

BİR ELEKTROT SİSTEMİNİN ELEKTRİK ALAN DAĞILIMINA PÜRÜZ ETKİSİNİN SEY İLE ÜÇ BOYUTLU ANALİZİ

Kaan KUTUCU¹ Özcan KALENDERLİ²

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
34469 Maslak, İstanbul

¹e-posta: kaankutucu@gmail.com ²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada hava ortamında, çubuk-düzlem elektrot sisteminin düzlem elektrotu üzerindeki, sabit yarıçaplı, yarı-küresel, iletken yüzey pürüzünün farklı konumlarında, elektrot sisteminin elektrik alan dağılımına etkisi bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Model, gerilim altındaki çubuk elektrot ve topraklanmış yarı küre şeklindeki iletken pürüzü üzerinde bulunduran, düzlemsel elektrottan meydana gelmiştir. İncelemeler, sabit gerilim genliği, elektrot açıklığı ve ortam koşullarında yapılmıştır. Yarı-küresel pürüzün konumunun (merkezinin) çubuk elektrot eksenine olan dik uzaklığının belirli bir değerinden sonra, pürüzün üzerindeki elektrik alanın en fazla olduğu noktanın değerinin yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Pürüzlü elektrot, Elektrik alan dağılımı, Üç boyutlu alan analizi, Sonlu elemanlar yöntemi

1. GİRİŞ

Yüksek gerilim tekniğinde gerilim altındaki iletkenlere elektrot adı verilir. Yüksek potansiyeldeki ve alçak potansiyeldeki her bir elektrot çifti bir elektrot sistemi oluşturur. Elektrot sistemlerinde genelde bir elektrot yüksek gerilimde, diğer elektrot ise topraklanmış durumda olur. Elektrotların geometrisine, boyutlarına, malzemesine, yüzey durumuna göre, elektrotlar arası uzaklığa (elektrot açıklığına) göre, elektrotlar arasındaki yalıtkan malzemenin türüne (katı, sıvı, gaz, vakum, karma), özelliklerine (yeni, eski, kirli, temiz, ...), bulunma koşullarına (sıcaklığına, basıncına, nemine, ...) göre, uygulanan gerilimin türüne, dalga şekline, süresine göre elektrik alanı altındaki davranış farklılıkları gösterir.

Yüksek gerilim uygulamalarında çok farklı elektrot sistemleriyle karşılaşılır. Az düzgün ve düzgün olmayan alan dağılımı veren elektrot sistemleri çoğunluktadır. Bir elektrot sisteminde elektrik alan dağılımı ve genlikleri hesaplanarak aradaki yalıtkanın söz konusu zorlanmaya (alana) dayanıp dayanmayacağı veya bir elektriksel boşalmayla karşı karşıya kalıp kalmayacağını kestirilir. Bu da sistem güvenliği ve güvenilirliği bakımından çok önemlidir.

Düzgün olmayan alanlı elektrot sistemlerinde alan dağılımını analitik hesaplarla bulabilmek zordur. Bu gibi durumlarda ya amprik bağıntılar ya da sayısal yöntemler kullanılmak zorunda kalınır. Dönel veya eksenel simetrisi olmayan problemlerin çözülmesi, üç boyutlu analizi gerektirmesi nedeniyle ayrı bir zorluk gösterir. Uygulamada bu gibi durumlarda teorik olarak incelemenin zorluğunu aşmak ve karşılaşılabilecek durumlara daha yakın sonuçlar elde edebilmek için deneysel çalışmalar yapılır.

Deneysel çalışmalarda uygulamadaki gibi düzgün olmayan alan göstermesi ve kullanım kolaylığı nedeniyle çubuk-düzlem elektrot sistemi yaygın olarak kullanılır. Elektrotlar arasında, davranışı incelenmek istenen yalıtkan (örneğin saf gaz veya gaz karışımı veya sıvı yalıtkan) varken kısmi boşalma ve delinme deneyleri yapılır. Yalıtkan malzemenin gerilim altındaki davranışına etki eden bir parametre olmaması için kullanılan elektrotların, temiz ve pürüzsüz olması istenir. Ancak uygulamada hemen hemen bunu sağlamak olanaksızdır. Çünkü elektrotlar hem kendilerinden hem de ortamdaki yabancı parçacıklardan (iletken veya yalıtkan tozlardan, liflerden, ...) pürüzlü elektrot durumu sergilerler. Pürüzü, geometrisi, boyutu, konumu, sayısı, malzemesi ile dikkate alarak elektrik alan incelemesi yapmak ayrı bir zorluktur. Genelde deneysel çalışmalarda elektrotlarda pürüz varlığının etkisi sonuçlar içinde yer alır. Çok özel durumlar dışında ayrıca pürüz etkisi incelenmez, incelenmesi de çok zordur. Bunu teorik olarak yapmak ise bir simetri söz konusu değilse, sayısal yöntemlerle üç boyutlu alan analizini gerektirir. Bu konuda oldukça sınırlı çalışma vardır. Literatürde bu konu ile ilgili hem deneysel hem de bilgisayar ortamında yapılan çalışmalardan birkaç örnek [1-5] numaralı kaynaklarda verilmiştir. Bu iş için kullanılabilecek pek çok sayısal yöntem olmasına karşın, bu çalışmada olduğu gibi, sonlu elemanlar yöntemini üç boyutlu haliyle kullanmak ilk akla gelen çözümdür.

Bu çalışmada, yüksek gerilim laboratuvarlarında deneysel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan türden bir çubuk-düzlem elektrot sisteminin düzlemsel elektrotu üzerinde bulunan bir pürüzün konumu değiştirilerek sabit elektrot açıklığında, sabit gerilim ve hava ortamında elektrik alan incelemesi, üç boyutlu olarak sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır.

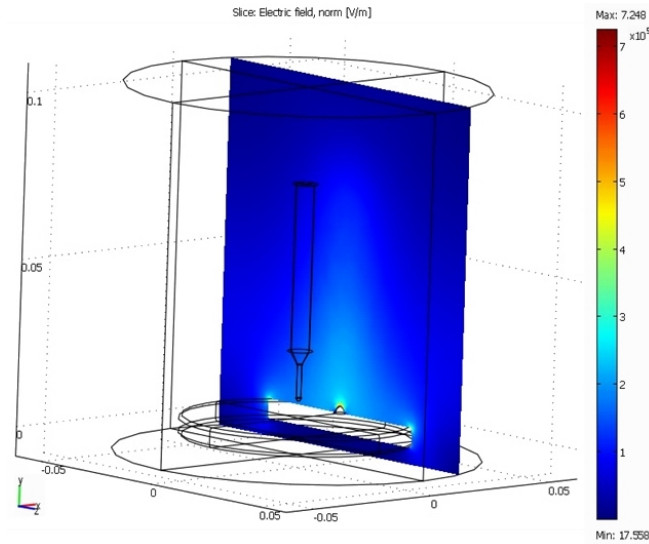
Ele alınan problem, ortamda serbest yüklerin bulunmadığı ($\rho = 0$) Laplace tipi bir statik elektrik alan problemidir. Sonlu elemanlar yöntemi ile statik elektrik alan çözümlemesinde ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ϵ_r bağlı dielektrik sabiti, V elektriksel potansiyel olmak üzere

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

Laplace denkleminin sayısal olarak çözümü gerekir [6, 7]. Çalışmada bu denklem, üç boyutlu olarak kartezyen koordinatlarda tanımlanmış ve bir hazır paket sonlu elemanlar programı yardımıyla çözdürülmüştür. Her farklı pürüz konumu için model tekrar oluşturulup, sonlu elemanlar ağına bölünmüş ve çözüm yeniden yapılmıştır.

3. BENZETİM SONUÇLARI

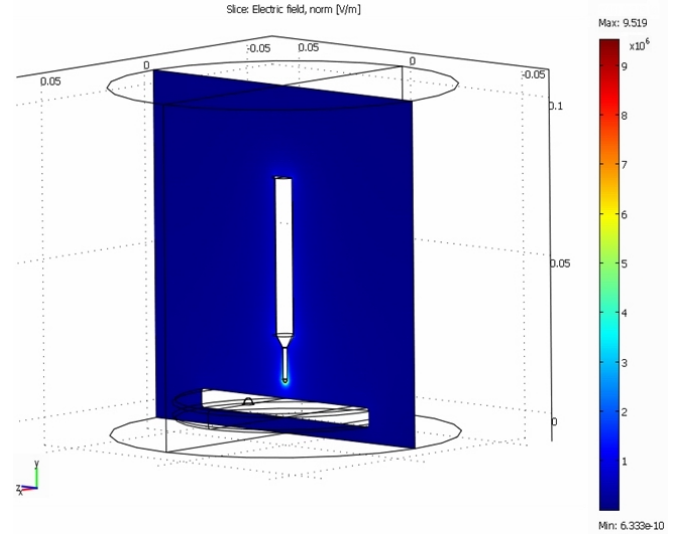
Denklem (1)'in sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesi ile modelin elektrik alan dağılımı bulunmuştur. Örnek olarak Şekil 4'te merkezden 18 mm uzaklıkta bulunan 1 mm yarıçaplı yarı-küresel pürüzü içeren modelin, pürüz ekseninden geçen düzlem üzerindeki elektrik alan dağılımı ve Şekil 5'te aynı model için, elektrot sisteminin simetri ekseninden geçen düzlem üzerindeki alan dağılımı gösterilmiştir.



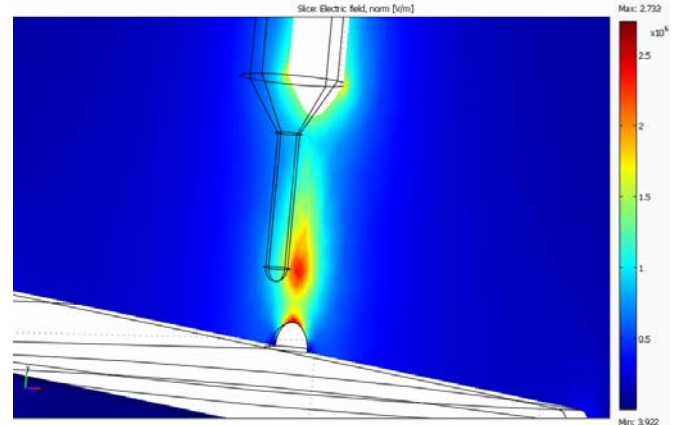
Şekil 4. Pürüz çevresindeki elektrik alan dağılımı (maksimum 7.25×10^5 V/m, minimum 17.56 V/m)

Şekil 6'da pürüzün merkezden 2 mm uzakta olması durumunda, pürüz çevresindeki elektrik alan dağılımı gösterilmiştir. Alan dağılımından da görüleceği üzere, pürüz üzerindeki maksimum elektrik alanı pürüzün tepesinde olmaktadır. Ayrıca buna ek olarak gerilim altındaki çubuk elektrotun pürüzün tepe noktasını içeren yüzeyde oluşturduğu elektrik alan şiddeti, pürüzün tepe noktasında oluşan alan şiddetine yaklaşık olarak eşittir. Şekil 4, 5 ve

6'dan da görüleceği üzere pürüz ne kadar merkeze yani çubuk elektrotu yakın ise pürüz ve çubuk elektrot üzerinde oluşan elektrik alan değerleri o kadar büyümekte, bunun sonucu olarak atlamanın veya delinmenin oluşma olasılığı yükselmektedir.

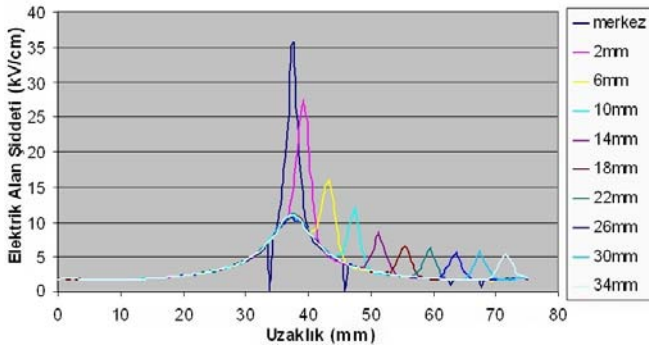


Şekil 5. Çubuk elektrot çevresindeki elektrik alan dağılımı (maksimum 9.52×10^6 V/m, minimum 6.33×10^{-10} V/m)



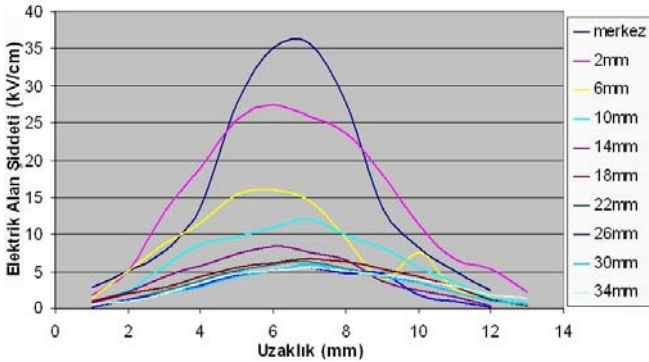
Şekil 6. Pürüz çevresindeki elektrik alan dağılımı

Şekil 7'de düzlemsel elektrot boyunca, pürüzün tepe noktasını kesen ve merkezden geçen sanal bir doğru üzerindeki elektrik alan değerleri, bütün pürüz konumları için tek bir grafikte gösterilmiştir. Yatay eksen sanal doğrunun boyunu göstermektedir. Şekil 7'den görüldüğü üzere pürüz merkezden uzaklaştıkça elektrik alanın maksimum değerinde azalma olmaktadır. Azalmanın doğrusal olmadığı ve yaklaşık olarak üstel olarak değiştiği söylenebilir. Benzetimde 22 mm açıklıktan sonra elektrik alanların maksimum değerlerinde belirgin bir değişimin olmadığı görülmüştür.



Şekil 7. Farklı pürüz konumlarında sanal doğru üzerindeki elektrik alan dağılımları

Son olarak Şekil 8'de çubuk elektrot ile pürüzün aynı düzlem üzerinde bulunduğu yüzeyde, pürüz yüzeyindeki elektrik alan şiddeti dağılımları gösterilmiştir. Pürüzün merkezden olan uzaklığı arttıkça maksimum elektrik alan şiddetlerinin azaldığı Şekil 8'de de görülmektedir. Buna ek olarak pürüzün çubuk elektrotla yakın olan yüzeyinde elektrik alan değerinin diğer yüzeye göre daha fazla olduğu ve bu kısımdaki artışın daha dik olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Farklı konumlarda pürüz yüzeyindeki elektrik alan dağılımları

4. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, sabit gerilim altında, sabit elektrot açıklığında, sabit pürüz yarıçapı için yüksek gerilim uygulanmış çubuk elektrot ve topraklanmış düzlemsel elektrot sisteminde, düzlemsel elektrot üzerinde bulunan bir adet yarı-küresel pürüzün konumuna göre sistemdeki elektrik alanın değişimi incelenmiştir. Problemin simetrisiz yapısı nedeniyle inceleme üç boyutlu olarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır.

Elde edilen benzetim sonuçlarından, elektrik alan dağılımının pürüzün konumuna göre değiştiği gözlenmiştir. Bu değişimin, pürüzün merkeze olan uzaklığıyla orantılı olduğu ve artan uzaklıkla orantılı olarak yaklaşık üstel olarak azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, bu gözlemlere ek olarak

belirli bir açıklıktan sonra (benzetimde 22 mm ve daha uzaktaki pürüzler için) pürüz üzerindeki elektrik alan şiddetinin maksimum değerinin değişiminin yaklaşık olarak sabit kaldığı, elektrotlar arasındaki alandan etkilenmediği veya pürüzün elektrotlar arasındaki maksimum alan şiddetini etkilemediği görülmüştür.

Yapılan çalışma kesici ve gaz yalıtımlı sistemler için yüzey pürüzü analizlerinde kullanılabilir. Ayrıca, ortam olarak hava dışında SF6 gazı gibi yalıtım amacıyla kullanılan gazların, gaz karışımlarının veya sıvıların delinme deneylerinin benzetimleri yapılabilir. Sunulan çalışmada yapılanlara ek olarak, sabit pürüz konumunda çubuk elektrot ile düzlemsel elektrot arasındaki açıklık ve gerilim değiştirilerek alan dağılımları elde edilebilir. Farklı elektrot sistemleri ve farklı geometriye pürüz türleri için ve iletken veya yalıtkan malzemeden yapılmış farklı boyutlardaki pürüzler için incelemeler yapılabilir. Pürüz sayısı ve konumları değiştirilebilir. 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 karşılaştırması önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] H. İsmailoğlu, Ö. Kalenderli, M. Özkaya, İ. Gönenç, "Breakdown in compressed N2 under impulse voltages", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (The 1997 CEIDP), Minneapolis, USA, Vol. 2, pp. 604-607, October 19-22, 1997.
- [2] T. Shimazaki, "Flashover characteristics and surface processes under negative impulse voltage in atmospheric air", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27, No. 3, 1992, pp. 488-495.
- [3] K. Yamazawa, H. Yamashita, "Calculation of the electric field distribution under the point-plane gap configurations using the FEM", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (The 1997 CEIDP), Minneapolis, USA, Vol. 1, pp. 648-651, October 19-22, 1997.
- [4] D. Amft, D. Werner, W. Schufft, "Calculation of the field strength enhancement at rough surfaces", The 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, The Netherlands, August 25-29, 2003
- [5] V. V. Choukov, "Effect of electrode surface roughness on electrical breakdown in high voltage apparatus", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 1; February 2005, pp. 98-103
- [6] Zhou, P. B., Numerical Analysis of Electromagnetic Fields, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [7] Sadiku, M. N. O., Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2nd Ed., 2001.