

Enerji iletim sistemlerinde hat deplasemanının elektrik alan dağılımı ve güvenli yaklaşma mesafeleri bakımından incelenmesi

Investigation of line displacement in terms of electrical field distribution and safe right of way distance in energy transmission systems

Celal Fadıl KUMRU^{1*} , Oktay ARIKAN² 

^{1,2}Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
cfkumru@yildiz.edu.tr, oarikan@yildiz.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 07.02.2019,
Kabul Tarihi/Accepted: 08.08.2019

Düzeltilme Tarihi/Revision: 26.07.2019

doi: 10.5505/pajes.2019.62593
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Enerji iletim hatlarında incelenmesi gereken önemli konulardan biri de hatların meydana getirdiği elektrik alanın, çevresindeki yaşam alanları üzerindeki etkileridir. Yüksek gerilim nedeniyle oluşan elektrik alanın insan sağlığını etkilemesi ve olası atlama risklerinin engellenmesi için iletim hatları ile yaşam alanları arasında yeterli açıklıkların bırakılması gerekmektedir. Günümüzde, hızla artan nüfus ve genişleyen yerleşim alanları nedeniyle, havai iletim hatlarının yaşam alanları üzerinden geçtiği veya bu bölgelere yaklaştığı durumlarla karşılaşabilmektedir. Bu nedenle, özellikle yaşam alanları içerisinde bulunan iletim hatlarının neden olduğu elektrik alan değerlerinin hesaplanması, ölçülmesi ve insan sağlığı bakımından kritik yaklaşma mesafelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, çift devre 154 kV ve tek devre 400 kV'luk iki iletim hattından oluşan enerji iletim sisteminin ayrı güzergâhlarda olması ve deplase edilerek tek devre üzerinde toplanması durumları dikkate alınarak elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelleme çalışması, sonlu elemanlar yöntemi kullanılan Comsol Multiphysics yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımıyla, uluslararası kriterlere uygun olarak güvenli yaklaşma mesafeleri belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrik alan analizi, Enerji iletim hatları, Sonlu elemanlar yöntemi.

Abstract

One of the important topics to be examined in the energy transmission lines is the effects of the electric field generated by the lines on the public areas around it. It is essential to leave enough spaces between the transmission lines and the living areas in order to prevent the risks of potential discharges and the electric field caused by high voltage. Today, due to the rapidly growing population and expanding residential areas, the situations where overhead transmission lines pass through or get close to living spaces can be encountered. Therefore, it is very important to calculate and measure the electrical field values caused by the transmission lines in the living areas and to determine the critical safe right of way distances in terms of human health. In this study, electric field analysis are performed by taking into account two lines, double circuit 154 kV and single circuit 400 kV, for separate routes and displaced on single tower. Modeling study is performed by Comsol Multiphysics software based on finite element method. By the help of the results obtained, safe right of way distances are determined in accordance with international criteria.

Keywords: Electric field analysis, Energy transmission lines, Finite element method.

1 Giriş

Enerji iletim hatlarının temel görevi, üretim ve dağıtım sistemleri arasında elektriksel bağlantı kurmak ve enerjinin uzun mesafelere taşınmasını sağlamaktır. İletilecek güç sabit iken gerilim seviyesinin artırılmasına bağlı olarak hat üzerinde meydana gelen kayıplar ve gerilim düşümü de azalmaktadır [1]-[3]. Yüksek gerilim seviyesinde işletilen bu hatlar, güç sisteminin en önemli bileşenlerinden biridir. İletim sistemi içerisinde meydana gelen bir arıza nedeniyle enerjinin iletilmemesi, bu noktadan beslenen pek çok tüketicinin/bölgenin enerjisiz kalmasına neden olup, ciddi ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Bu nedenle, özellikle iletim kısmında, enerji sürekliliğinin ve sistem güvenilirliğinin sağlanması, güç sistem kararlılığı bakımından büyük önem arz etmektedir [3]-[5].

Üretilen enerjinin en verimli biçimde tüketiciye ulaştırılabilmesi için ülkemizde iletim gerilim seviyesi 154 kV ve 400 kV olarak belirlenmiştir. İletim sistemimiz büyük oranda havai hatlardan oluşmaktadır. Yüksek gerilim seviyesinde iletim yapılması enerji kaybı bakımından ciddi

tasarruf sağlarken beraberinde bir takım problemlerin oluşmasına da neden olmaktadır [1],[6]-[8]. Yüksek gerilimle işletilen bir sistemde, özellikle havai hatlarda ve açık hava şalt tesislerinde, gerekli izolasyon seviyesinin sağlanması için yeterli açıklıkların sağlanmasına ihtiyaç vardır. Bu durum sistem bileşen boyutlarının da (direk, kablo, kesici, ayırıcı vb.) orantısız olarak büyümesine ve kurulum/işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda, izolasyon koordinasyonu, sistemin anlık izlenmesi, aşırı gerilimlere karşı korunma ve personel güvenliğinin sağlanması da karşılaşılan diğer sorunlardır [9]-[12].

Belirtilen sorunlarla ilgili literatürde pek çok çalışma olup, bunların birçoğunda güç sisteminin elektriksel bakımdan analizleri gerçekleştirilmiştir [1],[13]-[14]. Bu çalışmalara ek olarak ele alınan bir diğer problem ise havai iletim hatları çevresinde meydana gelen elektrik alan ve manyetik alan değerlerinin insan sağlığı üzerindeki etkisi ve buna bağlı olarak kritik yaklaşma mesafelerinin belirlenmesidir [6],[10],[15]-[17]. Bu sorunun ortaya çıkmasının en temel sebebi, özellikle nüfus yoğunluğunun fazla olduğu metropollerde yerleşim yerlerinin hızlı bir biçimde genişlemesi

*Yazışılan yazar/Corresponding author

ve yaşam alanlarının enerji iletim hatlarına yaklaşmasıdır. İletim hattı çevresinde meydana gelen düşük frekanslı elektrik ve manyetik alanların insan sağlığı üzerinde olumsuz etkisi olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, "İyonlaştırıcı Olmayan Radyasyondan Korunma Uluslararası Komisyonu" (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection/ICNIRP) tarafından yayımlanan kılavuzda, insanların ve işçilerin maruz kalacağı elektrik ve manyetik alan sınır değerleri belirlenmiştir [18]. Mevcut yönetmeliklerde ise, farklı tipteki yapılar için gerilim seviyesine göre maksimum yaklaşma mesafeleri belirlenmiştir [19]. Ancak, bu mesafeler temel olarak atlama riskine karşı belirlenmiş olup, elektrik ve manyetik alan riskleri bakımından da gerekli açıklıkların belirlenmesi gerekmektedir. Birçok ülkede elektrik ve manyetik alan sınır değerleri ile bunlara bağlı yaklaşma mesafelerini belirleyen yönetmelikler düzenlenmiştir [1]. Bu nedenle, iletim hattının çevresindeki güvenli alanın sadece atlama mesafesi dikkate alınarak değil, elektrik ve manyetik alan analizleri yapılarak belirlenmesi önem arz etmektedir. Bu konuda yapılan birçok benzetim ve deneysel çalışma mevcut olmasına karşın, farklı geometrilere direkler kullanılması ve iletim gerilim seviyelerinin birbirlerinden farklı olması nedenleriyle hala çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır [2],[16],[20]-[25]. Teknik sorunlar ve/veya güvenlik nedenleriyle hatların yer değiştirilmesi (deplase) durumunda da analizlerin tekrarlanması gerekmektedir.

Bu çalışmada, 154 kV ve 400 kV gerilimli hatlardan oluşan iletim sistemi çevresinde elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Hatların ayrı güzergahlarda olduğu senaryo ile bu hatların (oluşan ihtiyaç nedeniyle) deplase edilerek tek bir direk üzerinde taşınması senaryoları üzerinde incelemeler yapılmıştır. Bu durum, hattın çevresinde meydana gelen elektrik alan dağılımının değişmesine neden olduğu için deplase sonrası alan analizleri tekrar gerçekleştirilmiş ve sonuçlar ilk durumla karşılaştırılmıştır. Analizler sonlu elemanlar yöntemini kullanan COMSOL Multiphysics yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hatlar arası mesafe, faz farkı ve anlık elektrik alan şiddeti parametrelerinin daha doğru incelenebilmesi için benzetim çalışmaları zaman domaininde yapılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda elde edilen değerler, deplase sonrası alan dağılımlarının değiştiğini göstermektedir. Sonuçlar değerlendirilerek elektrik alan açısından güvenli yaklaşma mesafeleri uluslararası kriterlere göre belirlenmiştir.

2 Yöntem

Bu çalışmadaki elektrik alan analizleri, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak analiz yapan COMSOL Multiphysics yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi, fizik, mekanik, elektrik vb. pek çok alanda, karmaşık geometriye sahip problemlerin yaklaşık çözümlerinde kullanılan sayısal yöntemlerden biridir. Bu yöntem, elektrik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi ilkesine dayanmaktadır.

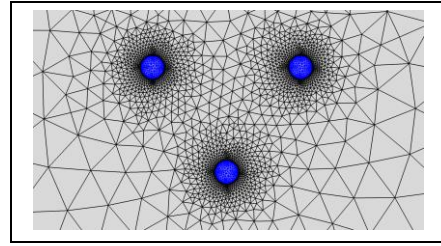
Herhangi bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü, aşağıda sıralanan beş adımda gerçekleştirilir. Bu adımlar,

- Problem geometrisinin, materyal özelliklerinin ve sınır koşullarının belirlenmesi,
- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması,
- Her bir eleman için temel denklemlerin yazılması,

- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi,
- Çözümün gerçekleştirilmesi,

olarak sıralanabilir [22],[26].

İki boyutlu problemlerin çözümünde elemanlar, üçgen, kare, dikdörtgen veya çokgen şeklinde seçilebilmektedir. Seçilen eleman geometrisine göre bölge içerisindeki eleman sayısı ve yoğunluğu çözüm doğruluğunu etkilemektedir. Bu nedenle, diğer elemanlara göre daha az sayıda düğüm içermesi ve köşeli yapısından dolayı dar bölgelere daha kolay uyum sağlama kabiliyeti nedenleriyle elektrostatik analizlerde genellikle üçgen elemanlar tercih edilmektedir. Üçlü bir demet iletkene ait problemin üçgen sonlu elemanlara bölünmesi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Problem geometrisinin üçgen sonlu elemanlara bölünmesi.

Figure 1: Division of problem geometry into triangular finite elements.

Çözüm bölgesinin üçgen sonlu elemanlara (i) ayrılmasının ardından, bölge içerisindeki tüm elemanların (n_i) genel potansiyel ifadesi,

$$V(x, y) = \sum_{i=1}^{n_i} V^i(x, y) \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, $V(i)(x, y)$ bir eleman içerisindeki potansiyel fonksiyonudur. Herhangi bir üçgen elemanın düğüm noktaları koordinatlarının kartezyen koordinat sisteminde $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ olduğu düşünülürse bu noktaların potansiyel eşitlikleri,

$$\begin{aligned} V_1 &= a + bx_1 + cy_1 \\ V_2 &= a + bx_2 + cy_2 \\ V_3 &= a + bx_3 + cy_3 \end{aligned} \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitliklerdeki a, b ve c katsayıları ise,

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

matrisinin çözümüyle elde edilir. Elde edilen katsayılar yardımıyla, çözüm bölgesi üzerindeki her bir noktanın potansiyeli,

$$V(x, y) = [1 \quad x \quad y] \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

olarak belirlenir. Burada A , üçgen elemanın alanı olup düğüm noktaları koordinatları yardımıyla hesaplanmaktadır. Her bir düğüm noktasının potansiyel değerinin belirlenmesinin ardından Laplace denklemi kullanılarak elektrik alan değerleri hesaplanabilmektedir [26].

Elektrostatik problemlerde, elektrik alan şiddetinin (E) ve elektriksel akı yoğunluğunun (D) davranışını dikkate alır. Çözüm elde edebilmek için,

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (5)$$

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (6)$$

diferansiyel eşitlikleri kullanılmaktadır. Burada, ρ [C/m^3], incelenen bölgenin yük yoğunluğunu, V [Volt] skaler potansiyel alanı ve E [kV/m] ise elektrik alan şiddetini belirtmektedir [26].

Analizler iki boyutlu Kartezyen koordinat sisteminin x-y düzleminde, "Electrostatics" çalışma başlığı altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sistem gerilimlerinin zamana bağlı olarak değiştiği göz önüne alınarak, analizler zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Bir periyot içerisinde herhangi bir t anında, faz iletkenlerindeki gerilim değerleri faz farkından dolayı aynı olmamaktadır. Bu bağlamda, hat çevresindeki elektrik alan şiddetinin maksimum olduğu değeri bulabilmek için analizlerin zamana bağlı olarak gerçekleştirilmesi daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

3 Sistem tanıtımı

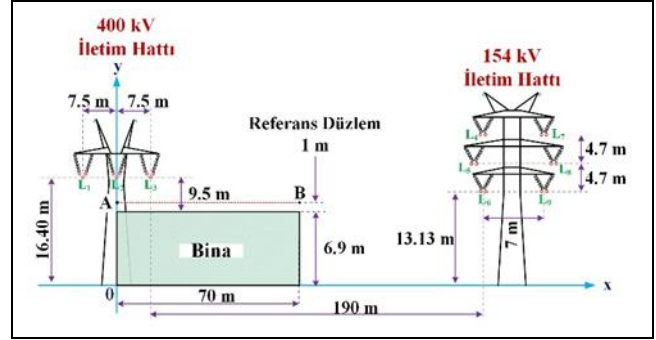
Bu çalışmada, 154 kV ve 400 kV gerilim seviyelerindeki iletim hatları dikkate alınmıştır. 154 kV'luk hat çift devre, ikili demet iletkenli ve 400 kV'luk hat tek devre, üçlü demet iletkenli olup her iki hatta da Cardinal tip iletken kullanılmıştır. Bu iki hattın ayrı güzergâhlarda olması ve deplase edilerek tek direk üzerinde tesis edilmesi durumları için elektrik alan analizleri gerçekleştirilmiştir. Elektrik alan analizleri için nominal işletme gerilimleri göz önüne alınmıştır. İncelenen sistemde kullanılan direk yapıları, hat konfigürasyonu ve iletkenlere ait teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma için öngörülen iki senaryo,

- Senaryo-I: Direkler arası mesafenin 190 m olduğu durum (deplase öncesi),
- Senaryo-II: 154kV ve 400 kV'luk hattın tek bir direk üzerinde iletildiği durum (deplase sonrası).

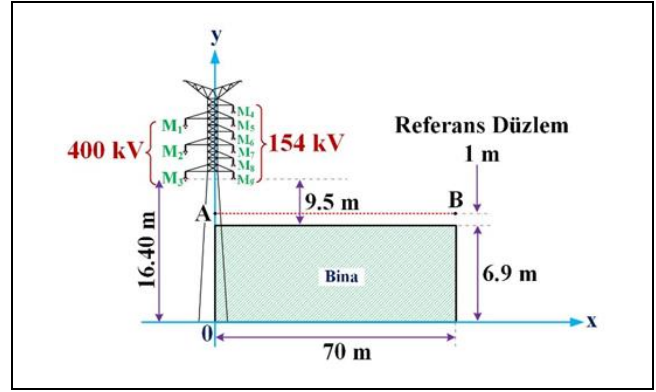
olarak belirlenmiştir.

Senaryo-I geometrisine ait detaylar Şekil 2'de verilmiş olup iki ayrı güzergâha sahip olan 154 kV ve 400 kV'luk iletim hatlarının oluşun ihtiyaç sebebiyle tek direk üzerinde taşınmasına karar verilmesi durumu dikkate alınmıştır. Güzergâh olarak ise 400 kV'luk hattın güzergâhı seçilmiş olup deplase sonrası yerleşime ait detaylar Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 2: Deplase öncesi yerleşim düzeni (Senaryo-I).

Figure 2: Pre-displacement layout (Scenario-I).



Şekil 3: Deplase sonrası yerleşim düzeni (Senaryo-II).

Figure 3: Post displacement layout (Scenario-II).

Şekil 3'te, 154 kV ve 400 kV gerilimli devrelerde iletkenler arasındaki düşey mesafeler sırasıyla 4.7 m ve 9.4 m'dir. Ayrıca, faz iletkenlerinin binaya olan mesafeleri maksimum sehim durumuna göre belirlenmiştir [27].

Tablo 1: İncelenen sisteme ait parametreler.

Table 1: Parameters of the system examined.

| No | Parametre | Senaryo-1 (Deplase Öncesi) | Senaryo-2 (Deplase Sonrası) | Birim |
|----|--|--|---|-----------------|
| 1 | Nominal Gerilim | 154 ve 400 | | kV |
| 2 | Direk Modeli | 400kV'luk hat, MA-1 154 kV'luk hat, VA-1 | 154 kV+400 kV'luk hat, M3 (Müşterek direk) | - |
| 3 | Hat Konfigürasyonu | 154kV (Düşey düzen, çift devre, ikili demet) 400kV (Yatay düzen, tek devre, üçlü demet) | Düşey düzen | - |
| | Faz İletkeni | | | - |
| | ▪ Tip | Cardinal | | - |
| 4 | ▪ Kesit Alanı | 547.3 | | mm ² |
| | ▪ Çap | 30.42 | | mm |
| | ▪ Akım Taşıma Kapasitesi [19] | 765 | | A |
| | ▪ Demetteki iletkenler arası mesafe [27] | 457 | | mm |

Her iki senaryo için iletkenler Şekil 2 ve Şekil 3'te numaralandırılmıştır. Tüm iletkenlerin koordinatları ve binaya en yakın mesafeleri ise Tablo 2'de verilmiştir. Hatlara en yakın insan bulunabilecek noktaların koordinatları Senaryo 1 için (7.5, 6.9, z) [m] ve Senaryo 2 için (4.6, 6.9, z) [m]'dir.

Tablo 2: İletken koordinatları ve binaya en yakın mesafeleri.

Table 2: Conductor coordinates and closest distances to the building.

| Senaryo No | İletim Hattı | İletken No | Koordinat* (x, y, z) [m] | Binaya En Yakın Mesafe [m] |
|------------|---------------------------------------|------------|--------------------------|----------------------------|
| S1 | 400 kV Tek Devre (3'lü demet) | L1 | (-7.5, 16.4, z) | 12.12 |
| | | L2 | (0, 16.4, z) | 9.52 |
| | | L3 | (7.5, 16.4, z) | 16.40 |
| | 154 kV Çift Devre (2'li demet) | L4 | (196.8, 22.53, z) | 127.76 |
| | | L5 | (195.5, 17.83, z) | 125.98 |
| | | L6 | (196.5, 13.13, z) | 126.65 |
| | | L7 | (203.2, 22.53, z) | 134.12 |
| | | L8 | (204.5, 17.83, z) | 134.94 |
| | | L9 | (203.5, 13.13, z) | 133.65 |
| S2 | 400 kV Tarafı Tek Devre (3'lü demet) | M1 | (5.8, 35.2, z) | 28.90 |
| | | M2 | (5.8, 25.8, z) | 19.78 |
| | | M3 | (6.1, 16.4, z) | 11.30 |
| | 154 kV Tarafı Çift Devre (2'li demet) | M4 | (4.6, 42.67, z) | 42.67 |
| | | M5 | (4.6, 37.97, z) | 37.97 |
| | | M6 | (4.6, 33.27, z) | 33.27 |
| | | M7 | (4.6, 28.57, z) | 28.57 |
| | | M8 | (4.6, 23.87, z) | 23.87 |
| | | M9 | (4.6, 19.17, z) | 19.17 |

*: Üçlü demet iletkenlerde en alttaki iletkenin, ikili demet iletkeninde ise iki iletken merkezinin koordinatları verilmiştir.

Şekil 2 ve 3'de verilen bina, iki direk arasındaki hat menzili altında bulunmaktadır. Çizimler iki boyutlu olduğu için direklerle bina aynı hizada gözükmemektedir. Ancak, hat iletkenlerinin binaya en yakın olan kısmı direğe asıldığı noktalar değil direkler arasına çekilmiş iletkenlerdir. Direkler aynı hizada değildir. Yayında çizim iki boyutlu verildiğinden yan yana gibi gözükmemektedir. Şekillerde direk çizimlerinin verilme sebebi hat konfigürasyonlarının daha net anlaşılmasının sağlanmasıdır. Çalışmada gerçekleştirilen tüm analizler bu duruma göre gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2 ve 3'teki duruma göre direk ile bina arasındaki yatay mesafeler ise şu şekildedir;

- İki ayrı direğin olduğu durumda (Senaryo-1) bina ile 154 kV'luk direğin zemine temas ettiği nokta arası yatay açıklık yaklaşık 127 metredir. 400 kV direk ise binanın yaklaşık olarak sol tarafının hizasında bulunmaktadır,
- İki sistemin tek direkte toplandığı durumda ise (Senaryo-2), bina ile direğin zemine temas eden en yakın noktası arası yatay mesafe yaklaşık 3 m'dir.

Problem geometrisindeki iletkenler dairesel olarak ele alınmıştır. Ancak, gerçekte örgülü yapıda olan iletken geometrisinin incelenen bölgedeki elektrik alan şiddeti üzerindeki etkisi ayrıca analiz edilmiş olup örgülü iletken durumunda elektrik alan şiddetindeki bağıl değişim yaklaşık %1 olmaktadır. Benzer şekilde iletkenler üzerinde aratutucu olması durumu da analiz edilmiştir. Aratutucu olması ve olmaması durumlarında, incelenen bölgedeki elektrik alan şiddetindeki bağıl değişimin yaklaşık %3 olduğu görülmüştür. Bu nedenle, çalışmada iletkenler dairesel olarak ele alınmış ve aratutucular göz önüne alınmamıştır. Ayrıca, çalışmada dikkate alınan bina, betonarme bir bina olup çatısı düz ve üzerine çıkılabilen bir yapıdadır.

Her iki senaryo için zamana bağlı olarak elektrik analizleri gerçekleştirilmiş olup elde edilen sonuçlar ICNIRP'da verilen sınır değer ile kıyaslanmıştır (Tablo 3). Burada $f[Hz]$ frekans olup şebeke frekansının 50 Hz olması nedeniyle, elektrik alan şiddeti sınır değeri 5 kV/m olarak belirlenmiştir.

Tablo 3: ICNIRP elektrik alan sınır değerleri.

Table 3: Electric field limit values by ICNIRP.

| Frekans Aralığı | Elektrik Alan Şiddeti E (kV/m) |
|-----------------|--------------------------------|
| 1 Hz – 8 Hz | 5 |
| 8 Hz – 25 Hz | 5 |
| 25 Hz – 50 Hz | 5 |
| 50 Hz – 400 Hz | 250/f |
| 400 Hz – 3 kHz | 250/f |
| 3 kHz – 10 MHz | 0.083 |

4 Modelleme ve analiz

Modelleme çalışmalarında, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı analiz yapan Comsol Multiphysics yazılımı kullanılmıştır. Belirlenen senaryolar için elektrik alan analizleri gerçekleştirilerek, ICNIRP'a göre güvenli yaklaşma mesafeleri belirlenmiştir.

Şekil 2 ve 3'te verilen geometriler COMSOL Multiphysics programında modellenmiş olup binanın en üst kısmından bir metre yukarıdaki referans düzleminde 70 m mesafe boyunca elektrik alan değerleri belirlenmiştir. İletkenlerde gerilim sınır koşulları faz sırasına göre,

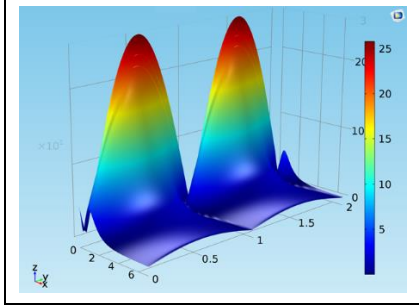
$$V_n(t) = V_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_n) \quad (7)$$

ifadesi yardımıyla belirlenmiştir. Ayrıca zemin, bina çevresi ve üzerinin sınır koşulları toprak potansiyeli $V = 0 \text{ Volt}$ olarak atanmıştır.

Problemdeki açık olan bölge, incelenen bölgeyi içinde barındıracak biçimde (toprak sınırının üzerinde kalan bölgeler) 200 metre yarıçapında bir yarım küre kullanılarak sınırlandırılmıştır. Bu kürenin merkezi ise (100,0,z)[m] koordinatında bulunmaktadır. Bu kürenin sınır koşulları ise Neumann sınır koşulu olarak atanmıştır. Gerçekleştirilen tüm analizler, aynı ortam koşulları ve malzeme özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır.

Hatların maksimum sehim noktaları, güzergâhı ve binanın konumu üç boyutlu modelleme yapmadan çözülebilecek düzene oldukça yakın olduğu için analizler iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.

Analizler zamana bağlı olarak gerçekleştirildiği için herhangi bir noktadaki maksimum elektrik alan şiddeti de zamana bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu nedenle, incelenen hat boyunca zamana bağlı olarak değişen maksimum elektrik alan şiddeti değerleri elde edilmiş ve Şekil 4'te sunulmuştur.

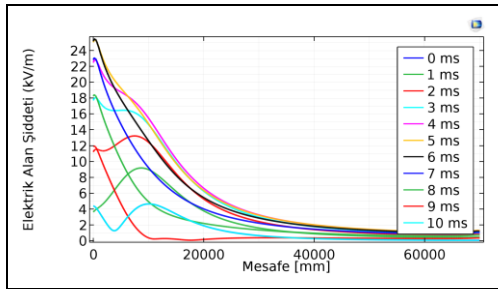


Şekil 4: Bina üzerinden 1 m yukarıdaki referans düzlemindeki (A'dan B'ye) elektrik alan şiddetinin zamanla değişimi.

Figure 4: Change of electric field strength with time on the reference plane (from A to B) 1 m above the building.

Şekil 4'te x eksenine bina üzerindeki mesafeyi, y eksenini zamanı ve z eksenini ise maksimum elektrik alan şiddetini belirtmektedir. Görüldüğü üzere, elektrik alan şiddetindeki değişim her yarı periyotta aynı olmaktadır.

Bu nedenle analizler, sonuçların daha net görülebilmesi ve benzetim çalışması süresinin kısalması için 0-10 ms aralığında gerçekleştirilmiştir. Her 0.1 ms'lik benzetim adımı için, bina üzerindeki 70 m referans düzlem boyunca elektrik alan şiddeti değerleri kaydedilmiştir (1 m aralıklarla, 71 nokta için). Kaydedilen elektrik alan şiddeti değerleri arasından maksimum değerler belirlenip ilgili grafiklerde sunulmuştur. A noktası ile B noktası arasında referans düzlem üzerinde yarım periyot boyunca ve 1 ms aralıklarla elde edilen elektrik alan şiddeti değişimleri Şekil 5'te verilmiştir.



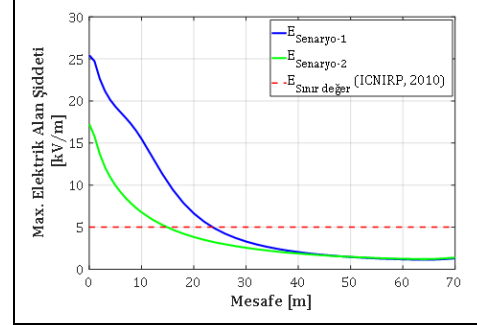
Şekil 5: Referans düzleminde (A'dan B'ye), yarım periyot içerisinde 1 ms aralıklarla elektrik alan şiddetinin değişimi (Senaryo-1).

Figure 5: Change of electric field strength on the reference plane (from A to B) for half period at 1 ms intervals (Scenario-1).

Şekil 5'ten de görüldüğü üzere, maksimum elektrik alan şiddeti binanın en sol kısmında (A noktası) meydana gelmektedir.

Bu kısmın, 400 kV gerilimli hat iletkenlerine en yakın nokta olmasından dolayı maksimum elektrik alan şiddeti değeri yaklaşık 25.43 kV/m değerine ulaşmaktadır. A noktasından B noktasına doğru gidildikçe ise elektrik alan şiddeti mesafenin karesiyle ters orantılı olarak azalarak B noktasında yaklaşık 1 kV/m seviyesine kadar düşmektedir. B noktasına yakın mesafede elektrik alan şiddetinde meydana gelen kısmi artışın sebebi ise bina geometrisinin bu noktada sivri olması ve yük yoğunluğunun bu bölgede fazla olmasıdır.

Ayrıca, bina üzerinde herhangi bir noktadaki elektrik alan şiddeti değeri ölçüm alınan noktaya ve anlık gerilim değerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Örneğin, bina üzerinde 5. metredeki maksimum elektrik alan şiddeti 5 ms'de meydana gelmişken 20. metrede 4 ms'de meydana gelmektedir. Bu nedenle, referans düzlem üzerindeki tüm noktalarda elektrik alan şiddetinin maksimum değerleri belirlenerek öngörülen senaryolar için Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Referans düzleminde (A'dan B'ye), Senaryo-1 ve Senaryo-2 için elde edilen maksimum alan şiddeti değişimi.

Figure 6: Change in maximum electric field strength obtained on the reference plane (A to B) for Scenario-1 and Scenario-2.

Her iki senaryoda da maksimum elektrik alan şiddeti, iletkenlere en yakın nokta olan A noktasında meydana gelmekte olup hesaplanan değerler 5 kV/m sınır değerinin üstündedir. B noktasına doğru mesafe arttıkça, elektrik alan şiddeti her iki senaryo için de azalmaktadır.

Senaryo-1 de yaklaşık 23 m ve Senaryo-2 de ise 15 m sonra maksimum elektrik alan şiddeti değerleri sınır değerinin altına düşmektedir. A noktasından 50 metre sonrasında ise her iki senaryo için de elektrik alan şiddetleri birbirlerine oldukça yakın olmaktadır. Diğer bir ifadeyle, elektrik alanın kaynağı olan yüklerden yeterince uzak mesafede, yükler arasında ki mesafenin etkinliği azalmaktadır. Bu nedenle, yük ile alan hesabı yapılan noktaya olan mesafenin (d) yükler arası mesafeden (a) çok büyük olduğu durumlarda (d>>a) yükler arası mesafe ihmal edilip yüklerin tek bir noktada toplandıkları söylenebilir.

A-B doğrultusu boyunca Senaryo-1'de elde edilen maksimum elektrik alan şiddetinin Senaryo-2'den büyük olmasının temel sebebi hat konfigürasyonu ve gerilim değeridir. Senaryo-1'de elde edilen elektrik alan şiddetinin Senaryo-2'deki elektrik alan şiddetinden büyük olmasının başlıca nedeni, Şekil 2 ve Şekil 3'ten de görüleceği üzere, 400 kV gerilim seviyesindeki iletkenlerin referans düzleme daha yakın olmasıdır. Ayrıca, Senaryo 1'de 154 kV'luk hat iletkenlerinin oldukça uzakta (190 m) olması nedeniyle elektrik alan üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

5 Değerlendirme

Gerçekleştirilen çalışma ile dikkate alınan iki farklı senaryo için bina üzerindeki referans düzlemde oluşan maksimum elektrik alan şiddeti değerleri belirlenmiştir. Comsol Multiphysics yazılımı yardımıyla yapılan analizler sonucu elde edilen değerler, ICNIRP tarafından belirlenen sınır değerler ile karşılaştırılarak referans düzlem üzerinde insan sağlığı açısından güvenli yaklaşma mesafeleri belirlenmiştir.

Analizler sonucunda elde edilen elektrik alan şiddeti değerlerine göre, A noktasından B noktasına doğru referans

düzlem dikkate alınarak belirlenen kritik yaklaşma mesafeleri Senaryo-1 için 23 m ve Senaryo-2 için 15 m olmaktadır. Senaryo-1'de kritik yaklaşma mesafesinin Senaryo-2'e göre daha yüksek olmasının temel sebebi iki senaryo arasındaki hat konfigürasyonunun veya diğer bir ifadeyle hat geometrilerinin birbirinden farklı olmasıdır. Senaryo-2'de tek bir direk üzerinde daha fazla sayıda iletken olmasına karşın Senaryo-1'de 400 kV seviyesindeki üç fazın da bina yüzeyine daha yakın olması elektrik alan şiddetini arttırmaktadır. Bu nedenle, hat geometrisi ve incelenen bölgeye mesafesi, güvenli yaklaşma mesafesini belirleyen başlıca parametrelerdir.

Bu çalışmada, alan hesaplamalarında sınır koşulların belirlenmesi için gerilim değerleri zamana bağlı olarak değişen büyüklükler olarak dikkate alınmıştır. Böylece, gerçekte olduğu gibi akım ve gerilimlerin faz açıları, genlikleri ve işaretleri zamana bağlı olarak değişmektedir. Bu durum, incelenen noktada zamana bağlı olarak oluşan toplam alan şiddetlerinde birbirini zayıflatma etkilerinin de görülebileceğini sağlamaktadır.

Çeşitli çalışmalarda, benzer analizler için sabit gerilim değerleri de kullanılmaktadır. Bu durumda, gerilime ait büyüklükler aynı işaretli olduklarından alan şiddeti değerleri de belli oranda artmaktadır. Açıklanan bu olayın daha net ortaya konabilmesi için, kurulan modelde sabit gerilim kullanılarak elektrik alan analizleri de gerçekleştirilmiştir. Senaryo-1 dikkate alınarak yapılan çalışmanın sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4: A ve B noktalarında sabit ve zamanla değişen sınır koşullarındaki maksimum elektrik alan değerleri (Senaryo-1).

Table 4: Maximum electric field values at points A and B for fixed and time-varying boundary conditions (Scenario-1).

| Parametre | Sabit Sınır Koşulları $V = \text{sabit}$ | | Zamanla Değişen Sınır Koşulları $V_n(t) = V_m \cdot \sin(\omega t + \varphi_n)$ | |
|--|---|---------|--|---------|
| | A | B | A | B |
| | Noktası | Noktası | Noktası | Noktası |
| Maksimum Elektrik Alan Şiddeti $E_{max} [kV/m]$ | 28.64 | 1.47 | 25.43 | 1.29 |

Tablo 4'te, Senaryo-1 için gerilim değerlerinin sabit ve zamana bağlı olarak değişmesi durumunda, A ve B noktalarında elde edilen elektrik alan değerleri verilmiştir. Analizlerde gerilim değerleri sabit olarak alındığında, hesaplanan elektrik alan değeri gerçek duruma (zamana bağlı değişen) göre daha yüksek sonuç vermektedir. Elektrik alan vektörel bir büyük olup gerilimin sabit olarak atandığı durumlarda aynı işaretli oldukları için vektörel olarak toplanmakta ve alan şiddeti artmaktadır. Tablo 4'e bakıldığında, A ve B noktalarında meydana gelen elektrik alan şiddeti değerlerinin, sabit gerilimde yapılan analizlerde yaklaşık %13-14 daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle, elektrik alan analizlerinin zamana bağlı olarak yapılması ve meydana gelen maksimum alan şiddeti değerlerinin dikkate alınması önem arz etmektedir. Böylelikle, güvenli yaklaşma mesafeleri daha gerçekçi bir biçimde belirlenebilecektir.

6 Sonuç

Bu çalışmada, farklı güzergâhlarda bulunan 154 kV ile 400 kV'luk enerji iletim sistemi etrafında meydana gelen elektrik alan değerleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Analizler, hat güzergâhlarının ayrı olması ve sonrasında deplase edilerek tek bir direk üzerinde toplanması

durumları için gerçekleştirilmiş olup her iki durumda hesaplanan elektrik alan değerleri, yaklaşma mesafeleri, sınır değerler, hat konfigürasyonu ve zamana bağlı analiz bakımından değerlendirilmiştir.

Yüksek gerilim seviyelerinde işletilen enerji iletim hatlarının etrafında oluşan elektrik alanlar, hem atlama açıklıklarının belirlenmesinde, hem etraflarındaki cihazların sorunsuz çalışmasının sağlanmasında, hem de canlılar açısından güvenli yaklaşma mesafelerinin belirlenmesinde büyük önem arz etmektedir. Gerçekleştirilen çalışma ile ele alınan örnek bir durum için elektrik alan analizleri yapılarak elektrik alan dağılımları ve insan sağlığı açısından güvenli yaklaşma mesafeleri belirlenmiştir. Tesis edilmesi planlanan yapının yakınlarında bulunan çift devre 154 kV ve tek devre 400 kV'luk iletim hatlarının ayrı güzergâhlarda bulunmaları ve tek direkte toplanmaları senaryoları için analizler yapılmıştır.

ICNIRP tarafından verilen sınır değerler dikkate alınarak yapılan değerlendirmelerde, binaya yakın olan direğe Senaryo 1 için yaklaşma mesafesi 23 m ve Senaryo 2 için yaklaşma mesafesi 15 m olarak belirlenmiştir. Bu mesafeler, referans düzlem olarak belirlenmiş olan çatı zemininin 1 metre üstü için geçerlidir.

Ayrıca, konu ile ilgilenenlerin yaptığı çalışmalar incelendiğinde, zamana bağlı ve sabit sınır koşul tercihlerinin yapıldığı görüldüğünden iki durum için de analizler tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, iki durum arasında %13-14 oranında bir fark olduğunu göstermektedir. Güç sistemlerinde 50 Hz frekanslı üç fazlı sistemlerde gerilimin zamana bağlı olarak değiştiği bilindiğinden, zamanla değişen sınır koşulların daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacağı kanaati oluşmuştur.

Örnek sistem için gerçekleştirilen analizler, en alt iletken incelenen bölgeye düşey olarak aynı mesafede olmak üzere, faz iletkenlerinin yatay düzende yerleştirildiği hatların altında meydana gelen elektrik alan şiddetinin düşey düzende yerleştirilen hatlara göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle çift devre hatlarda tercih edilen düşey düzen, sayıca daha fazla iletken içermesine karşın üst sıralardaki fazların artan mesafeden dolayı elektrik alan şiddeti üzerindeki etkisi oldukça azalmaktadır. Bu nedenle, elektrik alan şiddetinin kritik önem taşıdığı bölgelerde hatların düşey düzende tesis edilmesi maksimum elektrik alan şiddetinin azalmasına yardımcı olacaktır.

Günümüzde, özellikle nüfusun yoğun olduğu büyük şehirlerde benzer durumlar ile karşılaşma sıklığı artmaktadır. Önümüzdeki yıllarda daha da fazla karşılaşılacak olan bu tür projelendirmeler için gerekli alan analizlerinin ve mümkün olan durumlarda saha ölçümlerinin yapılması gerekmektedir.

Yerleşim yerleri yakınına tesis edilecek hatların projelendirilmesi ve/veya iletim hatları yakınına kurulacak yapıların izinlerinin verilmesi öncesinde gerçekleştirilecek elektrik alan analizleri ile yaklaşma mesafelerinin doğru olarak tespit edilmesi insan sağlığı, arızaların azaltılması, sistem güvenilirliği ve sürekliliğinin sağlanması bakımından başlıca parametrelerden biri olarak dikkate alınmalıdır.

Elektrik alan şiddetinin sınır değeri aştığı durumlarda;

- Hattın yeraltı kablosu olarak tesis edilmesi,
- Ekranlama yapılması,
- Hat güzergâhının binadan uzaklaştırılması,
- Binanın hattan daha uzak bir noktada yapılması,

gibi uygulamalardan teknik ve ekonomik açıdan en uygun olanın tercih edilmesi sunulabilecek çözüm önerileridir.

Bu çalışmada, yüksek gerilim tesislerinin en önemli etkilerinden biri olan elektrik alan şiddeti üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. İhtiyaç duyulan bölgeler için, manyetik alan, radyo girişim gerilimi (radio interference voltage-RIV) ve korona analizlerinin de yapılması güvenli ve güvenilir güç sistemi işletmeciliği, yapılaşma ve canlıların sağlığı açısından önem arz etmektedir. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarımızda, bu parametreler üzerine de analizlerin yapılması ve sonuçların paylaşılması düşünülmektedir.

7 Kaynaklar

- [1] Kiessling F, Nefzger P, Nolasco JF, Kaintzyk U. *Overhead Power Lines: Planning, Design, Construction*. Berlin, Germany, Springer, 2003.
- [2] Vyas KA, Jamnani JG. "Analysis and Design optimization of 765 kV transmission line based on electric and magnetic fields for different line configurations". *IEEE 6th International Conference on Power Systems*, New Delhi, India, 4-6 March 2016.
- [3] Unde MG, Kushare BE. "Analysis of electromagnetic fields of 1200 kV UHV-AC Transmission Lines". *5th International Conference and Computational Intelligence and Communication Networks*, Mathura, India, 27-29 September 2013.
- [4] Farah AAM, Afonso MM, Vasconcelos JA, Schroeder MAO. "A Finite-Element approach for electric field computation at the surface of overhead transmission line conductors". *IEEE Transactions on Magnetics*, 54(3), 1-4, 2018.
- [5] Kutucu K. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Elektrik Alan Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye 2009.
- [6] Cansız M, Çelik AR, Kurt MB. "50 Hz şebeke frekansında elektrik ve manyetik alan şiddetlerinin ölçülmesi ve ölçüm sonuçlarının ICNIRP'ın halk maruziyeti limitlerine göre karşılaştırılması". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(8), 294-299, 2014.
- [7] Talaat M. "Calculation of electric and magnetic induced fields in humans subjected to electric power lines". *Journal of Electrostatics*, 72(5), 387-395, 2014.
- [8] Rachedi BA, Babouri A, Lemzadmi A, Nemamcha M, Berrouk F. "Evaluation of electromagnetic field produced by multi-parallel high voltage lines". *IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems*, Kiev, Ukraine, 2-6 June 2014.
- [9] Li N, Yang X, Peng Z. "Measurement of electric fields around a 1000-kV UHV substation". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(4), 2356-2362, 2013.
- [10] El Dein AZ. "Calculation of the electric field around the tower of the overhead transmission lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(2), 899-907, 2014.
- [11] Yang Y, Lu J, Lei Y. "A calculation method for the hybrid electric field under UHVAC and UHVDC transmission lines in the same corridor". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(2), 1146-1153, 2010.
- [12] Khayam U, Prasetyo R, Hidayat S. "Electric field analysis of 150 kv compact transmission line". *International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems*, Sanur, Indonesia, 2-5 October 2017.
- [13] Torelli L, Moorthy S. "Transient overvoltages and distance protections: problems and solutions". *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection Managing the Change*, Manchester, UK, 29 March-1 April 2010.
- [14] Hamza AH, Ghanian SM, Emam AM, Shafy AS. "Statistical analysis of switching overvoltages and insulation coordination for A 500 kV transmission line". *8th International Middle East Power Systems Conference*, Cairo, Egypt, 27-29 December 2016.
- [15] Talaat M. "Calculation of electrostatically induced field in humans subjected to high voltage transmission lines". *Electric Power Systems Research*, 108, 124-133, 2014.
- [16] Xiao F, Yan J, Zhang B, Wang Y. "Simplified approach of maximum electric field distribution on the ground near HVAC-HVDC Shared Tower Transmission Lines". *The Journal of Engineering*, 2018(17), 1851-1854, 2018.
- [17] Sidorov AI, Okrainskaya IS, Gladyshev SP. "Measurement of super high voltage transmission line electric field effecting on the environment". *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, Mankato, USA, 15-17 May 2011.
- [18] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. "Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (100 Khz-300 Ghz)". Oberschleißheim, Germany, 2010.
- [19] T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu. "Elektrik Şebeke Yönetmeliği". Ankara, Türkiye, 2014.
- [20] El Dein AZ. "Magnetic-Field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases". *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24(4), 2214-2222, 2009.
- [21] Li S. "Electric field calculation of ±800kV transmission lines by surface charge method". *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, China, 25-28 March 2011.
- [22] Kocatepe C, Arıkan O, Kumru CF, Erduman A, Umurkan N. "Electric field measurement and analysis around a line model at different voltage levels". *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Shanghai, China, 17-20 September 2012.
- [23] Cui Y, Yuan H, Song X, Zhao L, Liu Y, Lin L. "Model, design, and testing of field mill sensors for measuring electric fields under high-voltage direct-current power lines". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(1), 608-615, 2018.
- [24] Trlep M, Hamler A, Jesenik M, Stumberger B. "Electric field distribution under transmission lines dependent on ground surface". *IEEE Transactions on Magnetics*, 45(3), 1748-1751, 2009.
- [25] Isaramongkolrak A, Srikun I, Sumpavakup C. "A comparative study of magnetic fields in 115 kv single circuit transmission line of Thailand". *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Shanghai, China, 27-29 March 2012.
- [26] Kalenderli Ö. "Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları". İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 1997.
- [27] Arı M. *154/380 kV Enerji İletim Hatları Proje Uygulamaları*. Ankara, Türkiye, Karaca Tanıtım Hizmetleri Matbaacılık, 2012.