

YALITKAN MALZEME KALİTESİNE İÇİNDEKİ BOŞLUKLARIN ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZİ

Suat İLHAN¹

Özcan KALENDERLİ²

Suna BOLAT³

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi

Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul

¹e-posta: ilhan@elk.itu.edu.tr ²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr ³e-posta: bolats@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Yüksek Gerilim, Yalıtkan, Kısmi Boşalma, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ÖZET

Bu çalışmada elektriksel yalıtkanların, işletme koşullarında, içlerinde varolan boşlukların şekline, büyüklüğüne, konumuna, sayısına ve malzemesine bağlı olarak zorlanması ve buna bağlı olarak kullanıldıkları aygıtın ve/veya sistemin ömrüne, güvenliğine dolayısıyla kalite ve verimine etkileri, sonlu elemanlar yöntemiyle elektrik alan analizleri yapılarak incelenmiştir. İncelemelerde içinde küresel, silindrisel, elipsoit boşluklar bulunan yalıtkanlarda maksimum alan şiddetleri hesaplanmıştır. Boşluk boyutları küçüldükçe zorlanmanın arttığı; ortadaki boşlukların diğer yerlerdeki boşluklardan daha fazla zorlandığı; boşluk sayısı arttıkça boşluk başına düşen zorlanmanın azaldığı; silindrisel boşlukların diğerlerine göre biraz daha fazla zorlandığı; düşey elipsoit boşlukların yatay elipsoit boşluklara göre daha az zorlandığı ve her durumda malzeme dielektrik sabiti büyüdükçe boşluklardaki zorlanmaların da arttığı görülmüştür.

1. GİRİŞ

Bir yalıtıkanda karşılaşılan bir sorun, kullanıldığı aygıtın ve bu aygıtın kullanıldığı sistemin güvenliğini, kalitesini dolayısıyla verimini olumsuz yönde etkiler. Yalıtkanlarda en sık karşılaşılan sorunların başında içlerinde var olan veya değişik etkenlerle sonradan oluşan boşluklardır. Boşluklu yalıtkanlarda, boşluklar nedeniyle alan dağılımı bozulur. Bu çalışmada, bozulan alan dağılımının, boşluk biçimi, boyutu, konumu, sayısı, iç ve dış ortamının özellikleri ile ilişkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Böylelikle zorlanma dağılımında aşırı zorlanan ve boşalma koşullarını yaratan durumları değerlendirerek yalıtkan ömründeki sınırlamaları incelemek ve ortaya koymaktır. Bunun için değişik geometrik şekillerde içi hava dolu boşluklar içeren, farklı dielektrik sabitli yalıtkan malzemeler içindeki elektrik alan dağılımı Sonlu Elemanlar Yöntemi ile incelenmiştir. Yalıtkan içinde küre, yarım-küre, elips ve silindir şeklinde boşluklar olması durumları ayrı ayrı göz önüne alınmıştır. İncelemelerde, boşlukların eksenel ve döl simetrilerinden yararlanmak ve inceleme kolaylığı sağlamak bakımından boşlukların yalıtkan malzemenin simetri eksenini üzerinde bulunduğu varsayılmıştır.

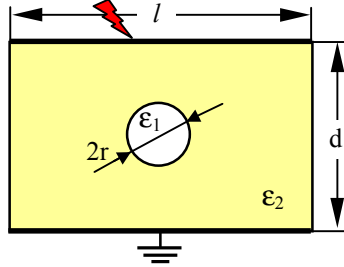
Yalıtım sistemlerinin içinde veya çevresindeki elektrik alan dağılımlarının incelenmesi, yüksek gerilimlerde çalışan aygıtların tasarımında, boşalma olayları ile ilgileri nedeniyle sistem güvenliği bakımından çok önemlidir [1, 3]. Yalıtım sistemi içindeki zorlanma dağılımı ve maksimum zorlanma değeri, bilinmesi ve kontrol edilmesi gereken önemli parametrelerdir. Çünkü, bir yalıtkan içindeki elektrik alan şiddetinin değeri kısmi boşalmaların başlamasını ve ilerlemesini önemli ölçüde belirler. Yalıtım sistemi içindeki yalıtkanın alan dağılımını önemli ölçüde etkileyen boşluklar, malzemenin üretimi, kullanılması, taşınması veya döşenmesi sırasında meydana gelebilir [4]. Bu boşluklar, genelde içleri gaz (çoğunlukla hava) dolu, bazı durumlarda da sıvı (yağ, su) dolu boşluklardır. Boşluk içindeki gaz veya sıvı yalıtkanların dielektrik sabitleri, içlerinde yer aldıkları katı yalıtkan malzemelerin dielektrik sabitlerine göre daha küçüktür. Sonuç olarak, bir elektrik alanı içinde bulunan malzemelerden dielektrik sabiti küçük olanlar, dielektrik sabiti büyük olanlardan daha çok zorlanırlar [5]. Dolayısıyla yalıtım sistemi içindeki boşluklardaki elektriksel zorlanmanın düzeyi, kısmi boşalmalara sebep olabilecek yükseklikte olabilir.

Yalıtkan içindeki boşluklardan kaynaklanan kısmi boşalma olayı, üzerinde çokça çalışma yapılan bir konudur. Analitik çözüm yöntemleri ile, düzgün alanda, içinde boşluk bulunan yapılarda elektrik alan analizleri kolaylıkla yapılabilir [2]. Çoğu yüksek gerilim sisteminin karmaşık yapıda olması, çok sayıda boşluk içermesi nedeni ile, elektrik alan dağılımlarını hesaplamada analitik yöntemlerin kullanılması oldukça güçtür. Bu sebepten, elektrik alan dağılımını hesaplamada genellikle sayısal yöntemler kullanılır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) alan hesaplamalarında yaygın ve etkin olarak kullanılan bu sayısal yöntemlerden biridir. Bu çalışmada da elektrik alan analizleri SEY ile yapılmıştır.

Bu çalışmada, farklı geometrilerde boşluk içeren yalıtkanlar için SEY ile yapılan analizler verilmiştir. SEY analizlerinde FEMM (Finite Element Method Magnetism) adlı, Windows 95 ve üstü bilgisayar işletim sisteminde çalışan bir paket yazılımından yararlanılmıştır [7].

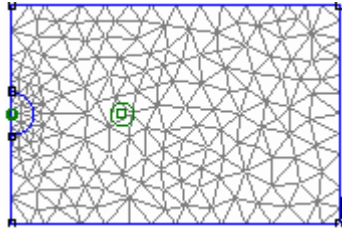
2 KÜRESEL BOŞLUKLU BİR YALITKANDA ELEKTRİK ALAN DAĞILIMI

Yalıtkan içindeki boşlukların çoğunlukla Şekil 1'deki gibi küre şeklinde veya küreye benzer şekilde olduğu bilinir ve kabul edilir.



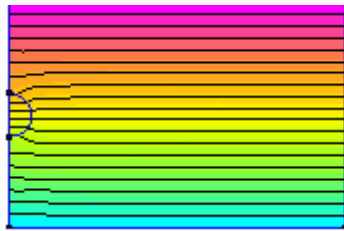
Şekil 1. Küresel boşuklu bir yalıtkan

Bu nedenle küre, en yaygın göz önüne alınan boşluk geometrisidir. Burada ortasında içi hava dolu küresel boşluk bulunan yalıtkan içindeki elektrik alan dağılımı, farklı küre çapları, yalıtkan malzeme kalınlıkları ve dielektrik sabitleri için incelenecektir. İncelemede hem boşluk içindeki hem de yalıtkan içindeki alan dağılımları elde edilecek ve bu dağılımlar içinden maksimum alan şiddetleri (E_{max}) ve yerleri bulunacaktır.



Şekil 2. Problemin sonlu elemanlar ağı

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yapılan incelemelerde, yalıtkan içindeki küresel boşlukların yalıtkan malzemenin simetri eksenini üzerinde bulunduğu varsayılmıştır. Şekil 2'de problemin SEY ağı gösterilmiştir. Çözümlemenin sınır koşulları olarak; üst elektrodun potansiyeli 1 Volt, alt elektrodun potansiyeli ise 0 Volt alınmış ve topraklı olduğu varsayılmıştır. Bu şekilde sınır potansiyelleri seçilmesinin nedeni, birim değer veya yüzde cinsinden problemi inceleyerek diğer gerilim değerlerindeki durumları kolay değerlendirebilmek içindir.



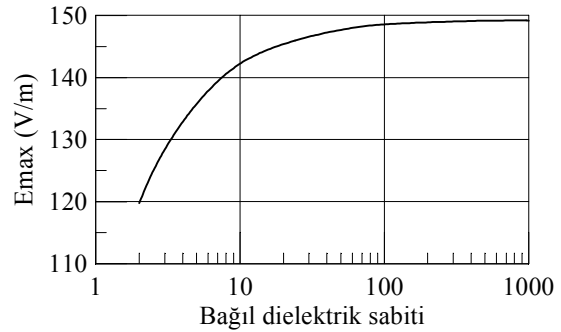
Şekil 3. Ortasında küresel boşluk bulunan bir yalıtıkta potansiyel dağılımı.

Sonlu Elemanlar Yöntemi ile yapılan hesaplamalarda yalıtkan malzemenin bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) sırasıyla 2, 4, 10, 80, 150 ve 1000 alınmış, boşluk içinde hava (veya gaz) bulunduğu, bunun da bağıl dielektrik sabitinin 1 olduğu kabul edilmiştir. Her bir farklı dielektrik sabitli malzemede, küresel boşluğun $2r$ çapı ile yalıtkan malzemenin kalınlığı d arasındaki $2r/d$ oranları, 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 ve 0,25 alınarak hesaplar yapılmıştır. $2r/d$ oranları ile inceleme, araştırmayı malzeme ve boşluğun mutlak boyutlarından kurtararak bağıl değerlendirme olanağı bulmak için yapılmıştır.

Şekil 3'te elde edilen bir potansiyel dağılımı gösterilmiştir. Boşluk içindeki maksimum elektrik alan şiddetleri V/m boyutunda Çizelge 1'de, birinin değişimi Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 1: Ortasında bir küresel boşluk bulunan bir yalıtıkta maksimum elektrik alan şiddeti değerleri.

$2r/d$	ϵ_r					
	2	4	10	80	150	1000
0.05	119.76	132.89	142.24	148.34	148.76	149.18
0.10	119.75	132.88	142.23	148.32	148.75	149.16
0.15	119.73	132.84	142.18	148.27	148.69	149.10
0.20	119.68	132.74	142.05	148.10	148.52	148.94
0.25	119.57	132.54	141.77	147.78	148.20	148.60



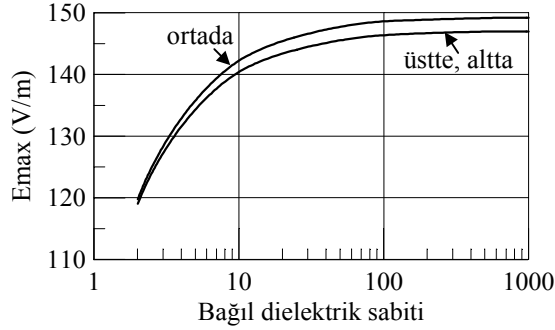
Şekil 4. Boşluğun yalıtkanın ortasında olması durumunda E_{max} - ϵ_r değişimi ($2r/d = 0,05$).

Ayrıca, küresel boşluğun yalıtkan malzemenin ortasında, alt elektroda yakın ve üst elektroda yakın olması durumları ayrı ayrı incelenmiştir. Sonuçlar Çizelge 2'de, değişimleri Şekil 5'te verilmiştir.

Çizelge 2: Küresel boşluğun konumuna bağlı olarak $2r/d = 0,2$ için elde edilen E_{max} değerleri.

Boşluk yeri	ϵ_r					
	2	4	10	80	150	1000
Ortada	119.75	132.88	142.23	148.39	148.75	149.17
Üstte	119.03	131.55	140.41	146.15	146.55	146.94
Altta	119.02	131.54	140.40	146.14	146.54	146.93

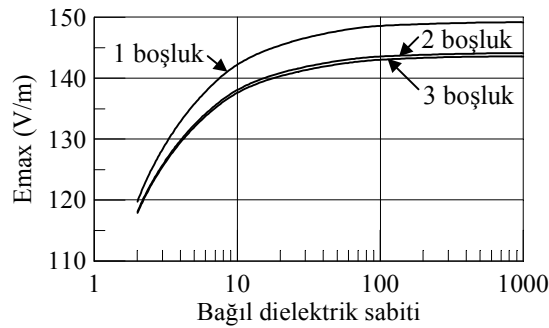
Bir diğer inceleme yalıtkan içindeki boşluk sayısı ile maksimum alan şiddeti arasında ilişkiyi görmek üzerine yapılmıştır. İçinde bir, iki ve üç adet boşluk bulunması durumları için E_{max} değerleri hesaplanmış, sonuçlar Çizelge 3'te, değişimler Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Boşluğun yalıtkan içindeki konumuna bağlı olarak E_{max} - ϵ_r değişimi.

Çizelge 3: Yalıtkan içinde değişik sayıda küresel boşluk bulunması durumunda, $2r/d = 0,1$ için elde edilen E_{max} değerleri

Boşluk sayısı	ϵ_r					
	2	4	10	80	150	1000
Bir	119.75	132.88	142.24	148.39	148.75	149.17
İki	118.07	129.80	138.05	143.36	143.73	144.09
Üç	117.86	129.45	137.59	142.83	143.20	143.55



Şekil 6. Yalıtkan içindeki küresel boşluk sayısına bağlı olarak E_{max} - ϵ_r değişimi.

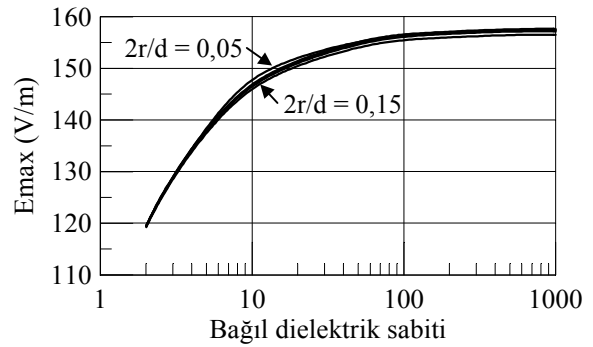
3 SİLİNDİRSEL BOŞLUKLU BİR YALITKANDA ELEKTRİK ALAN DAĞILIMI

Çok karşılaşılan bir diğer boşluk biçimi dairesel-silindirdir. Bu bölümde, ortasında silindrsel boşluk bulunan bir yalıtkan boşluk boyutlarına ve içinde bulunduğu yalıtkan malzemenin bağıl dielektrik sabitine bağlı olarak E_{max} değerleri hesaplanmıştır. Silindir yarıçapı r , yalıtkan kalınlığı d alınarak farklı $2r/d$ değerleri için elde edilen E_{max} değerleri Çizelge 4'te ve E_{max} - ϵ_r değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir.

Hesaplarda silindrsel boşlukların düşey durumda oldukları göz önüne alınmıştır.

Çizelge 4: Silindrsel boşluklu bir yalıtkan, farklı $2r/d$ oranları için boşluk içindeki E_{max} değerleri.

$2r/d$	ϵ_r					
	2	4	10	80	150	1000
0.05	119.52	134.45	146.86	156.20	156.90	157.59
0.1	119.47	134.36	147.74	156.05	156.75	157.44
0.15	119.44	134.29	146.65	155.95	156.65	157.33
0.2	119.38	134.18	146.49	155.75	156.45	157.13
0.25	119.19	133.82	145.97	155.10	155.78	156.46



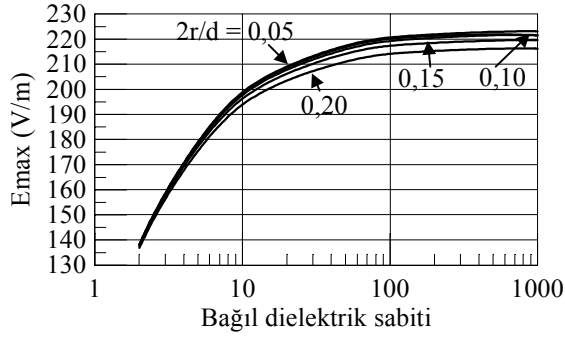
Şekil 7. Ortasında silindrsel bir boşluk bulunan bir yalıtkan, farklı $2r/d$ oranları için E_{max} - ϵ_r değişimi.

4 ELİPSOİT BOŞLUKLU BİR YALITKANDA ELEKTRİK ALAN DAĞILIMI

Bir diğer boşluk biçimi olarak elipsoit göz önüne alınmış ve elipsoit boşluğun yalıtkanın ortasında, yatay ve düşey konumda bulunması durumları için maksimum alan şiddeti hesapları yapılmıştır. Elde edilen sonuçların sayısal değerleri Çizelge 5 ve 6'de, grafik olarak değişimleri ise Şekil 8 ve 9'da gösterilmiştir.

Çizelge 5: Yatay elipsoit boşluklu bir yalıtkan, farklı $2r/d$ oranları için boşluk içindeki E_{max} değerleri.

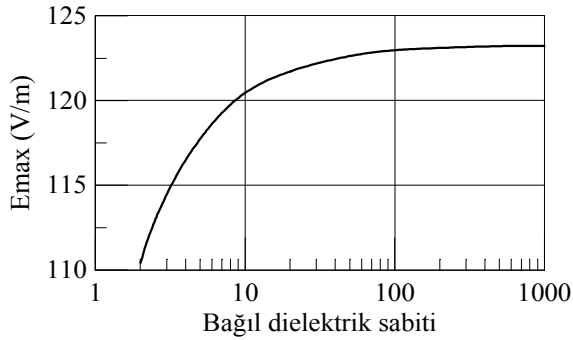
$2r/d$	ϵ_r					
	2	4	10	80	150	1000
0.05	138.13	170.66	198.75	219.86	221.43	222.98
0.1	138.02	170.42	198.36	219.33	220.89	222.42
0.15	137.85	170.03	197.72	218.47	220.01	221.53
0.2	137.45	169.13	196.26	216.53	218.04	219.51
0.25	136.79	167.64	193.87	213.34	214.78	216.19



Şekil 8. Yatay elipsoit boşluk içeren yalıtkanda, farklı $2r/d$ oranları için E_{max} - ϵ_r değişimi.

Çizelge 6: Düşey elipsoit boşluklu bir yalıtkanda farklı $2r/d$ oranları için boşluk içindeki E_{max} değerleri

$2r/d$	ϵ_r					
	2	4	10	80	150	1000
0.05	110.41	116.47	120.44	122.88	123.05	123.21
0.1	110.40	116.46	120.43	122.87	123.03	123.19
0.15	110.39	116.45	120.41	122.85	123.01	123.17
0.2	110.36	116.39	120.33	122.76	122.92	123.08
0.25	110.31	116.31	120.24	122.65	122.81	122.97



Şekil 9. Düşey elipsoit boşluk içeren yalıtkanda E_{max} - ϵ_r değişimi ($2r/d = 0,05$).

6 SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

İki elektrot arasında bulunan boşluklu bir yalıtkan içindeki elektriksel alan hesaplamalarında SEY kullanılmıştır. Hesaplamalarda elektrotların genişliği, iki elektrot arasındaki uzaklığa göre yeterince büyük seçilmiş ve böylelikle iki elektrot arasındaki alanın düzgün olması koşulları yaratılmıştır. Hesaplamalarda alan dağılımı incelenecek olan sistemin geometri olarak simetrik yapıda olduğu düşünülmüş ve bu simetriden yararlanarak üç boyutlu simetrik problem, iki boyutlu olarak incelenmiştir. Yüksek gerilim elektrodu 1 voltta ve alçak gerilim elektrodu toprak potansiyelinde tutulmuştur.

Şekil 4'te küresel boşluğun yalıtkanın ortasında olması durumunda, farklı küresel boşluk çapları için boşluk içindeki maksimum alan şiddetinin yalıtkan malzemenin bağıl dielektrik sabitine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir. Buradan görüleceği üzere, yalıtkan içindeki boşluk boyutu küçüldükçe ($2r/d$ oranı küçüldükçe) ve yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti büyüdükçe boşluk içerisindeki maksimum alan artmaktadır.

Şekil 5'te küresel boşluğun yalıtkanın ortasında, alt elektroda yakın ve üst elektroda yakın olması durumları ayrı ayrı incelenmiş boşluğun yalıtkanın ortasında bulunması durumunda en yüksek elektrik alan değeri elde edilmiştir. En düşük maksimum elektrik alanları ise boşluğun alt elektroda yakın konumda olması durumunda elde edilmiştir.

Şekil 6'da yalıtkan malzemenin simetri eksenini üzerinde değişik sayıda küresel boşluk bulunması durumu incelenmiş ve sonuçlardan görüleceği gibi yalıtkan içinde boşluk sayısı arttıkça boşluklardaki maksimum zorlanmalar azalmaktadır. Diğer hesaplamalarda olduğu gibi yalıtkan malzemenin dielektrik sabitinin artması maksimum elektrik alan şiddetinin artmasına sebep olmaktadır.

Şekil 7'de elektrik alan hesaplamaları silindrisel boşluk içeren yalıtkan malzeme için yapılmıştır ve boşluğun boyutu (yüksekliği ve çapı) küçüldükçe ve yalıtkanın dielektrik sabiti arttıkça boşluk içerisindeki maksimum alan şiddetinin arttığı görülmüştür.

Şekil 8'de yatay elipsoit ve Şekil 9'da ise düşey elipsoit şekilli boşluklar içeren yalıtkan içindeki maksimum alan değişimleri incelenmiş ve boşluğun boyutunun küçülmesinin ve yalıtkanın dielektrik sabitinin artmasının boşluk içerisindeki maksimum alan şiddetinin artmasına sebep olduğu görülmüştür.

Yukarıda belirtilen değişik şekilde boşluklar içeren yalıtkanlar üzerine yapılan elektriksel zorlanma incelemeleri sonucunda;

1. Boşluğun boyutu büyüdükçe ($2r/d$ oranı arttığında) boşluk içindeki maksimum alan şiddeti azalmaktadır. Tersine boşluk boyutu küçüldükçe boşluk içindeki E_{max} artmaktadır. Bu durum, boşluğun kolayca delinebileceğini, kapasitesinin küçük olacağını buna bağlı olarak ta ortaya küçük genlikli boşalma yükü çıkaracağını göstermektedir. Bu açıdan boşluk boyutlarının kritik olduğu, belli bir boyuttan küçük boşlukların önemsiz olduğu söylenebilir.
2. Büyük dielektrik sabitli yalıtkanlarda boşluk içindeki zorlanma büyüktür. Yalıtkanın dielektrik sabiti, boşluğun dielektrik sabitine yaklaştıkça boşluk içindeki E_{max} azalmaktadır.

3. Yalıtkan malzemenin simetri ekseninde bulunan boşluk sayısı arttıkça boşluk başına düşen maksimum zorlanma azalmaktadır.
4. Ortadaki boşluklar diğer yerlerdeki boşluklardan daha fazla zorlanmaktadır. Boşluğun elektrotlara yakın olduğu durumlarda, boşluğa düşen zorlanma ortada olmasından küçük olarak elde edilmiştir.
5. Silindirsel boşluklar, küresel ve elipsoit biçimli boşluklara göre aynı koşullarda biraz daha fazla zorlanmaktadır. Bu durum tabakalı yalıtkanlarda tabakalardan birinden delik olmasının, delik silindirsel boşluğa benzediği için yalıtıkanda kısmi boşalma için kolaylık sağlayacağını göstermektedir.
6. Düşey elipsoit boşluklar, yatay elipsoit boşluklara göre daha az zorlanmaktadır. Boşluk yönü ve boyutu zorlanma bakımından önemlidir.

Sonuç olarak, yalıtkan içindeki boşluklar elektriksel kısmi boşalmaların yuvasıdır. Kısmi boşalmalar, yalıtkanların ısınmasına, enerji kaybına, elektromanyetik girişimlere, yalıtkanların eskimesine, yaşlanmasına, delinmesine neden olabilirler. Aygıt ve sistem güvenliğini dolayısıyla kalitesini ve verimini etkileyen bu olay için duyarlı olunmalı, tasarım, üretim ve işletme sırasında gerekli önlemler alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Ghourab, M. E. ve El-Makkawy, S. M., "Analysis of electric field distribution in cavities within solid dielectric materials", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 23-26 Oct. 1994, pp.155 – 160.
- [2] Seung-Ik Jeon, Doe-Sung Shin, Do-Hong Yun, Key-Man Han, Min-Koo Han, "A study on the partial discharge characteristics according to the distribution pattern of voids within an insulation" ICSD'95 5th IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 10-13 July 1995, pp. 398 – 402.
- [3] Kalenderli, Ö., Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notu, İTÜ, İstanbul, 1996.
- [4] Kageyama S., M. Ono, S. Chabata, "Microvoids in crosslinked polyethylene insulated cables", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94 (4), 1975, pp. 1258-1263.
- [5] Melton C. W., D. Mangaraj M. M. Epstein, "Morphology of thermoplastic and cross-linked polyethylene cable insulation", Annual Report CEIDP, 1981, pp. 291-305.
- [6] Kalicki T., Densley J. R., "Partial discharge characteristics of voids in extruded insulation - theoretical studies", High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999, pp. 200-2003.
- [7] Meeker, D., FEMM 4.0 Finite Element Method Magnetism Software, 2004.