
Araştırma Makalesi / Research Article

Yıldırım Enerji Dağılımının S-Domeninde Analizi

Bilal TÜTÜNCÜ^{1*}, Asım KAYGUSUZ², Bülent URUL³

¹Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Van, Türkiye

²İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Malatya, Türkiye

³Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Isparta, Türkiye
(ORCID: 0000-0002-7439-268X) (ORCID: 0000-0003-2905-1816) (ORCID: 0000-0003-2656-2450)

Öz

Fosil yakıtlarının çevreye verdiği zarar ve tükenmeye yüz tutmasıyla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmış ve dolayısıyla büyük bir enerji kaynağı olan yıldırım akımının kullanılması fikri de rağbet görmeye başlamıştır. Yıldırım enerjisinin direk olarak kullanılması şimdiye kadar mümkün olmamış fakat dolaylı olarak kullanımıyla ilgili çok sayıda fikir yürütülmüştür. Yıldırım akımının dolaylı olarak kullanımıyla ilgili olarak ileri sürülen yöntemlerden biri de indüklenmeyle yıldırımın düştüğü noktanın çevresinde oluşan gerilimin kullanılmasıdır. Yıldırım akımı düştüğü noktada bir enerji ürettiğinden, bu akımın kuplaj yoluyla çevresindeki iletkenlerde indüklediği bir voltaj vardır. Bu çalışmada bir iletkene yıldırım düşmesiyle yakınındaki yere dik duran başka bir iletkende indüklediği gerilimin analizi için yeni bir yöntem geliştirilmiş ve MATLAB programı yardımıyla enerji dağılımının benzetimi yapılmıştır. Öncelikle iki iletkenin ortak empedans hesabı yapılmış ve daha sonra bu iletkenlerin arasındaki uzaklık ve iletkenlerin boyu üç farklı değerde alınarak indüklenen gerilimin benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim sonuçlarına göre iletkenlerin birbirine olan mesafesi ile ters orantılı olarak indüklenen gerilim değerinin değiştiği görülmüştür. Ayrıca ikinci iletkenin yüksekliği ile doğru orantılı olarak indüklenen gerilimin arttığı benzetim sonucunda görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yıldırım enerji dağılımı, kuplaj, yenilenebilir enerji, MATLAB.

Analysis of Lightning Energy Distribution in S-Domain

Abstract

The trend towards renewable energy sources has increased as fossil fuels are harmful for environment and have started to run out and therefore the idea of using a lightning current, which is a major source of energy, has begun to be popular. The direct use of lightning energy has not been possible until now, but there are many ideas about the indirect use of this high energy. A method that is proposed for the use of lightning current indirectly is to use the induced voltage around the strike location. As the lightning current generates an energy at the point it drops, there is also a voltage that this current induces in the conductors around it by coupling. In this study, a new method was developed for analyzing the voltage that is induced by a lightning strike on a conductive rod and the energy distribution was simulated by the MATLAB simulation program. Initially, common impedance of two conductors is calculated and the distance between these conductors and the length of the conductors are taken at four different values to simulate the induced voltage. According to these simulation results, it is seen that the induced voltage value is inversely proportional to the distance between the conductors. Furthermore, as a result of the simulation, the induced voltage increases directly proportional to the height of the second conductor.

Keywords: Lightning energy distribution, coupling, renewable energy, MATLAB.

1. Giriş

Elektrik enerjisini besleme terminalinden sabit veya nispeten hareketli bir yüke, herhangi bir araç olmaksızın iletme düşüncesi yani kablosuz güç aktarım fikri ilk olarak 1904 yılında Nikola Tesla tarafından önerilmiştir [1]. Wardencliff Tower Tesisinde büyük Tesla Bobini kurarak elektrik alan

*Sorumlu yazar: bilaltutuncu@yyu.edu.tr
Geliş Tarihi: 19.07.2019, 22.03.2020

üzerinden kablosuz güç iletimi içeren ilk deneyi gerçekleştirdi fakat aktarılan enerji her yöne yayıldı ve Colorado Springs'teki herhangi bir uzak noktada önemli miktarda kullanılabilir gücün bulunup bulunmayacağı konusunda hiçbir veri toplanamadı. Daha sonra, 1964'te SPS (Solar Power Satellite-Güneş Enerji Uydusu) projesinde Peter Glaser tarafından büyük miktarda yenilenebilir ve saf güneş enerjisinin yer istasyonuna bir mikrodalga ışını olarak iletilmesi fikri öngörülmüştür [2]. 1990'ların başında SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform- Sabit Yüksek İrtifa Röle Platformu) adlı programda, 22 Km irtifada sabit bir nokta etrafında uçan ve enerji yakıt ikmali, 2.45 GHz'lik bir mikrodalga ışını vasıtasıyla yerden aktarılan ilk insansız hava aracı tanıtılmıştır [3]. 2007'de Marin Soljacic ve meslektaşları tarafından MIT(Massachusetts Institute of Technology)'de yürütülen rezonans kuplaj deneyi dünya çapında büyük ilgi toplamıştır. Alıcı bobine bağlı bir 60 W ampul, başka bir verici bağlantı bobininden 2 m uzakta başarılı bir şekilde yakılmıştır [4]. Bu çalışma, pek çok başka araştırmacıya, kuplaj yoluyla kablosuz güç transferinin daha ayrıntılı anlaşılması ve daha geniş bir uygulama ile ele alınması için ilham vermiştir. Ayıca elektrik şebekelerinde kullanılan enerji depolama teknolojileri, yenilenebilir enerji kaynakları ile entegre edilip birincil kaynakların yetersiz kaldıkları noktalarda ve anlık tepe taleplerin karşılanmaması durumlarında yedek güç olarak kullanılması için çalışmalar da yapılmıştır [5].

Kablosuz güç aktarımının uygulamaları, taşınabilir tüketici elektroniğinden elektrikli araçların güçlendirilmesine kadar geniş bir yelpazenin yanı sıra sıklıkla şarj edilmesi gereken sensörler veya implante edilebilir biyomedikal cihazların şarj edilmesini de kapsar. Genel olarak, kablosuz güç iletimi dört kategoride sınıflandırılabilir: endüktif kuplaj rezonans kuplaj, mikrodalga ve lazer. Rezonans kuplaj yönteminin dezavantajı, güç enerji transferi yapılacak olan iki nesnenin aynı frekansta rezonansa ayarlanması zorunluluğudur. Mikrodalga ve lazer ile transferin dezavantajları ise sadece düşük güç ile uygulanabilir olmalarıdır [6].

Endüktif kuplaj ile kablosuz enerji transferinde besleme kaynağı olarak değerlendirilebilecek en güçlü enerji kaynaklarından biride hiç şüphesiz yıldırım enerjisidir. Yıldırımın elektriksel karakteristiği geçtiğimiz yüzyıla kadar bilinmiyordu. 20. yüzyıla gelindiğinde ise bu enerji kaynağının akımına bağlı olarak elektrik ve manyetik alanları, bulutun elektrostatığı, nasıl yüklendiği, yıldırımın fiziği, düşüş sıklığı, kutbiyeti, etkileri (iletim hatlarına ve çevreye) gibi birçok açıdan teknolojik imkânlar kullanılarak incelenmiştir [7-9]. Yıldırım darbeleri için kabul edilebilir ve doğru ölçümler ilk olarak Alman bilim adamı Pockels tarafından yıldırımın ortaya çıkardığı manyetik alan ölçümlerinin yıldırımın kendisi ile de ilişkili olduğu tespit edildikten sonra yapılabilmektedir. Zamanla fotoğraflar bireysel yıldırım çarpmalarının teşhis edilmesindeki deneylerde de kullanılmıştır. Yıldırım kanalının etrafında oluşturduğu elektrik alanı ölçerek bunu yıldırım fırtınalarının elektriksel yükü ve bunun akabinde ortaya çıkan yıldırım boşalmalarının yapısını tahmin etmekte kullanan ilk kişi C.T.R Wilson olmuştur [10]. 1960'a kadar devam eden bu çalışmalar uzay araçları, roket, uçak ve elektronik cihazların gelişmesi ve yıldırımdan zarar görmesi ve çeşitli şekilde etkilenmesiyle daha da aktif hale gelmiştir. 1967 senesinde yıldırım akımını ölçmek için Newman ilk olarak yıldırımı yapay yolla üretmeyi başarmıştır. Yine aynı sene Berger İsviçre'de şönt direnç ve çıkışına bağlı bir osiloskop kullanarak akım değerlerini ölçmüş ve bu görüntüleri kaydetmiştir. 1970'li yılların başında bu teknik Fransa, Amerika ve Japonya'da da kullanılmıştır [11].

Daha sonraki yıllarda Florida üniversitesinde Elektrik ve Bilgisayar mühendisliği bölümü bünyesinde uluslararası yıldırım araştırma merkezi (ICLR) kurulmuş ve Vladimir Rakov ve Martin Uman tarafından geniş çaplı araştırma, gözlem ve yapay tetiklemeli yıldırım deneyleri yapılmıştır [12]. Bugüne kadar yaklaşık 1000 defa denenilen bu tarz yıldırımların 300'e yakını Florida da Blanding kampında gerçekleştirilmiştir. Burada topraklanmış bakır bir kabloya bağlı bir küçük roket çubuğunun yukarıda yeterince yüklenmiş bir buluta doğru fırlatılmasıyla yıldırım tetiklenmiş ve bu yıldırım kanalının 0.1 ila 1.6 m'lik yatay bölgesindeki elektrik alan dalga şekilleri Pockel sensörleri yardımıyla ölçülmüş ve bu sayede birçok farklı yıldırım örneklerinin ölçülen elektrik alanlarına bağlı olarak enerji ve güç değerleri saptanmıştır [13].

1998 yılında Vladimir Rakov ve Martin Uman tarafından yıldırım deşarjı dört farklı formda modellenmiştir. Bunlar: Dinamik gaz modeli, Elektromanyetik Model, Dağılmış Parametrelili Devre Modeli ve Mühendislik Modelidir [14]. Dinamik gaz modeli veya diğer adıyla fiziksel model kütle, momentum ve enerjinin korunumunu tanımlayan hidrodinamiğin denklemlerinden yola çıkarak, giriş parametresi zamanın bir fonksiyonu olarak tahmini yıldırım kanal akımı iken çıkış modeli ise sıcaklık, basınç ve radyal koordinat ve zamanın bir fonksiyonu olarak kütle yoğunluğudur. Elektromanyetik

model mantığı uzaktan elektrik ve manyetik alanları hesaplanabilen yıldırım kanalındaki akım dağılımını bulmak için Maxwell denklemlerinin sayısal çözümlerini içeriyordu. Dağılım parametrelili devre modelinde ise yıldırım; R birim kanal boyundaki direnç, L Endüktans ve C ise Kapasitans olacak şekilde bir dikey R-L-C iletim hattında geçici bir süreçteki elektriksel boşalma gibi ele alınmıştır. Bu model çevresindeki elektrik ve manyetik alanı hesaplamak için zamana ve yüksekliğe bağlı kanal akımını tanımlamak için kullanılmıştır. Mühendislik modelinde ise zamana ve yüksekliğe bağlı yıldırım kanal akımı, akımın ölçülen kanal tabanındaki değeri temel alınarak modellenmiştir. Daha sonraları yıldırımın enerjisi üzerine yapılan çalışmalarda V. Rakov yer ile bulut arasındaki her yıldırımın yaklaşık 109 J enerji içerdiğini hesaplamıştır. $109 \text{ J} = 277.777 \text{ kW} \cdot \text{saat}$ (1 kW-saat = $3,6 \times 10^6 \text{ J}$) eder ki bu değer yaklaşık olarak 100 W'lık 4 adet lambayı bir ay süreyle yakacak bir enerjidir. Ayrıca yıldırımdaki enerjinin tamamı düştüğü noktaya inmemekte; büyük bir kısmı ısı, ışık, ses ve radyo dalgası olarak kaybolmaktadır [15-16].

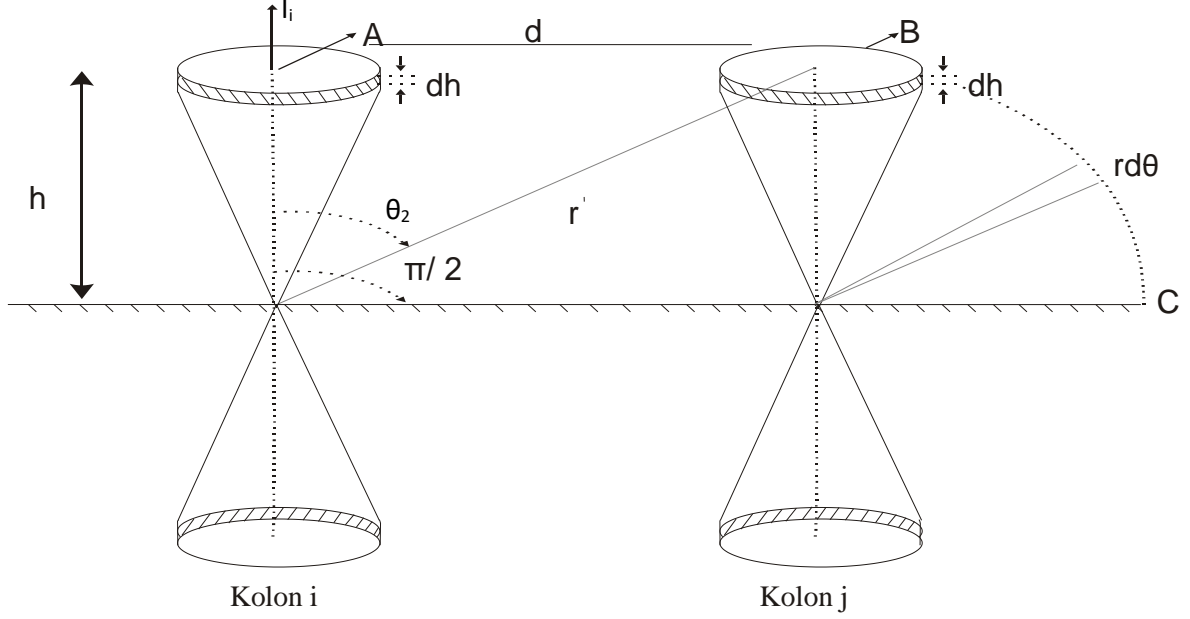
Yıldırım akımı çok yüksek yenilenebilir bir enerji kaynağı olmasına rağmen halen rüzgâr veya güneş enerjisi gibi kullanılabilir bir kaynak olamayışının iki ana sebebi vardır. Birincisi yıldırım deşarjındaki enerji çok yüksektir ve bu boşalma 10-4-10-5 saniye gibi çok kısa bir sürede gerçekleşmektedir. İkincisi yıldırım darbelerini yakalamak için çok sayıda yüksek kulelere ihtiyaç duyulacaktır ki bu hiç elverişli değildir [17]. Ancak yıldırım akımı düştüğü noktada bir enerji oluşturduğu gibi bu akımın kuplaj yoluyla çevredeki iletkenlerde de indüklediği bir gerilim vardır. Yani bu yüksek enerji kaynağı direk olmasa bile indirek olarak kablosuz güç transferi yöntemiyle kullanılabilir olduğu düşünülmektedir [18].

Bu çalışmada endüktif kuplaj ile kablosuz güç transferi için yapılan çalışmalara bir ışık tutması düşüncesi ile yıldırımın düştüğü noktadan mesafeye bağlı olarak gerilimin nasıl değiştiğini hesap etmek için yeni bir analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bunun için yere dik iki iletkenin ortak empedans hesabı yapılmış ve MATLAB programı yardımıyla birinci iletkene yıldırım düşmesi durumunda paralelindeki diğer iletkende indüklenen gerilim, farklı durumlar için analiz edilmiştir. Ayrıca yıldırım darbesiyle etrafında açığa çıkan enerjinin analizi için kullanılan elektrik alan metodunun iki temel formülü kodlanarak MATLAB'da 3 boyutlu grafiği çizilerek analizi yapılmıştır.

2. İki Dikey İletkenin Ortak Empedans Hesabı

İletim sistemlerinde yürüyen dalgaların analizi problemlerinde kullanılan ters Laplace veya Fourier dönüşümlerinin nümerik olarak yapılması gereklidir. Bunun için ilk adım olarak sistemin frekans domenindeki cevabı hesaplanır. Sistemde bulunan frekansa bağımlı parametreler modele dahil edilebilir. Frekans domeninde modellenen sistemde, istenen büyüklükler matematiksel olarak hesaplanır ve frekans domeninden, zaman domenine dönüşüm için Laplace veya Fourier dönüşüm yöntemleri kullanılır. İletim hattının bazı parametreleri frekans bağımlı olduğundan, dönüşüm yöntemleri kullanılarak iletim hatlarının geçici durumu analiz edilirse, frekans bağımlı parametreler doğrudan çözüme dahil edilmesi mümkün olur. $j\omega$ veya s -domeni dönüşüm tekniğinde devrenin herhangi bir noktasındaki geçici durumdaki gerilim veya akım ifadesi çıkartılabilir [19]. Daha sonra ise nümerik ters Laplace veya Fourier dönüşümleri kullanılarak frekans bölgesinden zaman bölgesine geçilir. Klasik Laplace dönüşümüyle, frekans-zaman dönüşümü bilgisayarda çok zaman aldığından, hesaplamaları hızlandıran nümerik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlisi olan Hosono [20] tarafından geliştirilen hızlı ters Laplace dönüşümü (FILT) çok hızlı bir çözüm yöntemi sunmaktadır. Bu yöntemle uniform olmayan iletim hatlarının yıldırım analizi, kısa devre arıza analizi ve uzun iletim hatlarının enerjilenmesi gibi güç sistemlerinin geçici durum çözümlerinde kullanılmıştır ve uniform olmayan tek fazlı iletim hattı modeli kullanılarak frekans domeninde yıldırım analizi yapılmıştır [21]. Mamis ve Koksall [22] ise kayıplı ve frekans bağımlı elektrik direği uniform olmayan hat modelini ele alarak analiz etmiştir. Dönüşüm metodu frekans bağımlı parametreleri doğrudan çözüme dâhil etmesi nedeniyle gerçek çözüme yakın sonuç verir.

Bu çalışmada iletim hattının zaman domeni çözümüne geçmek için kullanılan FILT tekniği uygulanırken öncelikle a , p ve k 'nin uygun değerlerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada katsayılar için uygun değerler $a=5$, $p=15$ ve $k=20$ olarak bulunmuştur. Yeryüzünden h yükseklikte iki eleman A ve B ile iki paralel iletken göz önüne alınmıştır. Öncelikle akımının A elemanından aktığı varsayılmıştır. Bu durum ayrıntısıyla Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. İki dikey iletkenin ortak empedansı

Koni şeklindeki hattın enine elektromanyetik alan formülleri aşağıdaki gibidir [23]:

$$E_{\theta} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} H_{\varphi} \quad (1)$$

$$H_{\varphi} = \frac{A \cdot e^{-j\beta r}}{r \cdot \sin \theta} \quad (2)$$

(2) eşitliği (1)'de yerine yazılırsa;

$$E_{\theta} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{A \cdot e^{-j\beta r}}{r \cdot \sin \theta} \quad (3)$$

olarak bulunur. Burada A manyetik vektör potansiyel büyüklüğüdür. Konideki ' dh ' elemanının yere göre gerilimi;

$$V = \int_{\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} E_{\theta} \cdot r \cdot d\theta \quad (4)$$

Olarak elde edilir. B elementinin gerilimi, E_{θ} 'nin r' yarıçapına göre dairesel yörüngesi boyunca C 'den B 'ye integrali alınarak belirlenir ve sonuç aşağıdaki gibi olur [24];

$$v_j = A \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot e^{-j\beta r'} \cdot \ln \left[\cot \frac{\theta_2}{2} \right] \quad (5)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \quad (6)$$

A 'dan akan akım;

$$I = \int_0^{2\pi} H_{\varphi} \cdot r_c \cdot d\varphi \quad (7)$$

(2) eşitliği (7)'de yerine yazılıp integral alınır;

$$I = 2\pi \cdot A \cdot e^{-j\beta r} \quad (8)$$

olur. i ve j kolonları arasındaki ortak karakteristik empedans;

$$z_c^{ij} = \frac{V_j}{I_i} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{e^{-j\beta(r'-r)}}{2\pi} \ln \left[\cot \left(\frac{\theta_2}{2} \right) \right] \quad (9)$$

$$\cot \left(\frac{\theta_2}{2} \right) = \frac{\sqrt{h^2 + d^2} + h}{d} \quad (10)$$

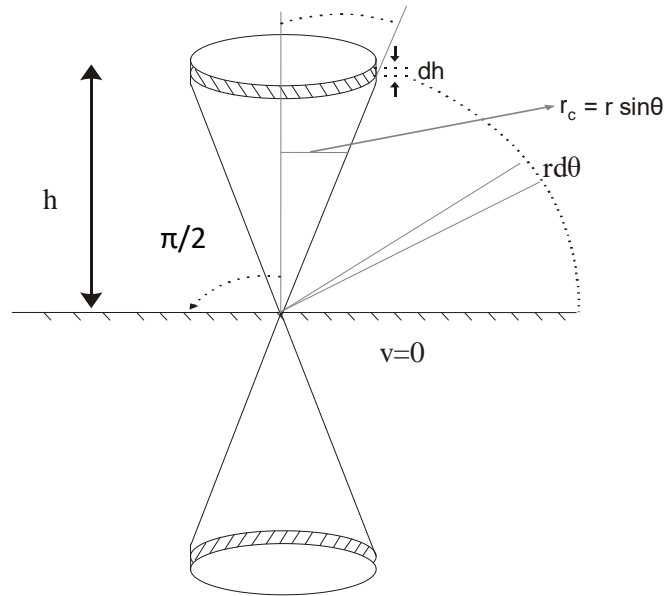
olarak bulunur [19]. Çok iletkenli sistem için karakteristik empedans matrisini belirlemek için öz alanları yazalım. Öz karakteristik empedans aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$Z_c = \frac{V}{I} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \left(\cot \frac{\theta_1}{2} \right) \quad (11)$$

Burada,

$$\cot \left(\frac{\theta_1}{2} \right) = \frac{1 + \cos \theta_1}{\sin \theta_1} = \frac{\sqrt{h^2 + r_c^2} + h}{r_c} \quad (12)$$

şeklinde yazılır. Yere dik bir iletken kolonun yüksekliği, yere göre açısı, yarıçapı gibi konum bilgileri ayrıntılı olarak Şekil 2'de verildiği gibidir [19].



Şekil 2. Dikey iletkenin öz karakteristik empedansın gösterimi

Öz ve ortak z_c^{ii} ve z_c^{ij} ile karakteristik empedans matrisi belirlenir. Temel elektromanyetik teoriye göre L_G bu sistemin geometrik endüktans matrisi, Z_c karakteristik empedans matrisiyle ilişkilidir [25].

$$L_G = \sqrt{\mu\varepsilon} \cdot Z_c \quad (13)$$

Sonuçta L_G matrisinin öz ve ortak terimleri aşağıdaki gibi yazılırlar:

$$L_G^{ii} = \left(\frac{\mu}{2\pi} \right) \ln \left(\frac{\sqrt{h^2 + r_c^2} + h}{r_c} \right) \quad (14)$$

$$L_G^{ij} = \frac{\mu}{2\pi} \cdot e^{-j\beta(r'-r)} \cdot \ln \frac{\sqrt{h^2 + d^2} + h}{d} \quad (15)$$

Çok iletkenli sistemin geometrik kapasitans matrisini hesaplamak içinse aşağıdaki formül kullanılır:

$$C_G = \mu \cdot \varepsilon (L_G)^{-1} \quad (16)$$

Yer iletkenliğinin sonlu kayıplarından dolayı (14) eşitliği (15)'de “*complex depth of images*” metodu vasıtasıyla hesaba katılırsa “*p*” yeryüzünün kompleks kabuk derinliği alınarak [19];

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} \quad (17)$$

bulunabilir. Burada;

μ =toprağın manyetik geçirgenliği, σ =Toprağın iletkenliği, ω = Frekans'tır. h yerine $h+p$ yazılıp p hesaba dahil edildiğinde yeni endüktans;

$$L_M^{ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_c^2} + h+p}{r_c} \right] \quad (18)$$

olarak bulunur. Geometrik L_G ve kompleks endüktans L_{CPX}^{ii} kullanılarak toplam endüktans aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$L_M^{ii} = L_G^{ii} + L_{CPX}^{ii} \quad (19)$$

$$L_{CPX}^{ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_c^2} + (h+p)}{\sqrt{h^2 + r_c^2} + h} \right] \quad (20)$$

L_{CPX}^{ii} 'in reel kısmı L_E^{ii} ile ilişkilidir.

$$L_E^{ii} = \text{Re} \{ L_{CPX}^{ii} \} \quad (21)$$

L_{CPX}^{ii} 'in imajiner kısmı ise R_E^{ii} ile ilişkilidir ve aşağıdaki gibi yazılır:

$$R_E^{ii} = -\omega I_m \{ L_{CPX}^{ii} \} \quad (22)$$

Önceden yazılan modifiye edilmiş ortak endüktansta h yerine $h+p$ yazılarak;

$$L_M^{ij} = \frac{\mu}{2\pi} \left(\frac{e^{-j\beta r'}}{e^{-j\beta r}} \right) \ln \left[\frac{\sqrt{(h+p)^2 + d^2} + h+p}{d} \right] \quad (23)$$

$$L_{CPX}^{ij} = \frac{\mu}{2\pi} \left(\frac{e^{-j\beta r'}}{e^{-j\beta r}} \right) \ln \left[\frac{\sqrt{(h+p)^2 + d^2} + h+p}{\sqrt{h^2 + d^2} + d} \right] \quad (24)$$

olur. L_{CPX}^{ij} 'in reel kısmı L_E^{ij} :

$$L_E^{ij} = \text{Re} \{ L_{CPX}^{ij} \} \quad (25)$$

ve L_{CPX}^{ij} 'in imajiner kısmı R_E^{ij} :

$$R_E^{ij} = -\omega I_m \{ L_{CPX}^{ij} \} \quad (26)$$

olarak yazılır. Aşağıdaki yüksek frekans ifadesi bu matrislerin köşegen elementlerinin hesabında kullanılır;

$$j\omega L_C^{ii} + R_C^{ii} = \frac{\sqrt{j\omega\mu\rho}}{2\pi r_c} \quad (27)$$

Burada ρ sütun materyalinin direncidir. Bir dik iletkenin karakteristik empedansını hesaplamak için birçok formül vardır. Tüm bunlar $h \gg r$ olduğu durumlarda iyi sonuç verir fakat buradaki formüller $h \ll r$ olduğu durumlar için verilmiştir.

2.1. Kolonları gruplama

Bir demet modelinin sütunlarını çoklu iletken sistemi olarak düşündüğümüzde frekans domeninde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$-\frac{dV}{dx} = Z \cdot I \quad (28)$$

$$-\frac{dI}{dx} = Y \cdot V \quad (29)$$

Burada $Z=j\omega L+R$ ve $Y=j\omega C_G$ ve “n” demet modelindeki sütun numarasını göstermek koşuluyla V 'nin elemanları V_1, V_2, \dots, V_n , ve I 'nin elemanlarıysa I_1, I_2, \dots, I_n 'dir.

$$\frac{dV_1}{dx} = \dots = \frac{dV_n}{dx} = \frac{dV}{dx} \quad (30)$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (31)$$

(28) 'e Kron'un indirgeme yöntemi uygulanırsa [25];

$$-\frac{dV}{dx} = Z_{eq} \cdot I \quad (32)$$

$$Z_{eq} = R + j\omega L \quad (33)$$

olur. Aynı şekilde (29)'a Kron'un indirgeme yöntemi uygulanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

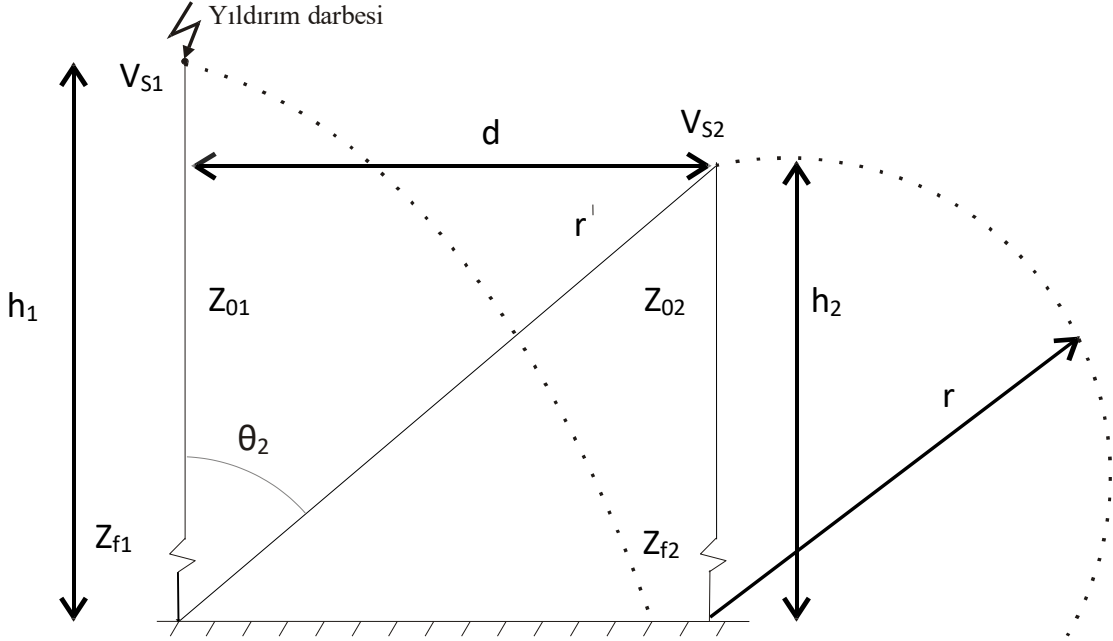
$$-\frac{dI}{dx} = Y_{eq} \cdot V \quad (34)$$

$$Y_{eq} = j\omega C_{eq} = j\omega \sum_{i,j=1}^n C_G^{ij} \quad (35)$$

2.2. Yere dik iki iletken arasındaki kuplaj matrisi

Yere dik olan h_1 yüksekliğindeki bir iletkene yıldırım düşmesi durumunda paralelindeki yere dik bir diğer h_2 yüksekliğindeki iletkende indüklediği gerilimi hesaplamak için yukarıda bulunan karakteristik empedans eşitlikleri kullanılabilir.

Birinci iletkene yıldırım düşmesi durumunda ikinci iletkende indüklenen gerilimi bulmak için gerekli olan yükseklik ve uzaklık gibi konum bilgileri ve gerekli bazı parametreler Şekil 3’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3. Yere dik iki iletken arasındaki kuplajlık nedeniyle indüklenen gerilimin gösterimi

Şekilde görülen bazı kısaltmalar aşağıdaki gibidir:

$$r = h_2$$

$$r' = \sqrt{h_2^2 + d^2}$$

$$r_c = r \cdot \sin \theta_1$$

$$Z = sL + R$$

Z empedans hesabı eşitlik (14) ve (15)'de verilmişti. Buradan Y admitans matrisinin hesabı için kapasitans ve endüktans eşitlikleri;

$$C_G = \mu \cdot \varepsilon (L_G)^{-1} \quad (36)$$

$$L_G = \begin{bmatrix} L_G^{11} & L_G^{12} \\ L_G^{21} & L_G^{22} \end{bmatrix} \quad (37)$$

iken admitans;

$$Y = sC_G \quad (38)$$

olarak bulunur [19]. Empedans Z ve admitans Y, matris formunda aşağıdaki şekilde gösterilir;

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

Burada;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}, \quad \gamma = \sqrt{ZY} \quad (39)$$

olarak verilir. Yıldırım Kuplaj Empedans Matrisi (YKEM) [25] aynı metotla hesaplanırsa;

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (40)$$

olur ve buradan gerilim ve akım eşitlikleri aşağıdaki gibi olur;

$$V_{S1} = e_{11} I_{S1} \quad (41)$$

$$V_{S2} = e_{21} I_{S1}$$

$$I_S = \frac{V_{S1}}{Z_S} + \frac{V_{S1}}{e_{11}} \quad (42)$$

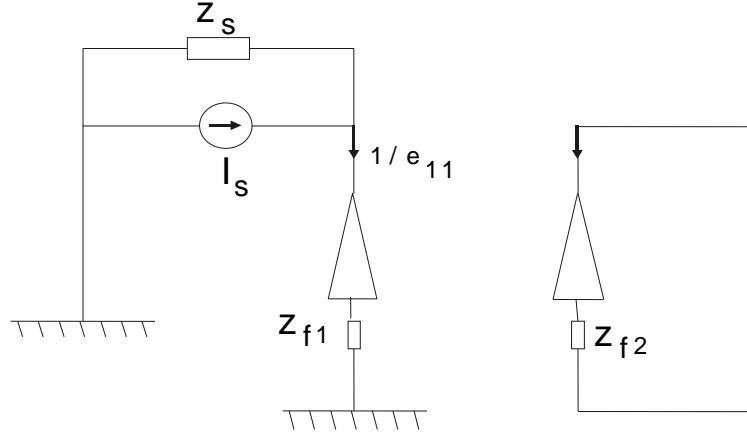
(42) denkleminde birinci iletkenin gerilimi;

$$V_{S1} = \frac{I_S}{\frac{1}{Z_S} + \frac{1}{e_{11}}} \quad (43)$$

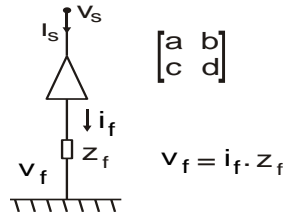
olarak elde edilir ve buradan;

$$I_{S1} = \frac{V_{S1}}{e_{11}} \quad (44)$$

olarak alınır. İkinci iletkende (direkte) indüklenen gerilim $V_{S2}=e_{21}.I_{S1}$ olarak bulunmuş olur. Burada elde edilen formüllere her iletkenin topraklama direncinin eklenmesi gerekmektedir. Çünkü her iletken (veya iletim direği) yeryüzüne topraklanmaktadır. Şekil 4’de topraklama direnci eklenmiş iki iletkenin ortak elemanlarını hesaplamak için verilen eşdeğeri görülmektedir. Şekil 5’de ise bir iletken için ayrıntılı durum gösterilmiştir.



Şekil 4. Topraklama direnci eklenmiş iki dik iletkenin eşdeğeri



Şekil 5. Yere dik iletkenin empedansının ayrıntılı gösterimi

Kuplajlığı direğin admitans ifadesi ile ilişkilendirmek için;

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_f \cdot i_f \\ i_f \end{bmatrix} \quad (45)$$

olarak yazılır ve buradan;

$$V_S = (a \cdot Z_f + b) i_f \quad (46)$$

$$I_S = (c \cdot Z_f + d) i_f \quad (47)$$

olarak bulunur ve (46) ve (47) eşitliklerinden;

$$i_f = (c \cdot Z_f + d)^{-1} \cdot I_S \quad (48)$$

$$V_S = \frac{a \cdot Z_f + b}{c \cdot Z_f + d} \cdot I_S \quad (49)$$

olur. Buradan YKEM içine Z_f dahil edilmek istenirse;

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad z_o = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad \gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$$

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

olduğundan yola çıkarak aşağıdaki gibi:

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ \dots \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \\ c_{11} & c_{12} & d_{11} & d_{12} \\ c_{21} & c_{22} & d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} \quad (50)$$

olur. Burada;

$$V_{f1} = Z_{f1} \cdot I_{f1} \quad (51)$$

$$V_{f2} = Z_{f2} \cdot I_{f2} \quad (52)$$

olur. Akım ve gerilim değerleri ayrı ayrı yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \end{bmatrix} = [A_{Zf}] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} = \{[A_{Zf} + B]\} [I_f] \quad (53)$$

$$\begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = [C_{Zf}] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} = \{[C_{Zf} + D]\} [I_f] \quad (54)$$

olarak bulunur. Eşitlik (48)'de $I_f = (c \cdot Z_f + d)^{-1} \cdot I_s$ olduğundan gerilim matrisi;

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \end{bmatrix} = \left\{ [A_{Zf} + B] [C_{Zf} + D]^{-1} \right\} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} \quad (55)$$

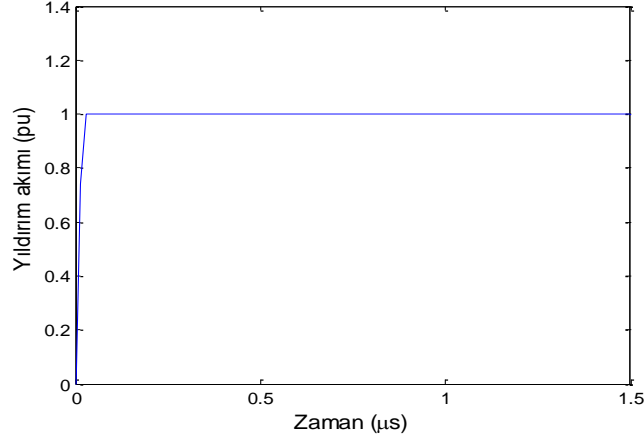
olur. Burada;

$$C_{Zf} = \begin{bmatrix} c_{11} Z_{f1} & c_{12} Z_{f2} \\ c_{21} Z_{f1} & c_{22} Z_{f2} \end{bmatrix} \quad (56)$$

$$A_{Zf} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{f1} & 0 \\ 0 & Z_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} Z_{f1} & a_{12} Z_{f2} \\ a_{21} Z_{f1} & a_{22} Z_{f2} \end{bmatrix} \quad (57)$$

3. Yıldırım Düşen İletkenin Çevresinde Alan Dağılımının Analizi

Bir önceki bölümde elde edilen eşitlikler MATLAB programı kullanılarak modellenmiştir. Yıldırımın düştüğü bir iletkenin paralelindeki diğer bir iletkende indüklediği gerilim- V_{S2} değeri farklı koşullar için elde edildi. Öncelikle h_1 ve h_2 değerleri sabit tutulup, d değeri değiştirilerek uzaklığın indüklenen gerilime etkisi incelendi. Daha sonra, iki iletken arasındaki uzaklık d ve ikinci iletkenin yüksekliği h_2 sabit tutulup, birinci iletkenin yüksekliğinin değişimiyle ikinci iletkende indüklenen gerilimdeki değişiklik gözlemlendi. Üçüncü durumda d ve h_1 sabit tutulup h_2 değeri değiştirildi. Buradaki analizlerde indüklenen gerilimlerin tepe noktalarını daha iyi görmek için yıldırım akımının dalga şekli rampa olarak alınmış ve şekil 6' da gösterilmiştir. Yıldırım akımının birim değeri (pu-per unit) 0.1 μ s den daha kısa bir sürede tepe değerine ulaşmaktadır.

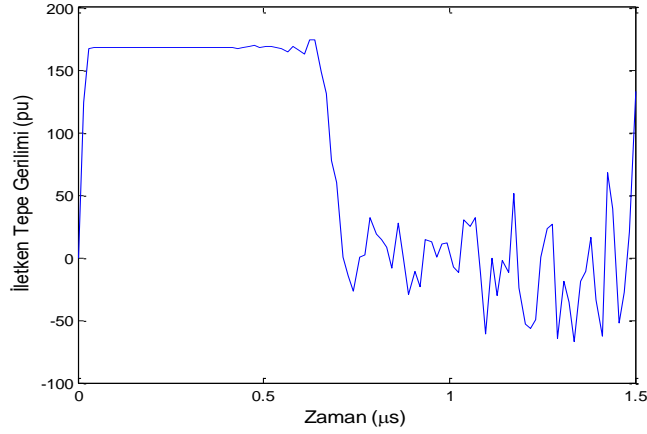


Şekil 6. Yıldırım akımının dalga şekli

3.1. İletkenler arası mesafenin indüklenen gerilimdeki etkisi

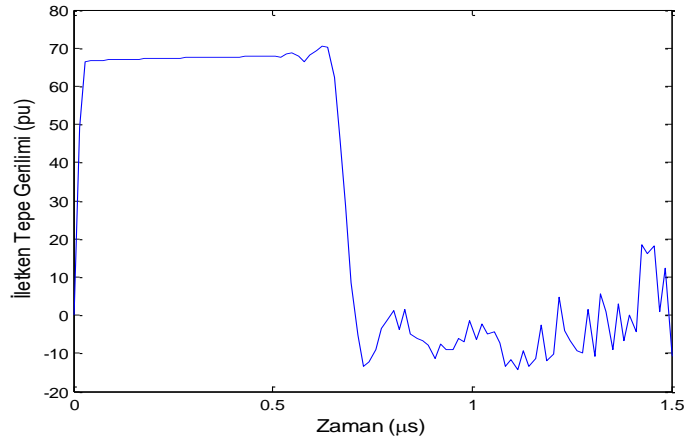
Uzaklığın indüklenen gerilim üzerindeki etkisi, yükseklikler 100 m’de sabit tutulup iletkenler arası mesafe $d=1$ m, $d=25$ m, $d=50$ m olmak üzere üç farklı değer verilerek hesaplanmıştır.

Örnek 1: $d=1$ m alındı. Sonuç Şekil 7 ‘de verilmiştir.



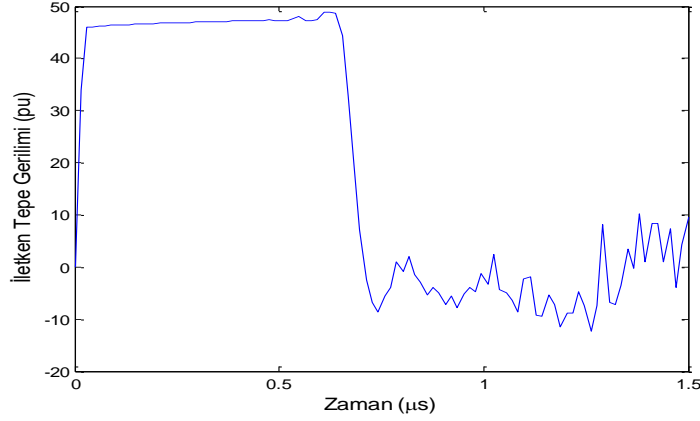
Şekil 7. $h_1=100$ m, $h_2=100$ m ve $d=1$ m iken benzetim sonucu

Örnek 2: $d=25$ m alındı. Sonuç Şekil 8 ‘de verilmiştir.



Şekil 8. $h_1=100$ m, $h_2=100$ m ve $d=25$ m iken benzetim sonucu

Örnek 3: $d=50$ m alındı. Sonuç Şekil 9 ‘da verilmiştir.



Şekil 9. $h_1=100$ m, $h_2=100$ m ve $d=50$ m iken benzetim sonucu

Örnek 1, Örnek 2, ve Örnek 3’ deki sonuçlara bakıldığında birinci ve ikinci iletkenin boyu h_1 ve h_2 sabit tutulduğunda ikinci iletkende indüklenen gerilim V_{S2} , iki iletken arasındaki mesafe d ile ters orantılı olarak değiştiği görülür. Birinci örnekte, iletkenler arası mesafe 1 m ve indüklenen gerilim yaklaşık 160 pu iken son örnekte iletkenler arası mesafe 50 m’ye çıkarıldığında indüklenen gerilim yaklaşık 45 pu’ya kadar düştüğü görülür. Elde edilen sonuçlar özet olarak Tablo 1’de verilmiştir. Bu sonuca göre ikinci iletkende indüklenen gerilim değerini artırmak için iletkenler mümkün mertebe yakın tutulmalıdır.

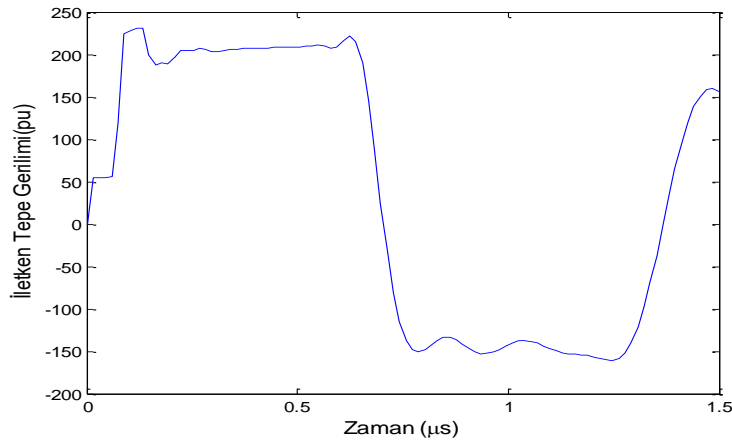
Tablo 1. İletkenler arası mesafenin etkisi

İletkenler arası mesafe	İndüklenen gerilimin tepe değeri
1 m	160 pu
25 m	70 pu
50 m	45 u

3.2. Yıldırımın düştüğü iletkenin yüksekliğinin indüklenme gerilimindeki etkisi

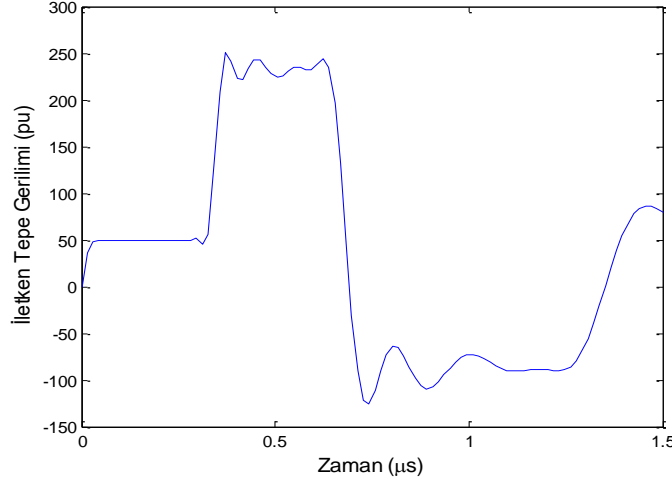
Bu bölümde yıldırım düşen iletkenin yüksekliğinin indüklenen gerilimdeki etkisini ölçmek için iletkenler arası mesafe 50 m ve ikinci iletkenin boyu 100 m’de sabit tutularak birinci iletkenin boyu h_1 sırasıyla 10 m, 50 m, 100 m olmak üzere üç farklı değer girilerek analiz edilmiştir.

Örnek 4: Birinci iletkenin yüksekliği $h_1=10$ m alınarak sonuç Şekil 10 ‘da verilmiştir.



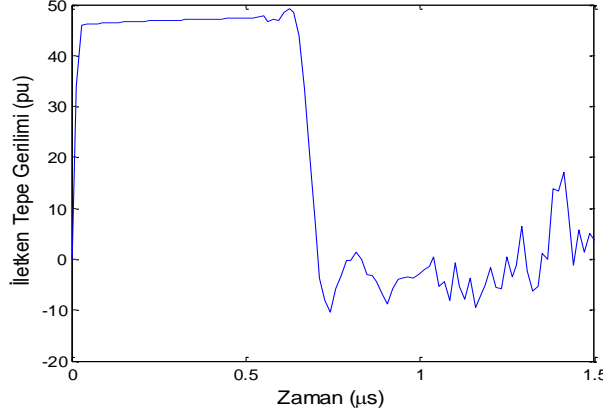
Şekil 10. $d=50$ m, $h_2=100$ m ve $h_1=10$ m iken benzetim sonucu

Örnek 5: Birinci iletkenin yüksekliği $h_1=50$ m alınarak sonuç Şekil 11 'de verilmiştir.



Şekil 11. $d=50$ m, $h_2=100$ m ve $h_1=50$ m iken benzetim sonucu

Örnek 6: Birinci iletkenin yüksekliği $h_1=100$ m alınarak sonuç Şekil 12 'de verilmiştir.



Şekil 12. $d=50$ m, $h_2=100$ m ve $h_1=100$ m iken benzetim sonucu

Elde edilen sonuçlar özet olarak Tablo 2'de verilmiştir. Örnek 4, Örnek 5 ve Örnek 6'daki sonuçlara ve Tablo 2'ye bakıldığında ikinci iletkenin boyu h_2 ve iki iletken arasındaki mesafe d sabit tutulduğunda, ikinci iletkende indüklenen gerilim VS_2 , h_1 ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. $h_1=10$ m iken VS_2 'nin ilk tepe değeri 55.9 pu seviyesindeyken, $h_1=100$ m 'ye çıkarıldığında VS_2 'nin ilk tepe değeri 46 pu'a kadar düştüğü görülür. Fakat direğin alt noktasından yansıma olduktan sonra tüm durumlar için tepe geriliminin yaklaşık olarak 250 pu değerine çıktığı şekillerden görülmektedir.

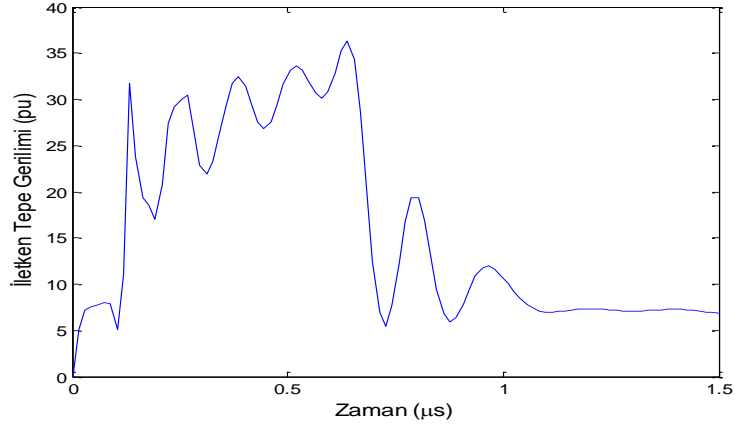
Tablo 2. Yıldırım düşen iletkenin boyunun indüklenen gerilime etkisi

Yıldırım düşen iletkenin boyu	İndüklenen gerilimin ilk tepe değeri
10 m	55.9 pu
50 m	48.6 pu
100 m	46.0 pu

3.3. Yıldırım düşen dikey iletkenin yakınındaki iletkenin yüksekliğinin etkisi

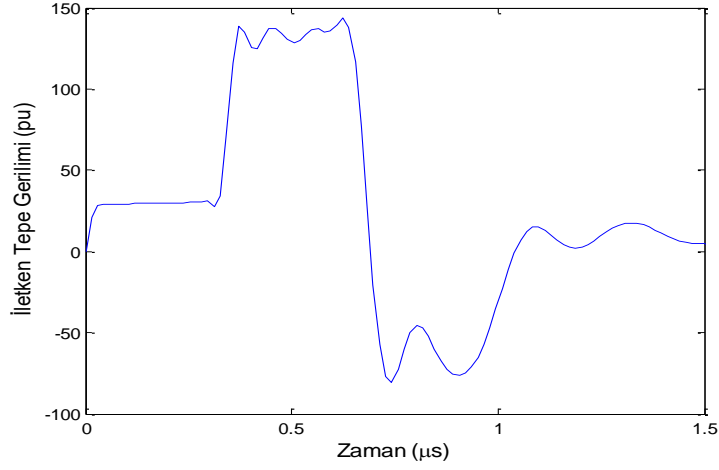
Bu bölümde yıldırım düşen iletkenin yakınındaki direğin yüksekliğinin indüklenen gerilimdeki etkisini ölçmek için iletkenler arası mesafe 50 m ve birinci iletkenin boyu 100 m'de sabit tutularak ikinci iletkenin boyu h_2 sırasıyla 10 m, 50 m, 100 m olmak üzere dört farklı değer girilerek analiz edilmiştir.

Örnek 7: İkinci iletkenin boyu $h_2=10$ m alınarak benzetme sonucu Şekil 13’de verilmiştir.



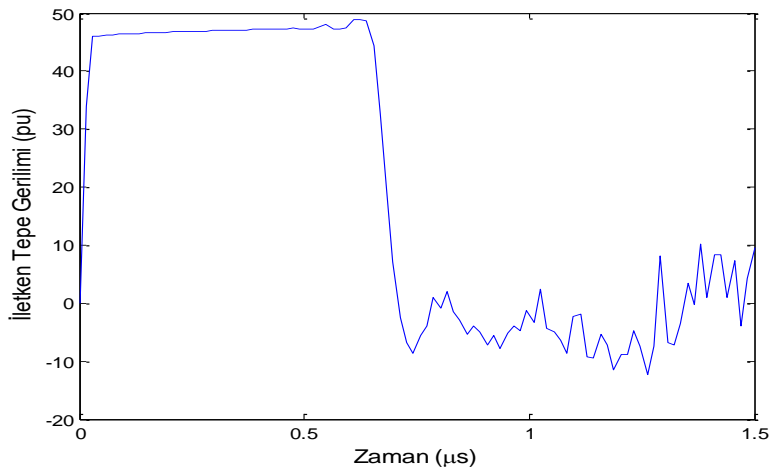
Şekil 13. $d=50$ m, $h_1=100$ m ve $h_2=10$ m iken benzetim sonucu

Örnek 8: İkinci iletkenin boyu $h_2=50$ m alındı. Benzetme sonucu Şekil 14’de verilmiştir.



Şekil 14. $d=50$ m, $h_1=100$ m ve $h_2=50$ m iken benzetim sonucu

Örnek 9: İkinci iletkenin boyu $h_2=100$ m alındı. Benzetme sonucu Şekil 15’de verilmiştir.



Şekil 15. $d=50$ m, $h_1=100$ m ve $h_2=100$ m iken benzetim sonucu

Elde edilen sonuçlar özet olarak Tablo 3’de verilmiştir. Görüldüğü gibi birinci iletkenin boyu h1 ve iki iletken arasındaki mesafe d sabit tutulup h2 değeri artırıldığında, ikinci iletkende indüklenen gerilimin ilk tepe değerinin giderek arttığı görülür. İkinci iletkenin boyu 10 m’den 100 m’ye çıkarıldığında indüklenen gerilimin ilk tepe değeri de 7 pu’dan 46 pu’e kadar çıktığı görülür. Bu sonuca göre ikinci iletkende indüklenen gerilim, h2 ile doğru orantılı olarak artacaktır. Şekillerde görüldüğü gibi direğin alt noktasından yansıma olduktan sonra 35 pu ile 140 pu arasında değişen değerlere ulaşmaktadır.

Tablo 3. Yıldırım düşen iletkenin yakınındaki direğin yüksekliğinin indüklenen gerilimdeki etkisi

Yıldırım düşen iletkenin yakınındaki iletkenin boyu	İndüklenen gerilimin ilk tepe değeri
10 m	7 pu
50 m	28 pu
100 m	46 pu

4. Yıldırım Enerjisinin Elektrik Alan Metodu İle Analizi

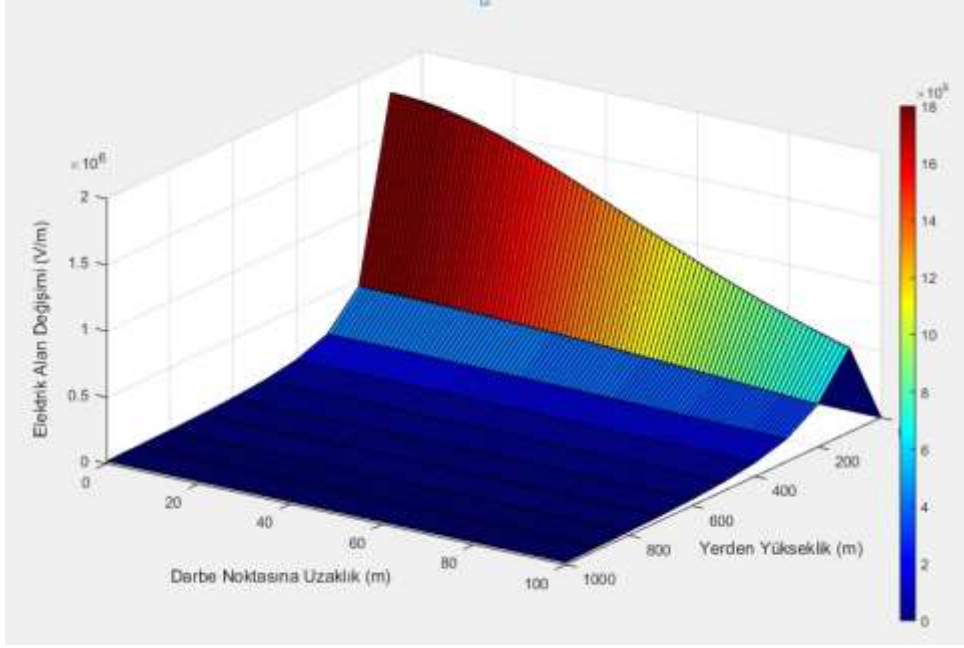
Yıldırımın açığa çıkan enerjisi direk olarak hesaplamak çok zordur. Bu yüzden yıldırım düşmesiyle yayılan enerjisi hesaplamak için birçok modelleme yapılmış ve birçok metod kullanılmıştır. Yıldırım enerjisinin tahmini ve ortalama bir değerini hesaplamak için şimdiye kadar yapılan tüm çalışmaları üç ayrı metotta sınıflandırabiliriz. Bunlar; elektrik alan metodu, optiksel metod ve akustik metod. Buluttan yere iletilen yük miktarının değerlendirildiği elektriksel metod ilk olarak Wilson tarafından gösterilmiştir. Wilson, yerden H yükseklikte bulunan bulutun merkezinde toplam yük Q iken yıldırım darbesinin D uzaklığında ölçülen alan değişimi F’i aşağıdaki şekilde formülize etmiştir [21]:

$$F = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{H}{\sqrt{(H^2 + D^2)^3}} \right) \text{ V/m} \quad (58)$$

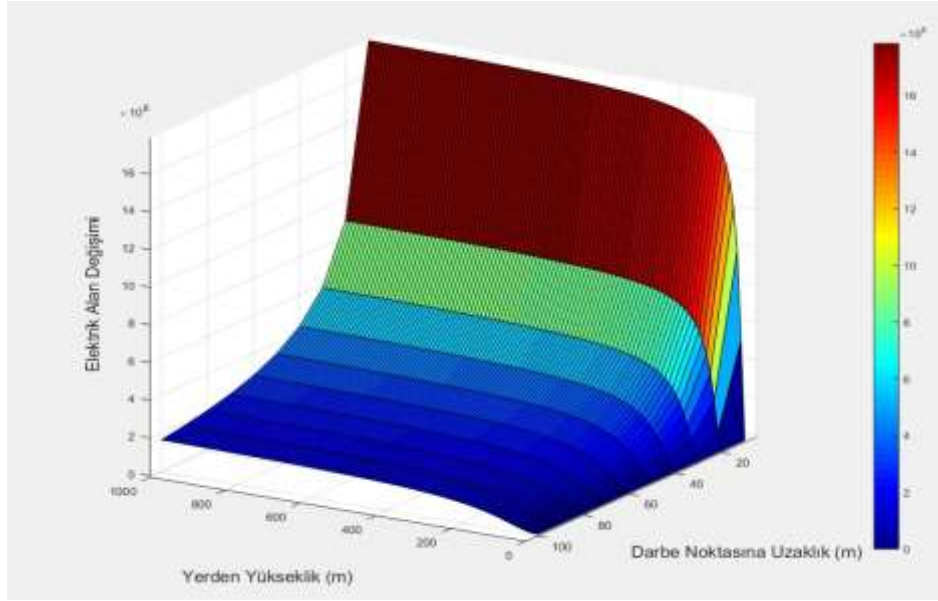
Daha sonraki çalışmalarda ise Malan, H yüksekliğinde bir bulutun ve yıldırım kanalının merkezinden D uzaklığındaki düzgün bir yıldırım öncü darbe sütunu vasıtasıyla boşalan yük miktarı Q’nun oluşturduğu alan değişimini aşağıdaki gibi göstermiştir [21]:

$$F = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{\sqrt{H^2 + D^2}} \right) \text{ V/m} \quad (59)$$

Malan’ın hesapladığı bu alan değişim formülü yıldırım öncü darbesi içindi. Bu öncü darbe tam darbeye tamamlandığı zaman (59) eşitliğinde elde edilen değer (58)’dekiyle aynı olacaktır. Bu eşitliklerde, bulutun yerden yüksekliği H =1000 m ve toplam boşalan yük Q= 1 C alınarak yıldırım darbe noktasından 100 m’ye kadar olan alan değişimi MATLAB’da analiz edilerek benzetim sonuçları Şekil 16 ve Şekil 17’de verilmiştir. Wilson’un alan değişim formülünün benzetim sonucuna göre yıldırım darbe noktasında yani D=0 ‘da alan değişimi yaklaşık 1.8.10⁶ V/m iken Malan’ın formülüne göre sonsuza gitmektedir. Ayrıca Wilson (58) eşitliğini tüm yıldırım darbesi için vermişken, Malan ise (59) eşitliğini sadece öncü darbe için vermiştir. Bu yüzden Malan’ın verdiği eşitliğin benzetim sonucu daha hızlı değişim gösterirken Wilson’un eşitliği nispeten daha uzun mesafede değişim gösterdiği görülür.



Şekil 16. Wilson elektrik alan metoduna göre Yıldırım enerji analizi



Şekil 17. Malan elektrik alan metoduna göre yıldırım enerji analizi

5. Sonuç

Bu çalışmada endüktif kuplaj yoluyla kablosuz güç transferi için çok güçlü bir kaynak olarak değerlendirilebilecek olan yıldırım enerjisi s-domeninde analiz edilmiştir. Bunun için; bir iletkene yıldırım düşmesiyle yakınında yere dik duran başka bir iletkende indüklediği gerilimin analizi için yeni bir yöntem geliştirilmiş ve MATLAB benzetim programı yardımıyla sonuçlar elde edilmiştir. Öncelikle iki iletkenin ortak empedans hesabı yapılmış ve daha sonra bu iletkenlerin arasındaki uzaklık ve iletkenlerin boyu üç farklı değerde alınarak indüklenen gerilimin benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim sonuçlarına göre iletkenlerin birbirine yakın olmasıyla indüklenen gerilim değerinin arttığı görülmüştür. Aynı şekilde yıldırım düşen telin boyu arttıkça indüklenen gerilimin azaldığı tersi olarak ikinci iletkenin yüksekliği artırıldıkça indüklenen gerilimin arttığı benzetim sonucunda gözlenmiştir.

Ayrıca yıldırım darbesiyle etrafında açığa çıkan enerjinin analizi için kullanılan elektrik alan metodunun iki temel formülü kodlanarak MATLAB'da 3 boyutlu grafiği çizilerek analizi yapılmıştır.

Yazarların Katkısı

Makale, yazarlardan Bilal TÜTÜNCÜ'nün Yüksek Lisans tezinden üretilmiş olup, makalenin yazımı, veri analizi, sonuçların yorumlanması ve revizyonların yapılmasında katkı sağlamıştır. Makalede kullanılan teorik hesaplamalar ve gerekli düzenlemelerin takibi tez çalışmasına danışmanlık yapan Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ tarafından sağlanmıştır. Literatürün araştırılmasına ve şekillerin MATLAB yardımıyla çizimine yazarlardan Bülent URUL katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Tesla N. 1905. The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace. *Electrical World and Engineer*, 1: 21-21.
- [2] Brown W.C. 1984. The history of power transmission by radio waves. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 32 (9): 1230-1242.
- [3] Schlesak J.J., Alden A., Ohno T. 1985. Sharp (stationary high altitude relay platform)-rectenna and low altitude tests. *GLOBECOM'85-Global Telecommunications Conference*, December 2-5, New York, pp.960-964.
- [4] Kurs A., Karalis A., Moffatt R., Joannopoulos J.D., Fisher P., Soljačić M. 2007. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. *Science*, 317 (5834): 83-86.
- [5] Özdemir E., Özdemir Ş., Erhan K., Aktaş A. 2017. Akıllı şebekelerde enerji depolama uygulamalarının önündeki fırsatlar ve karşılaşılan zorluklar. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (2): 499-506.
- [6] Li S., Mi C.C. 2014. Wireless power transfer for electric vehicle applications. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 3 (1): 4-17.
- [7] Araneo R., Celozzi S., Tatematsu A., Rachidi F. 2014. Time-domain analysis of building shielding against lightning electromagnetic fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57 (3): 397-404.
- [8] Rizk M.E., Mahmood F., Lehtonen M., Badran E.A., Abdel-Rahman M.H. 2015. Investigation of lightning electromagnetic fields on underground cables in wind farms. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 58 (1): 143-152.
- [9] Sheshyekani K., Paknahad J. 2014. Lightning electromagnetic fields and their induced voltages on overhead lines: The effect of a horizontally stratified ground. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30 (1): 290-298.
- [10] Wilson C.T.R. 1921. Investigations on Lightning Discharges and on The Electric Field of Thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 49 (4): 241-241.
- [11] Zeng R., Zhuang C., Zhou X., Chen S., Wang Z., Yu Z., He J. 2016. Survey of recent progress on lightning and lightning protection research. *High Voltage*, 1 (1): 2-10.
- [12] Rakov V.A., Uman M.A. 2003. *Lightning: physics and effects*. Cambridge University Press, 687p. Cambridge.
- [13] Miki M., Rakov V.A., Rambo K.J., Schnetzer G.H., Uman M.A. 2002. Electric fields near triggered lightning channels measured with Pockels sensors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107 (D16): ACL-2.

- [14] Rakov V.A., Uman M.A. 1998. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, 40 (4): 403-426.
- [15] Pasek M.A., Hurst M. 2016. A fossilized energy distribution of lightning. *Scientific reports*, 6: 30586.
- [16] Zhou H., Rakov V.A., Diendorfer G., Thottappillil R., Pichler H., Mair M. 2015. A study of different modes of charge transfer to ground in upward lightning. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 125: 38-49.
- [17] Yang F., Du L., Wang D., Wang C., Wang Y. 2017. A Novel Self-Powered Lightning Current Measurement System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (3): 2745-2754.
- [18] Bruning E.C., Thomas R.J. 2015. Lightning channel length and flash energy determined from moments of the flash area distribution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120 (17): 8925-8940.
- [19] Kaygusuz A. 2003. Uniform olmayan iletim hatlarında yıldırım aşırı gerilimlerinin s-domeni kullanılarak analizi. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [20] Hosono T. 1981. Numerical inversion of Laplace transform and some applications to wave optics. *Radio Science*, 16 (6): 1015-1019.
- [21] Mamiş M.S., Köksal M. 2001. Lightning surge analysis using nonuniform, single-phase line model. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 148 (1): 85-90.
- [22] Mamis M.S., Koksal M. 1999. Transient analysis of nonuniform lossy transmission lines with frequency dependent parameters. *Electric Power Systems Research*, 52 (3): 223-228.
- [23] Ishimaru A. 2017. *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering from fundamentals to applications*. IEEE Press Wiley, 968p, New Jersey.
- [24] Kaygusuz A., Mamiş M.S., Akın E. 2005. s-Domain analysis of lightning surges in three-phase systems using nonuniform single-phase line model. *Electrical Engineering*, 87 (5): 253-259.
- [25] Tütüncü B. 2012. Yıldırım enerjisinin benzetim programı yardımıyla incelenmesi ve dikey bir iletkene yıldırım düşmesi durumunda alan dağılımlarının s-domeninde tahmini. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [26] Dorfler F., Bullo F. 2012. Kron reduction of graphs with applications to electrical networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 60 (1): 150-163.