

Yüksek Gerilim Metrolojisi İçin Optimize Elektrik Alanlı Yüksek Gerilim Bölücüsü Tepe Elektrodu Tasarımı

Tuğba Ada¹, Özcan Kalenderli², Ahmet Merev³, Serkan Dedeoğlu⁴, Kaan Gülnihar⁵

^{1,2} İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul

^{3,4,5} TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli

¹tugbada@gmail.com

²ozcan@elk.itu.edu.tr

³ahmet.merev@ume.tubitak.gov.tr

⁴serkan.dedeoglu@ume.tubitak.gov.tr

⁵kaan.gulnihar@ume.tubitak.gov.tr

Özetçe

Yüksek gerilim tekniğinde gerilimin, alçak gerilimden bilinen yöntemlerle doğrudan ölçülmesi gerilimin yüksekliğinden dolayı güçtür. Yüksek gerilimi ölçülebilir değere düşürerek ölçülmesini sağlayan cihazlar arasında yüksek gerilim bölücülerini önemli bir yer tutar. Özellikle duyarlı ölçümler söz konusu olduğunda, gerilim bölücülerinden kaynaklanan hatalar ölçüm belirsizliğine doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle gerilim bölücülerinin özelliklerinin tanımlanması, yüksek gerilim metrolojisinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Gerilim bölücülerde kullanılan yüksek gerilim elektrotları, eğer bölücü boyunca düzgün alan dağılımını sağlayacak biçimde tasarlanmışsa, bölücüdeki kaçak kapasite etkisi en aza indirgenmiş olur ve ölçüm doğruluğuna olumlu katkı sağlar. Bu çalışmada, bir yüksek gerilim bölücüsünde kullanılacak tepe elektrodunun seçimine yardımcı olmak amacıyla, sonlu elemanlar yöntemine göre çözümleme yapan bir bilgisayar programıyla en uygun elektrot yapısının belirlenmesi için yapılan elektrik alan analizleri sunulmuştur.

1. Giriş

Yüksek gerilim ölçmeleri, ölçülecek gerilim genliğinin yüksek olması nedeni ile zordur ve alçak gerilimden bilinen ölçme sistemleri kullanılarak doğrudan ölçülemezler. Bir yüksek gerilim ölçme sistemi, yüksek gerilimi alçak gerilim aletleri ile ölçülebilir gerilim düzeyine düşüren bir gerilim bölücünden veya bir gerilim ölçü transformatoründen, bu elemanların çıkışlarındaki gerilimi, alçak gerilim ölçme düzeni elemanlarına ileten bir ölçü kablosundan ve voltmetre, osiloskop, bilgisayar gibi ölçme, görüntüleme ve kaydetme amaçlı aletlerden oluşmaktadır.

Yüksek gerilim ölçmelerinde, ölçüm belirsizliğini arttıran etkiler en çok gerilim bölücülerinden gelmektedir. Bu etkiler gerilim bölücünün sıcaklık etkisi, gerilim bağımlılığı etkisi, dönüştürme oranındaki yıllık kayma, EMC etkisi, yakınlık etkisi vb. bileşenlerden oluşmaktadır. Örneğin kapasitif gerilim bölücülerde tepe elektrodu ve bölücünün yakınlık etkisi, bölücüye ek ve değişen kapasiteler getirmekte ve bölücünün dönüştürme oranını değiştirmektedir. Bu da ölçüm belirsizliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

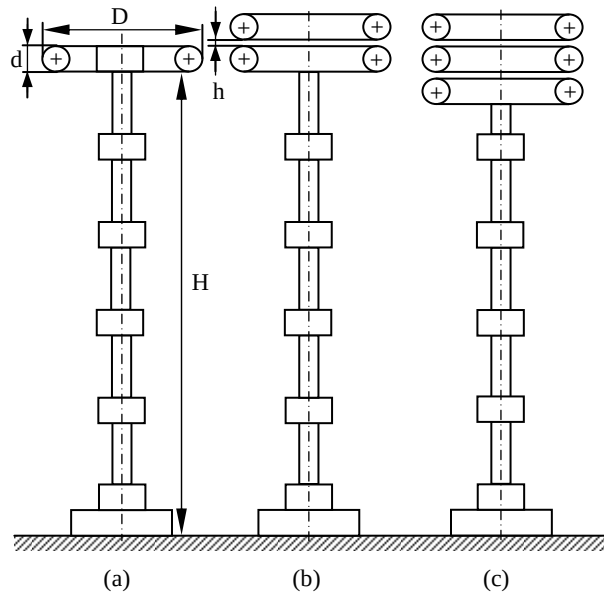
Yüksek gerilim bölücülerinde tepe elektrotu olarak çok farklı biçim, boyut ve dizilişte elektrot sistemleri kullanılmaktadır. Gerilim bölücülerin bu elektrot sistemleriyle elektrik alan dağılımı ve genlikleri hesaplanarak bölücüde ve çevresinde yalıtkanların söz konusu elektriksel zorlanmaya dayanıp dayanmayacağı veya bir elektriksel boşalmayla karşı karşıya kalıp kalmayacağı ve kapasite dağılımı kestirilir. Bu da gerilim bölücünün ve ona bağlı sistemlerin güvenliği ve güvenilirliği bakımından çok önemlidir. Bu önemine uygun

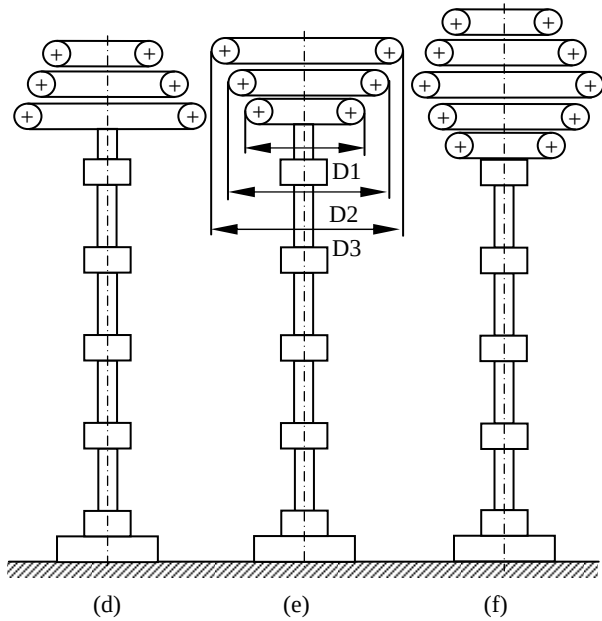
olarak bu konuda pek çok kuramsal ve uygulamalı çalışma yapılmıştır [1-5]. Bu çalışmada da 1000 kV'luk bir gerilim bölücüsünde kullanmak üzere uygun tepe elektrodu seçimini yapmak amacıyla farklı çap, kesit ve sayıda toroid elektrot için elektrik alan analizine dayanan incelemeler sunulmuştur.

2. Problemin Modeli

Yüksek gerilim bölücüsü boyunca elektrik alan dağılımının düzgün ve küçük genlikli olması, gerilim bölücünün ve ölçmenin güvenliği ve güvenilirliği bakımından önemlidir. Bunu etkileyen ve kontrol edilmesini sağlayan etkenlerden birisi bölücünün yüksek gerilim ucunda kullanılan tepe elektrotudur. Tepe elektrotunun boyutu, biçimi ve konumu elektrik alan dağılımını değiştirir. Tepe elektrotlu bir gerilim bölücüsünde alan dağılımının analitik hesabı oldukça zordur. Bu problemlerin çözümü için genellikle sayısal yöntemler daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada da gerilim bölücüsündeki alan dağılımının incelenmesi için Sonlu Elemanlar Yöntemi'nden (SEY) yararlanılmış ve bu yöntemle çözüm yapan, serbest lisanslı FEMM Sürüm 4.2 bilgisayar programı kullanılmıştır [6].

Şekil 1'de elektrik alan analizi yapılacak gerilim bölücünün, kullanılması olası tepe elektrotları ile görüntüleri gösterilmiştir. İncelemeler, 1000 kV'luk, $H = 3$ m yüksekliğinde, yalıtkan kısımları polipropilenden, iletken kısımları alüminyumdan yapılmış, sönümlü tip kapasitif gerilim bölücüsüne uygun tepe elektrodu bulmaya yönelik yapılmıştır.





Şekil 1: Tepe elektrotları farklı gerilim bölücüler. a) Tek toroidli; b) İki toroidli; c) Üç toroidli-1; d) Üç toroidli-2; e) Üç toroidli-3; f) Beş toroidli.

Gerilim bölücünde tepe elektrotu olarak dairesel kesitli metal (alüminyumdan yapılmış) toroid (halka) elektrot türünde bir elektrot kullanılması düşünülmüştür. Çözümlemelerde tepe elektrodun potansiyeli 1000 kV olarak alınmıştır. Topraklı (sıfır volt potansiyelli), karşı elektrot olarak gerilim bölücünün en altındaki alüminyum kasa seçilmiştir. Sistemde toroid çapı D , toroidin dairesel kesit çapı d , toroid sayısı ve çok sayıda toroid kullanılan düzenlerde toroidlerin diziliş türleri değiştirilerek analizler yapılmıştır. Örneğin iki elektrotlu sistemde mevcut toroid elektrotun üstüne bir tane daha birincisi ile eşit yarıçaplı ($D1 = D2 = D$) toroid elektrot yerleştirilmiştir. İki toroidli bu sistemde toroid çapı D değiştirilerek elektrik alan analizleri yapılmıştır.

Üç elektrotlu sistemde toroid elektrotlar hem eşit çaplı ($D1 = D2 = D3 = D$) hem de $D1$, $D2$ ve $D3$ çapları farklı olarak göz önüne alınmış ve bir ters, bir düz basamak şeklinde yerleştirilmeleri durumları için incelemeler yapılmıştır. Beş elektrotlu sistemde ise üç elektrotlu sistemdeki elektrotların özdeşleri simetrik olarak eklenerek 5 adet toroid elektrotlu yapı elde edilmiştir. Her durumda gerilim bölücünün tepe elektrodu 1000 kV potansiyelde, en alttaki metal kasa topraklı olarak alınmıştır.

SEY çözümlemelerinde gerilim bölücü dışına, deneysel çalışmalarda deneylerin içinde gerçekleştirildiği laboratuvarı temsil etmek üzere 3 m yarıçapında, 5 m yüksekliğinde silindrisel bir çerçeve çizilmiştir. Bu çerçevenin göz önüne alınması hem gerçek duruma uygun model oluşturmak hem de alan çözümlemesinde yararlanılan sonlu elemanlar yöntemi için kapalı sınırlı bölge tanımlamak bakımından yararlı olmuştur.

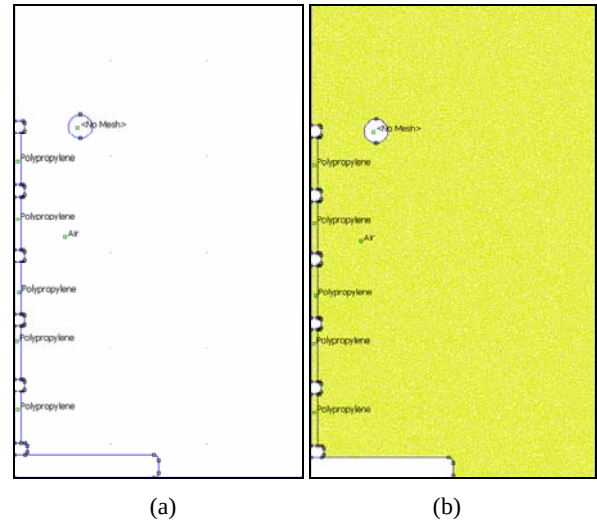
3. Analiz

Sonlu elemanlar yöntemi çözümlemesinin birinci adımı olarak FEMM programında problemin 1/1 ölçekli modeli, eksenel simetri göz önüne alınarak modelin eksene göre bir yarısının şekli ile çizilmiştir. Programın çizim ekranının sol kenarı, programca simetri eksenini tanımlanmıştır.

İkinci adım olarak çizilen modelde yer alan malzemeler programa tanımlanmıştır. Gerilim bölücünde kullanılan malzemeler gerçek sisteme uygun olarak, elektrotların alüminyumdan, yalıtkan gövdenin polipropilenden yapılmış olduğu ve gerilim bölücünün bulunduğu ortamın 1 atmosfer basıncında hava olduğu kabul edilmiştir. Elektrotlar iletken malzemeler olduğundan, statik elektrik alan çözümlemelerinde malzeme türünden bağımsız olarak, elektrot içindeki bölgede alan hesabı yapılmayacak şekilde tanımlanmıştır. Yine de elektrot malzemesi olarak, gerçek sistemde kullanılabilecek uygun olarak alüminyum için bağıl dielektrik sabiti 1, bağıl manyetik geçirgenlik 1 ve elektriksel iletkenlik $3,774 \times 10^7$ S/m alınabilir. Gerilim bölücünün gövde yalıtkanını oluşturan polipropilenin bağıl dielektrik sabiti 2,2, gerilim bölücünün çevresindeki ortamı oluşturan havanın ise 1 alınmıştır.

Çözümlemenin üçüncü adımı olarak problemin sınır koşulları tanımlanmıştır. Dirichlet sınır koşulları olarak, daha önce de belirtildiği gibi, gerilim bölücü tepesindeki elektrotun ve toroid elektrotun potansiyeli 1000 kV kabul edilmiş, en alttaki (tabandaki) elektrotun potansiyeli ise sıfır alınmıştır. Gerilim bölücüyü kuşatan çerçeveye (laboratuvar duvarlarına) Neumann sınır koşulu uygulanmış ve $\partial V / \partial n = 0$ alınmıştır.

Yukarıdaki tanımlamalardan sonra çözüm bölgesi, programın olanakları ile üçgen sonlu elemanlardan oluşmuş ağı bölünmüştür. Örnek olarak Şekil 2'de tek toroid elektrotlu gerilim bölücü modelinin şekli (solda) ve sonlu elemanlar ağı (sağda) gösterilmiştir.



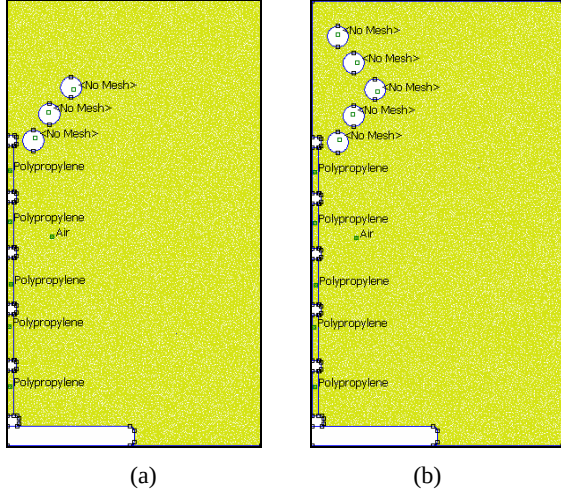
Şekil 2: Tek elektrotlu gerilim bölücü; (a) FEMM'deki çizimi; (b) Sonlu elemanlar ağı

Şekil 2(b)'deki sonlu elemanlar ağında 80318 üçgen sonlu eleman ve 41177 düğüm noktası bulunmaktadır. Şekil 3'te ise üç ve beş toroid elektrotlu sistemler için elde edilen sonlu elemanlar ağları verilmiştir. Bu modeller için de tek elektrotlu sistem analizindeki işlem adımları aynı şekilde uygulanmıştır. Üç elektrotlu sistemin sonlu elemanlar ağında 79811 üçgen eleman ve 40997 düğüm noktası, beş elektrotlu sistemin sonlu elemanlar ağında 79448 üçgen eleman ve 40884 düğüm noktası bulunmaktadır.

Ele alınan problem, ortamda serbest yüklerin bulunmadığı ($\rho = 0$) Laplace tipi bir statik elektrik alan problemi olarak çözümlenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile statik elektrik alan çözümlemesinde ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ϵ_r bağıl dielektrik sabiti, V elektriksel potansiyel olmak üzere

$$-\nabla \epsilon_0 \epsilon_r \nabla V = 0 \quad (1)$$

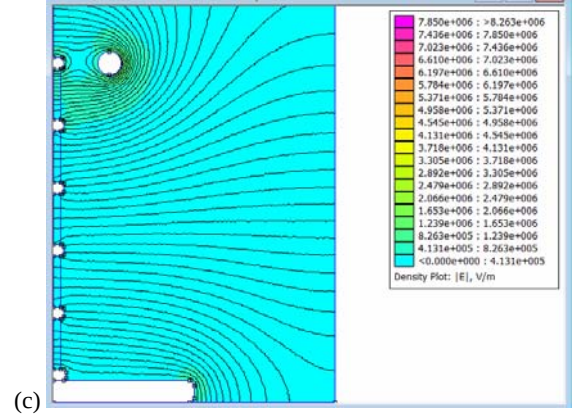
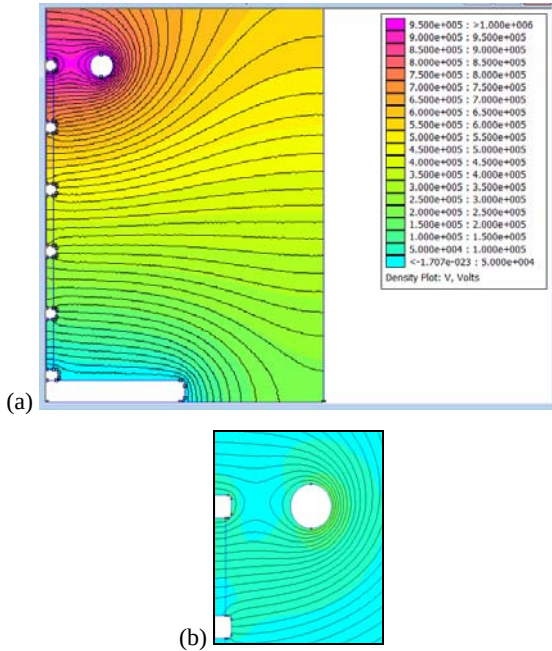
Laplace denkleminin sayısal çözümü yapılmıştır [7, 8]. Sonuçta çalışmada bu denklem, silindrisel koordinatlarda, eksenel simetrik problem olarak tanımlanmış ve FEMM hazır paket sonlu elemanlar programı yardımıyla çözdürülmüştür. Her farklı elektrot durumu için model tekrar oluşturulup, sonlu elemanlar ağına bölünmüş ve çözümler yeniden yapılmıştır.



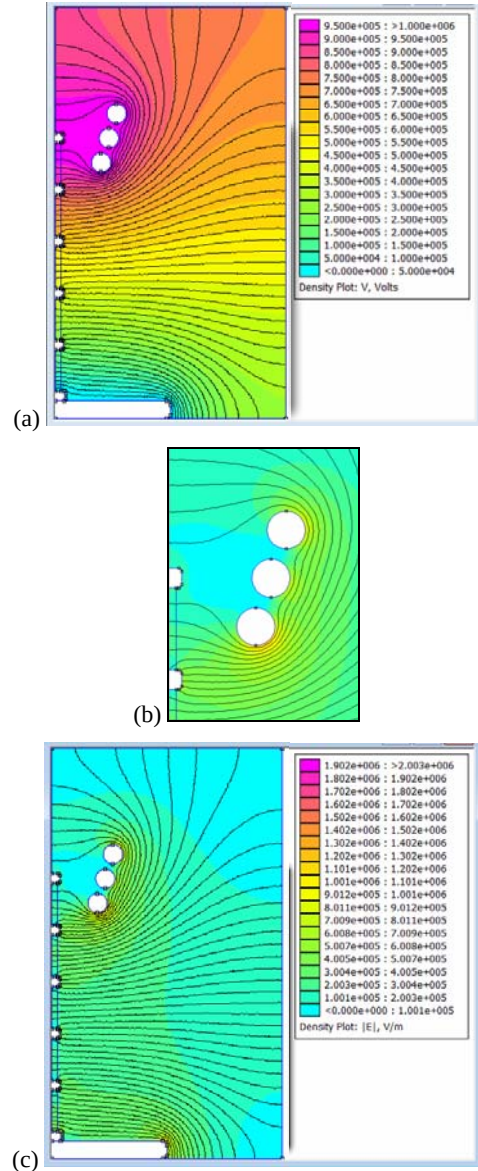
Şekil 3: a) Üç elektrotlu modelin sonlu elemanlar ağı;
b) Beş elektrotlu modelin sonlu elemanlar ağı.

4. Benzetim Sonuçları

Her bir model için denklem (1)'in sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesi ile modellere ilişkin potansiyel ve elektrik alan dağılımları bulunmuştur. Örnek olarak Şekil 4'te tek elektrotlu sistemdeki potansiyel ve elektrik alan dağılımı, Şekil 5'de üç elektrotlu sistemdeki potansiyel dağılımı ve elektrik alan dağılımı, son olarak da Şekil 6'da beş elektrotlu sistemdeki potansiyel dağılımı ve elektrik alan dağılımı gösterilmiştir.



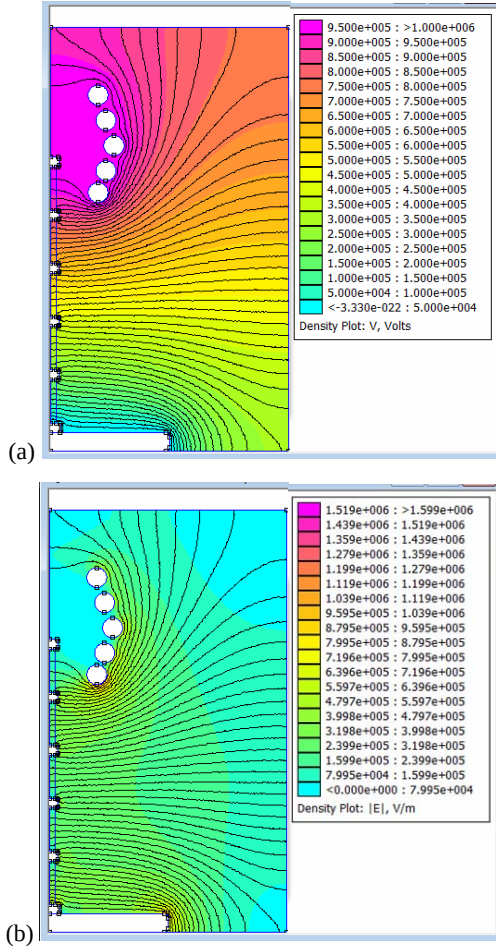
Şekil 4: Tek elektrotlu sistemde (a), (b) potansiyel ve (c) Eşpotansiyel çizgilerle birlikte elektrik alan dağılımı



Şekil 5: Üç elektrotlu sistemde (a), (b) potansiyel ve (c) Eşpotansiyel çizgilerle birlikte elektrik alan dağılımı

Tek elektrotlu sistemin FEMM analizi yapıldıktan sonra üst elektrotun üzerinde ve alt kutunun sivri bölgelerinde alan şiddetinin çok yüksek olduğu saptanmıştır. Bu düzende elektrik alan şiddetinin mutlak değeri olarak en büyük radyal bileşeni $E_r = 8200$ kV/m, en büyük eksenel bileşeni $E_z = -1100$ kV/m ve maksimum alan şiddeti $E_{max} = 8273$ kV/m elde edilmiştir.

Üç elektrotlu sistemde dizilişe göre elektrik alan şiddetinin mutlak değeri olarak en büyük radyal bileşeni $E_r = 1270$ kV/m, en büyük eksenel bileşeni $E_z = -1540$ kV/m ve maksimum alan şiddeti $E_{max} = 2000$ kV/m elde edilmiştir.



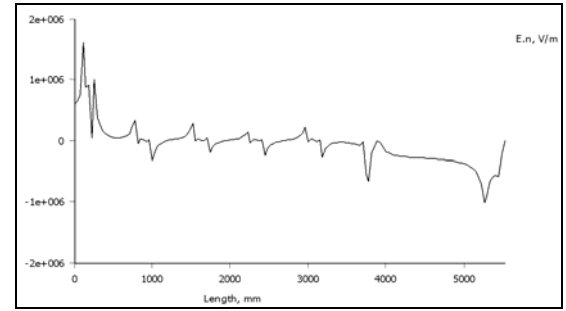
Şekil 6: Beş elektrotlu sistemde (a) potansiyel ve (b) elektrik alan dağılımı

Üç ve beş elektrotlu sistemin FEMM analizi yapıldıktan sonra en alttaki elektrotun üzerinde ve alt kutunun sivri bölgelerinde alan şiddeti değerinin çok yüksek olduğu saptanmıştır. Beş elektrotlu düzene göre elektrik alan şiddetinin mutlak değeri olarak en büyük radyal bileşeni $E_r = 717.9$ kV/m, en büyük eksenel bileşeni $E_z = -1430$ kV/m ve maksimum alan şiddeti $E_{max} = 1600$ kV/m elde edilmiştir.

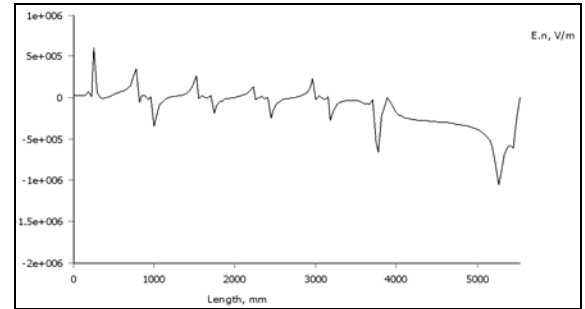
5. Sonuçlar ve Değerlendirme

Elde edilen benzetim sonuçlarından, bölücü yüzeyindeki elektrik alan dağılımının elektrot geometrisine, boyutlarına ve dizilişine göre değiştiği gözlenmiştir. En uygun toroid seçimi yapılırken dört aşamalı bir yol izlenmiştir. İlk olarak tek

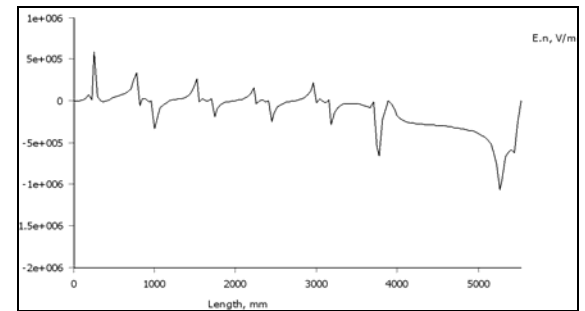
toroidli yapıda $D = 120$ cm'de sabit tutularak, $d = 10$ cm, $12,5$ cm, 15 cm ve 25 cm için analizler yapılmış ve buradan en uygun (en düşük) elektrik alan şiddeti değerini veren çap belirlenmiştir. Burada D ve d çapları, bulunabilir, yapılabilir ölçüler içinde iken en düşük alanı veren elektrot sisteminin seçilmesi esastır. İkinci aşamada ise iki toroidli yapıda uygun iç çap olarak belirlenen $d = 25$ cm'lik çap sabit tutulup, toroid çapları (D) eşit 120 cm ve toroid çapları farklı (1. toroid çapı 100 cm, 2. toroid çapı 120 cm) yapı için analiz yapılmıştır. Üçüncü aşamada üç toroidli yapı için ikinci toroid üst elektrot yapısında olmak üzere diziliş sırasına göre dış çaplar $D3 = 120$ cm, $D2 = 100$ cm, $D1 = 80$ cm için analizler yapılmıştır. Dördüncü aşamada ise beş toroidli yapı için üçüncü toroid üst elektrot hizasında iken analiz yapılmıştır. Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da gerilim bölücü yüzeyindeki elektrik alan dağılımlarının her bir elektrot yapısı için değişimi verilmiştir.



Şekil 7: Tek elektrotlu sistem için elektrik alan dağılımı



Şekil 8: Üçlü elektrot sistemi için elektrik alan dağılımı



Şekil 9: Beşli elektrot sistemi için elektrik alan dağılımı

Tek toroidli gerilim bölücü için toroid çapı (D) sabit tutulup, toroid kesit çapları d değiştirilerek maksimum elektrik alanın değişimi Tablo 1'de verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre gerilim bölücüde $d = 25$ cm ve $D = 120$ cm olan toroid elektrotlu durumda en uygun (en düşük) alan şiddeti olduğu görülmektedir.

Tablo 1: Tek toroidli yapıda toroid dış çapı (D = 120 cm) sabit tutularak elde edilen maksimum elektrik alan değerleri

Toroid iç çapı, d (cm)	E_{max} (kV/m)
25	8263
15	12514
12,5	13739
10	18436

Tablo 2’de ise tek toroidli yapının toroid iç (kesit) çapı d = 25 cm sabit tutulup, dış çapı (D) değiştirilerek toroid üzerinde en düşük alan şiddeti elde edilmeye çalışılmıştır. Dış çap D = 120 cm için en düşük maksimum alan şiddetinin oluştuğu gözlenmiştir.

Tablo 2: Tek toroidli yapıda toroid iç çapı d = 25 cm sabit tutularak elde edilen maksimum elektrik alan değerleri

Toroid dış çapı, D (cm)	E_{max} (kV/m)
85	8793
100	8354
120	8263
140	9076

Tablo 3’de ise iki toroidli yapının toroid iç çapı d = 25 cm sabit tutulup, dış çapları değiştirilerek en düşük alan şiddeti elde edilmeye çalışılmıştır. D1 = D2 = 120 cm ve D1 = 100 cm, D2 = 120 cm için analizler yapılmış ve sonuçlar verilmiştir. Dış çaplar D1 = 100 cm ve D2 = 120 cm için en düşük alan şiddetinin elde edildiği görülmüştür.

Tablo 3: İki toroidli yapıda toroidlerin iç çapı d = 25 cm sabit tutularak elde edilen maksimum elektrik alan değerleri

Toroid çapları (D1 ve D2)	E_{max} (kV/m)
D1 = 120 cm, D2 = 120 cm	8348
D1 = 100 cm, D2 = 120 cm	8200

Tablo 4’de ise üç toroidli yapının toroid iç çapı d = 25 cm sabit tutulup, dış çapları sırasıyla D1 = 120 cm, D2 = 100 cm, D3 = 80 cm ve D1 = 80 cm, D2 = 100 cm, D3 = 120 cm için analizler yapılmış ve ikinci durum için daha düşük alan şiddetinin oluştuğu görülmüştür.

Tablo 4: Üç toroidli yapıda toroid iç çapı d = 25 cm sabit tutularak elde edilen maksimum elektrik alan değerleri

Toroid çapları (D1, D2, D3)	E_{max} (kV/m)
D1 = 120 cm, D2 = 100 cm, D3 = 80 cm	2002,631
D1 = 80 cm, D2 = 100 cm, D3 = 120 cm	2002,629

Beş elektrotlu toroid yapısı için maksimum elektrik alan şiddeti 1599 kV/m olarak hesaplanmıştır. Yapılan tüm hesaplamalarda FEMM programı, sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm bölgesi içinde W enerjisini V_i düğüm potansiyellerine göre minimum yapan

$$\partial W / \partial V_i = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n_d \quad (n_d: \text{düğüm sayısı}) \quad (2)$$

çözümünü bulmaktadır. Bu sırada oluşturduğu

$$A x = b \quad (3)$$

şeklindeki büyük boyutlu, seyrek yapıdaki doğrusal cebirsel denklem takımını eşlenik eğim yöntemi ile yinelemeli olarak çözerken yakınsama bağlı hatası yani $\|b - A x\|/\|b\|$ için sınır değer 10^{-8} alınmıştır. (2) denkleminde A kare matris şeklinde katsayılar matrisini, b sonlu elemanlar ağında potansiyeli bilinen düğümlerin potansiyel değerlerini ve x bulunacak, bilinmeyen düğüm potansiyellerini göstermektedir.

Sonuç olarak, istenen, çalışılan boyutlar aralığında yapılan tüm analizlerin sonunda bulunan maksimum alan şiddeti değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre en uygun (en düşük) elektrik alan şiddetini oluşturan yapının d = 25 cm, D1 = 80 cm, D2 = 100 cm, D3 = 120 cm olan beş toroidli tepe elektrotlu gerilim bölücü düzeninin olduğu saptanmıştır.

Sunulan çalışmada yapılanlara ek olarak, elektrot biçimleri sabit tutulup, gerilim bölücü yüksekliği ve gerilim düzeyi değiştirilerek alan dağılımları elde edilebileceği gibi farklı biçimli tepe elektrotları olan sistemlerde, bölücü yüksekliği sabit tutularak farklı gerilim seviyelerindeki alan dağılımları incelenebilir. Farklı elektrot türleri için kapasiteler hesaplanıp, gerilim bölücünün kapasitesine etkisi incelenebilir. Bunlar karşılaşılabilecek veya karşılaşılan durumları hızlı ve ekonomik olarak değerlendirmek açısından yararlı olur. Yüksek gerilimde elektriksel zorlanmaya ve boşalma olaylarına etki eden pek çok etkenin varlığı nedeniyle elde edilen teorik sonuçların kullanılabilir olabilmesi için benzetim sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması doğru sonuç ve kararlara ulaşmak için önemlidir.

6. Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı tarafından desteklenen 108E179 numaralı proje kapsamında yapılmıştır. Desteği nedeniyle TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

7. Kaynaklar

- [1] W. M. Caminhas, R. R. Saldanha, G. R. Mateus, "Optimization methods used for determining the geometry of shielding electrodes", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 26, no. 2, Mar. 1990, pp. 642 - 645.
- [2] M. Zucca, A. Sardi, O. Bottauscio, O. Saracco, "Modelling HV reference dividers for lightning impulses", 11th Int. Symp. on High Voltage Eng., Amsterdam, Netherlands, vol. 1, 1999, pp. 70 - 73.
- [3] K. Feser, "Dimensioning of electrodes in the UHV range-illustrated with the example of toroid electrodes for voltage dividers", Haefely Publ., E 1-30, pp. 1-7, 1975.
- [4] W. Hauschild, "Engineering the electrodes of high-voltage test systems on the basis of the physics of discharges in air", in Proc. 9th Int. Symp. HV Eng., Graz-Austria, Aug. 28, 1995, paper 9002: 1-11.
- [5] A. Di Napoli, C. Mazzetti, "Electrostatic and electromagnetic field computation for the H.V. resistive divider design", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, no. 98, 1979, pp. 197-206.
- [6] D. Meeker, FEMM 4.2 Finite Element Method Magnetics Software, 2007.
- [7] P. B. Zhou, Numerical Analysis of Electromagnetic Fields, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [8] M. N. O. Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2001.