveira, F. H., Visacro, S., & Souza, R. E. (2017). Lightning performance of transmission lines: Assessing the quality of traditional methodologies to determine backflashover rate of transmission lines taking as reference results provided by an advanced approach. *Electric Power Systems Research*, 60-65.
- Simka, P., Straumann, U., & Franck, C. (2012). SF6 high voltage circuit breaker contact systems under lightning impulse and very fast transient voltage stress. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 855-864.
- Suyaroj, N., Premrudeepreechacharn, S., & Watson, N. (2017). Transient state estimation with the Bergeron transmission line model. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 806-819.
- Tilev-Tanriover, Ş., Kahraman, A., Kadioğlu, M., & Schultz, D. (2015). Lightning fatalities and injuries in Turkey. *Natural Hazards and Earth System Science*, 1881-1888.
- Tossani, F., Borghetti, A., Napolitano, F., Piantini, A., & Nucci, C. (2018). Lightning Performance of Overhead Power Distribution Lines in Urban Areas. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 581-588.
- Velasco, J. M. (2019). *Transient Analysis of Power Systems: A Practical Approach*. Barcelona: Wiley.
- Visacro, S., Silveira, F. H., Vale, M. H., & Pomar, G. D. (2021). Improvement of the lightning performance of transmission lines by combining conventional and non-conventional measures. *Electric Power Systems Research*, 195.
- Watson, N., & Arrillaga, J. (2003). *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*. London: UK: IE54.
- Watson, N., & Yu, K. (2008). Transient State Estimation. 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power (s. 1-6). Wollongong, NSW, Australia: IEEE.
- Yan, K., Vukovic, A., & Sewell, P. (2024). Two-Dimensional Coupled Electrothermal Method Based on the Unstructured Transmission-Line Modelling Method for Lightning Protection Simulations. *IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques*, 208-217.
- Yoldaş, A. (2019). Yıldırım Elektromanyetik Darbelerinin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkilerinin İzolatörler ve Topraklama Açısından İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Antalya, Türkiye.
- Yoldaş, A. Y., & Özen, Ş. (2023). Enerji İletim Hattı Güzergâh Seçiminde Yıldırım Faktörünün. ETUK VII. Elektrik Tesisleri Ulusal Kongre ve Sergisi (s. 1-9). İzmir, Türkiye: EMO.
- Yu, K., & Watson, N. (2007). An Approximate Method for Transient State Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(22), 1680-1687.
- Yücelbaş, Ş., Erduman, A., Yücelbaş, C., & Yıldız, F. (2021). Pre-estimation of Distance-Based Lightning Using Effective Meteorological Parameters. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1529-1539.
- Zhao, Z., Dang, D., Wu, G., Cao, X., Zhu, J., & Chen, L. (2011). Simulation Study on Transient Performance of Lightning Over-voltage of Transmission Lines. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (s. 520-524). Chengdu, China: IEEE.
- Zhao, Z., Dang, D., Wu, G., Cao, X., & Zhu, J. (2011). Simulation Study on Transient Performance of Lightning Over-voltage of Transmission Lines. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning (s. 520-524). Chengdu, China: IEEE.
- Zhong, Y., Kang, X., & Jiao, Z. (2014). A novel distance protection algorithm for long-distance transmission lines. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014) (s. 1-5). Copenhagen, Denmark: IET.