

# KİSMİ BOŞALMALARIN DARBELİ X IŞINI UYGULANARAK ÖLÇÜLMESİ

Suna BOLAT, Sedat ADİLİ, Christian FRANCK

Eidgenössische Technische Hochschule (İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü)

Zürich - İsviçre

bolat@eeh.ee.ethz.ch, adilis@eeh.ee.ethz.ch, franck@eeh.ee.ethz.ch

## ÖZET

*Yüksek gerilim araçlarının en önemli kısmı elektriksel yalıttır. Yalıtım malzemelerinin üretimi sırasında, malzemede çeşitli bozukluklar oluşması kaçınılmazdır. Hava boşluğu, gaz kabarcığı gibi bozukluklar, yalıttımda kısmi boşalma meydana gelmesine sebep olmaktadır. Yalıtım sistemlerinin, uzun süreli zorlanması durumunda yalıttımda oluşabilecek kısmi boşalmalar, zamanla yüksek gerilim araçlarında yıkıcı etkilere neden olabilir. Kondansatör, izolatör, güç kablosu, transformatör ve diğer elektrik makinaları gibi elemanların etkin ve uzun ömürlü çalışabilmeleri için, kısmi boşalmaların en aza indirilmesi ya da etkin bir şekilde tanımlanabilmesi gerekir. Bu nedenlerle, kısmi boşalma olayının anlaşılması ve ölçülmesi, yalıtım bozukluklarının tanınması, risk değerlendirmesi, yalıttının nitelik ve niceliği hakkında bilgi edinme gibi konular için önemlidir. Bu çalışmada, bir epoksi reçine yalıtım içindeki, küresel hava kabarcıklarında oluşan kısmi boşalmanın ölçülmesi açıklanmıştır.*

## 1.GİRİŞ

Bir yalıtım sisteminde, elektrotlar arasında tamamen köprülemeyen boşalmalara kısmi boşalma denir [1]. Kısmi boşalmaların oluşmasının en büyük nedeni, yalıtım içinde üretim sırasında meydana gelen, hava boşluğu, gaz kabarcığı gibi bozukluklardır. Kısmi boşalmaların olduğu yere ve çevreye zarar verici etkileri çok büyük değildir, sistemin çalışmasını aksatmaz, bununla birlikte kısmi boşalmalar zamanla bozulmalara, malzemenin zamanından önce yaşlanmasına ve delinmesine neden olabilir. Bu nedenle özellikle uzun süre gerilim altında zorlanan yüksek gerilim araçlarında kısmi boşalmaların ölçülmesi ve belli bir değerin üstünde boşalmaya neden olan yalıtkanların kullanılmaması gerekir.

Etkin ve uzun ömürlü yalıtım sistemlerinin tasarlanması için, kullanılan yalıtkan malzeme içinde var olan bozukluklar, kullanıma sunulmadan önce belirlenmelidir. Kısmi boşalma ölçümü, yalıttımda bulunan bozuklukların belirlenmesinde etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Bu

çalışmada deney cisminde darbeli x ışınları uygulanarak boşalma tetiklenmiş ve ölçüm sonuçları özetlenmiştir.

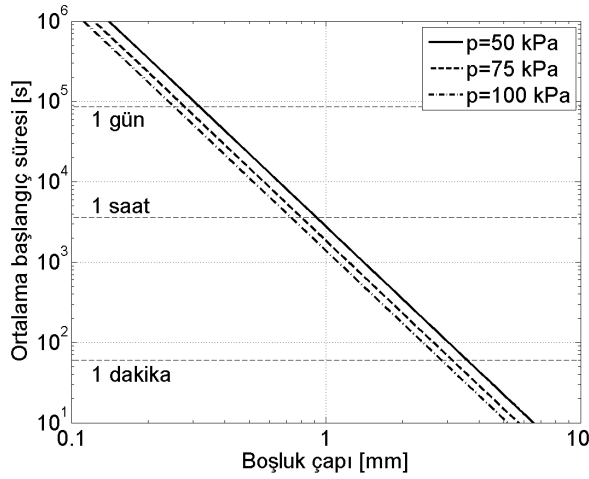
## 2. KİSMİ BOŞALMA OLUŞUMU

Katı yalıtkanlardaki boşluklarda boşalma oluşması için boşluktaki elektrik alan şiddetinin yalıtkanın delinme dayanımından büyük olması ve kısmi boşalmayı başlatacak başlangıç elektronunun bulunması gerekmektedir.

Geleneksel kısmi boşalma ölçme yöntemlerinde, kısmi boşalmayı başlatabilmek için, yalıtım sistemine aşırı gerilim uygulanır. Yalıtkanı bu şekilde aşırı gerilimlerle zorlamak, katı yalıtıkanda ağaçlanma, tam delinme gibi geri dönüşü olmayan zararlara neden olabilir. Bundan başka, uygulanan gerilimin şiddeti yüksek bile olsa, başlangıç elektronunun var olmadığı durumlarda kısmi boşalma deney sırasında oluşmayabilir ya da başlaması çok uzun sürebilir.

Başlangıç elektronu sıklıkla doğal ışıma yoluyla sağlanır. İyonlaşma hızı, boşluktaki molekül sayısına, dolayısıyla boşluğun boyutlarına bağlıdır. Yalıtındaki boşluğun boyutuna göre boşalmanın başlaması için geçen zaman değişebilir. Buna istatistiksel gecikme süresi adı verilir.

Şekil 1’de katı yalıtkan içindeki küresel boşluklarda oluşan kısmi boşalma için teorik istatistiksel gecikme süresi gösterilmiştir. Şekil 1’den de görüldüğü gibi, 1 mm çaplı boşluklarda gecikme süresi saatler mertebesindeyken, 250  $\mu$ m çaplı küçük boşluklarda günler mertebesine ulaşabilir [2].



Şekil 1: Boşluk çapına bağlı olarak istatistiksel gecikme süresi.

Yalıtkana aşırı gerilim uygulamasından kaynaklanan zorlanmalardan kaçınmak ve uzun gecikme sürelerini aşmak için başlangıç elektronunu sağlamakta yapay iyonlaşma yöntemleri denenmiştir. Radyoaktif ışıma veya x ışını uygulaması gibi denemelerde, daha düşük şiddetli gerilim uygulanmasıyla daha kısa sürede kısmi boşalma oluştuğu gözlenmiştir.

Katı yalıtkanlardaki boşluk içinde kısmi boşalmanın tetiklenmesi amacıyla x ışınları uygulanarak çok çeşitli çalışmalar yapılmıştır [3-6]. X ışını tetiklemeli kısmi boşalma ölçümleriyle ilgili yapılan

çalışmaların bazı noktalarda birbiriyle çeliştiği söylenebilir.

Bu amaçla yapılan ilk çalışmalarda, x ışını örnek üzerine sürekli olarak uygulanmıştır [3]. Kısmi boşalmanın tetiklenmesi için x ışını uygulanması durumunda, kısmi boşalmanın teorik kısmi boşalmabaşlama gerilimindendüşükdeğerlerde tetiklendiği ve istatistiksel gecikme süresinin büyük oranda azaldığı gözlenmiştir. Buna benzer başka çalışmalarda, kısmi boşalma genliğinin x ışını uygulanması ile azaldığı ve katı yalıtkan içindeki bozuklukların varlığını belirlenmekte kullanılabileceği açıklanmıştır [4].

X ışınlarının ölçme sonuçları üzerindeki etkisinin azaltılması için, son yıllarda darbeli x ışınları kullanılmaktadır [6-7]. Bu çalışmalarda, küçük çaplı boşlukların bile çok büyük gecikme süreleri olmadan, beklenen teorik boşalma başlama gerilimi değerlerine yakın değerlerde belirlenebildiği gözlenmiştir. Darbeli x ışını deneylerinde, x ışını kısmi boşalmayı başlatmak için uygulanır ve ölçme sırasında uygulanmamaktadır [7]. Böylece ölçülen büyüklüklerin x ışınından etkilenmemesi sağlanmaya çalışılmaktadır.

Bu çalışmada, katı yalıtkanlarda darbeli x ışını uygulanarak tetiklenen kısmi boşalmaların ölçülmesi özetlenmiştir.

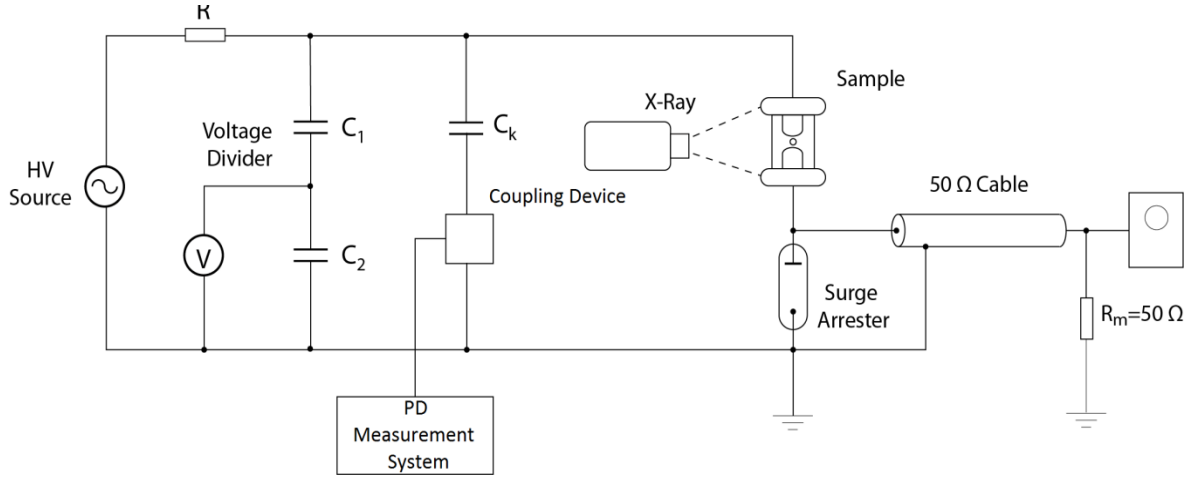
### 3. DENEY DÜZENİ

Çalışmada kullanılması düşünülen ölçme sisteminin bağlantı şeması Şekil 2’de gösterilmiştir. Ölçme sistemi, kısmi boşalmaların oluşturduğu akım darbelerini ölçü empedansı yardımıyla bir ölçü aleti üzerinden okuma temeline dayanır. Deney sırasında oluşabilecek istenmeyen bir boşalmanın akımını sınırlamak için, yüksek gerilim deney transformatörü bir ön direnç üzerinden kuplaj kondansatörüne ve deney cismine bağlanır. Ölçme devresini bir delinme durumunda korumak için deney

cismine parafudr bağlanmıştır. Empedans uyumsuzluğu oluşturmamak için ağırlantıların empedansları  $50 \Omega$  seçilmiştir. Bu aşamada yapılan çalışmalarda, kaçak endüktansı veya dönüş yolu endüktansını küçültmek için özel bir çaba harcanmamıştır [8].

Deneylerde çubuk-çubuk elektrot sistemi arasına, yalnızca bir tane küresel hava boşluğu bulunan epoksi reçine bloklar

yerleştirilmiş ve bütün geometri tekrar epoksi reçine içine gömülerek çeşitli deney cismi örnekleri hazırlanmıştır [7]. Kullanılan epoksi reçine, örnekler görsel olarak sınıflandırılması ve elektrotlar arasında yalnızca bir boşluk olduğundan emin olunabilmesi için renksiz olarak hazırlanmıştır.



Şekil 2: Kısmi boşalma ölçümlerinde kullanılan deney düzeni.

Hazırlanan örnekler, gerilim altındayken bir x ışını darbesi uygulanarak boşalma tetiklenmeye çalışılmıştır. Uygulanan gerilim her adımda 1 kV arttırılarak 1 dakika beklenmiş ve kısmi boşalma gözlenene veya 30 kV'a ulaşana kadar bu işleme devam edilmiştir. Çok küçük çaplı boşluklara sahip örneklerde kısmi boşalma gözlenmemiştir.

Kısmi boşalma verileri iki farklı düzenekle kaydedilmiştir. Kısmi boşalma ölçme sistemi adı verilen klasik düzenekte faz örüntüleri kaydedilmiştir. Uygulanan gerilimin boşalma oluştuğu andaki faz açısı, boşalma darbelerinin şiddeti ve tekrarlama sıklığı kaydedilerek, deney gerilim üzerine bindirilir. Böylece oluşan örüntü, boşalmayla ilgili çeşitli bilgiler verir. Burada boşalma darbesi şiddeti ile ifade edilen büyüklük, kısmi boşalma darbelerinin, elektrotlar arasında meydana getirdiği yük

geçişidir ve ölçülen akım değerinin integrali alınarak elde edilir.

Buna ek olarak, denenen örneğin toprak dönüş yolu  $50 \Omega$  ölçme direnciyle osiloskopa doğrudan bağlanmış, ayrık boşalma darbelerinin dalga şekilleri de ölçülmüştür. Kısmi boşalma verileri saniyede 5 MS örnekleme yapabilen, bant genişliği 1 GHz olan LeCroy marka bir osiloskop ile kaydedilmiştir. Bu şekilde boşalma akım darbelerinin zamana göre değişimi elde edilmiştir.

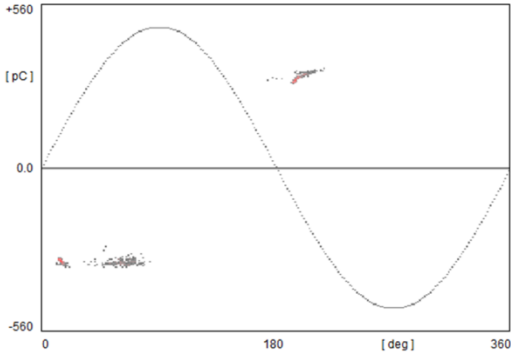
#### 4. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada kaydedilen boşalma faz örüntüleri, deneyde kullanılan örneklerin geçerliliğini göstermek için kullanılmıştır. Teorik olarak hesaplanan minimum boşalma başlama gerilimi ve alan şiddeti büyüklükleri ölçülen değerlerle karşılaştırılmış ve uyumlu

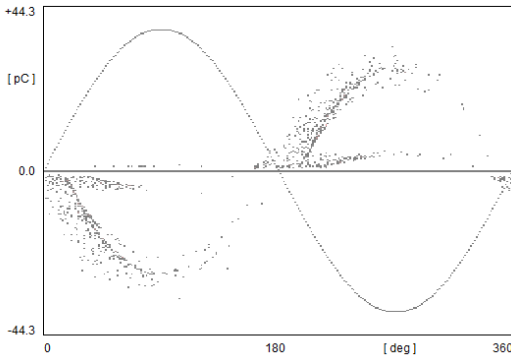
bulunan örneklerin dalga şekilleri ve zaman karakteristikleri değerlendirilmiştir.

Boşluk çapının büyük olduğu örneklerde ölçülen değerler ve teorik olarak hesaplanan büyüklükler uyum içindeyken, boşluk çapının 0,5 mm'den küçük olduğu örneklerde ölçülen değerler teorik değerlere göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle boşluk çapının küçük olduğu örnekler güvenilir bulunmamıştır.

Şekil 3'te farklı boyutlarda boşluklu örnekler için faz açısı-görünen yük dağılımı örüntüleri görülmektedir.



(a) 1 mm çaplı boşluk

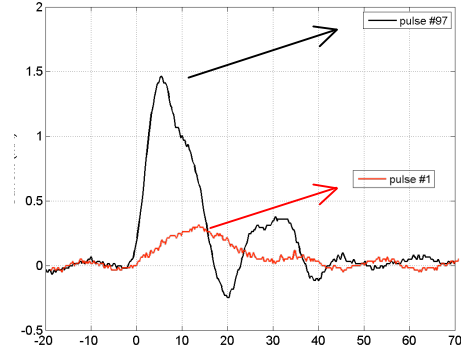


(b) 0,5 mm çaplı boşluk

Şekil 3: Farklı çaplarda boşluklara sahip örneklerde görülen faz açısı-yük dağılımı.

Uygun bulunan örneklerin akım darbelerinin dalga şekilleri incelendiğinde, birbirinden farklı iki karakteristik ortaya çıkmaktadır. Akım darbesinin bu farklı iki dalga şekli, genelde küçük çaplarda boşluklara sahip örnekler için daha ayırt edici olarak gözlenmiştir. Bu dalga şekillerinden

birincisinin genliği daha büyük ve yükselme zamanı daha küçüktür, ikincisi ise daha küçük şiddetli ve daha yavaş gelişen bir boşalmadır. Şekil 4'te darbe şekilleri için tipik birer örnek verilmiştir.

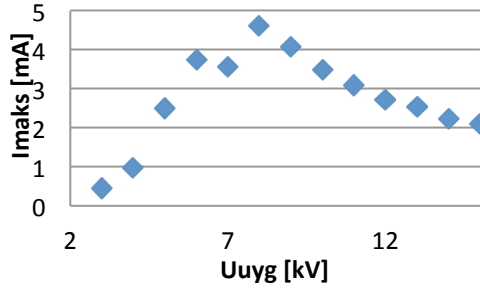


Şekil 4: 7 kV gerilim altında 0,5 mm çaplı boşlukta oluşan darbe şekilleri.

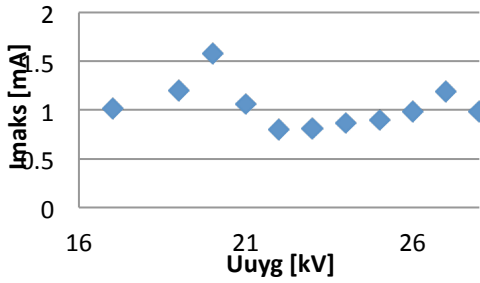
Küçük ve büyük çaplı boşluklarda oluşan boşalmalar karşılaştırıldığında, büyük boşluklarda gecikme süresinin daha az olduğu, boşalma sıklığının yüksek olduğu ve boşalma darbesi şiddetlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir. Küçük boşluklarda ise, boşalma oluşana kadar geçen süre daha uzundur, hızlı ve yavaş gelişen olmak üzere iki farklı dalga şekline sahip boşalmaların olduğu gözlenmiştir. Boşluk çapı büyüdükçe, oluşan boşalmanın şiddeti de büyümektedir.

Doğal ışıma ile tetiklenen kısmi boşalma ölçümleriyle x ışını uygulanarak tetiklenen kısmi boşalma ölçümleri karşılaştırıldığında, faz örüntülerinde ve dalga şekillerinde bir farklılık gözlenmemiştir.

Uygulanan gerilimin artırılmasıyla, kısmi boşalma darbesi şiddeti beklenen boşalma başlama gerilim değerine kadar artmış ancak bu noktadan sonra düşmeye başlamıştır (Şekil 5). Gerilim arttırılmaya devam ettikçe, darbe şiddetinde yeniden bir artış gözlenmiştir.



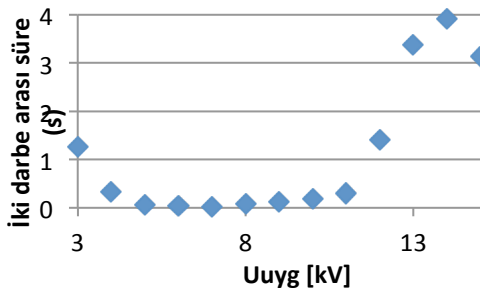
(a) 0,95 mm çaplı boşluk



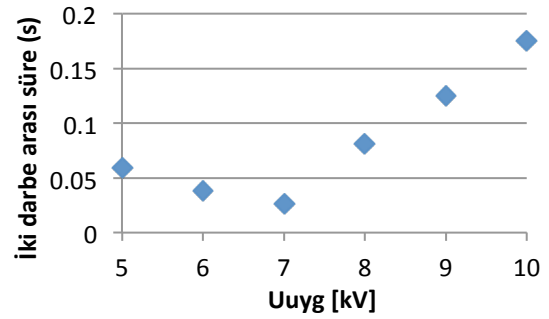
(b) 0,75 mm çaplı boşluk

Şekil 5: Farklı boyutlarda boşluklara sahip örnekler için, boşalma şiddetinin uygulanan gerilime göre değişimi.

Uygulanan gerilimin artırılmasının boşalma sıklığı üzerinde de etkisi vardır. Uygulanan gerilim kararlı boşalma başlama gerilimini aştıktan sonra, birbirini takip eden boşalma darbeleri arasındaki süre uzamıştır. Şekil 6'da 0,95 mm çaplı boşluğa sahip örnek için, gerilimin artmasıyla boşalma sıklığı arasındaki ilişki görülmektedir.



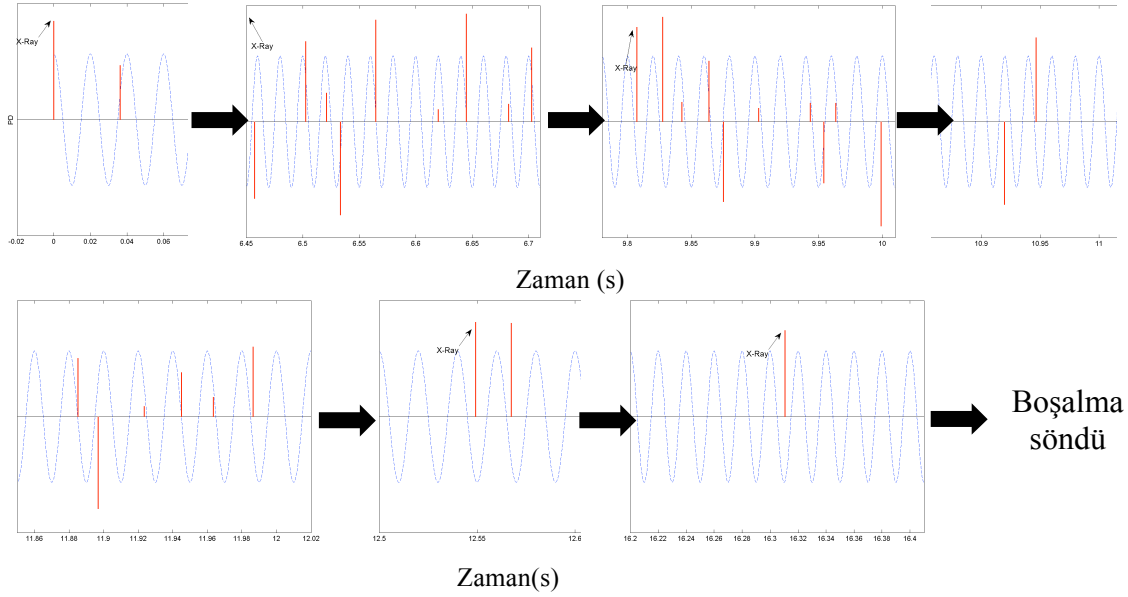
Şekil 6: Boşalma sıklığının uygulanan gerilime göre değişimi.



Şekil 7: Boşalma sıklığının uygulanan gerilime göre değişimi (ayrıntı).

X ışını uygulanması sonucu boşluklarda kısmi boşalma, beklenen boşalma başlama değerinden önce tetiklenebilir. Literatürde, sürekli x ışını uygulanması sonucu gözlenen kısmi boşalmanın başladığı gerilim değeri, boşalma başlama gerilimi olarak kaydedilmiştir. Ancak x ışını uygulaması kesildiği anda boşalmanın söndüğü gözlenmiştir. Bu gerilim değeri, boşalma başlama gerilimi olarak değerlendirilmemelidir. Çünkü x ışını darbe şeklinde uygulandığında, beklenen başlama gerilimi şiddetinin altındaki gerilim değerlerinde ancak birkaç darbenin oluştuğu, sonrasında boşalmanın söndüğü gözlenmiştir. Boşalmanın kararlı bir şekilde gerçekleştiği gerilim değeri, boşalma başlama gerilimi olarak yorumlanabilir.

Şekil 8'de, 0,45 mm çaplı boşluğa sahip örnek için, beklenen boşalma başlama geriliminden düşük değerde (8 kV), x ışını darbeleriyle tetiklenen boşalmanın gelişimi görülmektedir. Bir noktadan sonra x ışını uygulanması durumunda bile yeni bir boşalma başlamamıştır.



Şekil 8: Darbeli x ışını uygulaması durumunda kısmi boşalma gelişimi ( $\varnothing = 0,45$  mm)

## 5. SONUÇLAR

1940lardan beri kısmi boşalmaların yalıtım sistemlerine olan zararlı etkileri bilinmekte ve incelenmektedir. Kısmi boşalmanın belirlenmesi ve boşalma olayının açıklanması, yalnızca akademik bir ilgi değil aynı zamanda güç sistemlerinin etkin ve uzun ömürlü tasarlanabilmesi için önemli bir olgudur. Bu çalışmada, içinde küresel bir hava boşluğu bulunan katı yalıtkanlarda, x ışını darbeleriyle tetiklenen kısmi boşalmaların ölçülmesi özetlenmiştir.

Yapılan deneylerde, x ışını darbelerinin ve uygulanan gerilimin kutbiyetinin, boşalma darbelerinin dalga şeklinde bir değişikliğe neden olmadığı gözlenmiştir. Boşluk çapının büyük olduğu örneklerde, gecikme süresi olmadan, beklenen boşalma başlama gerilim şiddetine çok yakın değerlerde kısmi boşalma oluşmuştur. Boşluk çapının 0,5 mm'den küçük olduğu örneklerde gecikme süresinin uzun olduğu, bazı örneklerde boşalmanın başlamadığı gözlenmiştir. Bu nedenle boşluk çapının küçük olduğu örnekler için sonuçların çok güvenilir olmadığına karar verilmiştir.

Uygulanan gerilim şiddetinin artırılması, kısmi boşalma gelişimini bastırabilir. Çok fazla x ışını darbesi uygulanması da kısmi boşalma gelişimini engelleyebilir. Ölçme devresinin dalga şekilleri üzerinde etkisi büyüktür. Dönüş devresinin endüktif etkisinden kaynaklanan büyük salınımlar kaydedilen dalga şekillerinden elde edilen bilgileri ciddi ölçüde kısıtlamaktadır. Bu nedenle ölçü devresinde geliştirmeler yapmak gerekmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", Butterworths, London, 1989.
- [2] F. Gutfleisch, L. Niemeyer, "Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids", IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Ins. Vol.2, No.5, pp. 729-743, 1995.
- [3] G. Mole, "Location of Discharging Cavity in 33 kV Metal Clad. Busbar by the Use of x-rays", Proc. IEE Vol.114, No.10, 1558, 1967.
- [4] N. Fujimoto, S. Rizetto, J.M. Braun, "Partial discharge. XV. Improved PD testing of solid dielectric using X-ray induced discharge-initiation", IEEE Electr. Insul. Mag. Vol.8, No.6, pp.33-41, 1992.
- [5] V. Swinka Filho, R. Robert, "Imaging of voids in dielectric materials by x-ray induced partial

discharge", Review of Scientific Instruments Vol.**73**, No.3, pp. 128, 2002.

[6] H. Fuhrmann, U. Riechert, A. Tröger. Cigré Session, paper D1.206 (2010).

[7] S. Adili, C. M. Franck, H. Fuhrmann, "Pulsed X-Ray induced partial discharge measurements", XVIII Int. Conf. on Gas Discharges and Their App., Germany, 5-10 Sept, 2010.

[8] C.M. Franck, S. Adili, S. Bolat, H. Fuhrmann, "Pulsed X-Ray Induced Partial Discharge Measurements", High Volt Colloquium, Dresden, 19 - 20 May 2011.