

# Zamanla hızlı değişen gerilimlerde boşalma olaylarının incelenmesi

Aysam AKSES\*, Özcan KALENDERLİ

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

## Özet

Nanosaniyelik darbeler, EMP (ElektroManyetik Darbe) yoluyla oluşabilir. EMP uzayda doğal yolla meydana gelebileceği gibi yapay yolla da oluşturulabilir. Yüksek irtifada meydana gelen bir EMP, çok geniş alanları etkisi altında bırakabilir. EMP'nin en önemli bozucu etkisi, elektronik sistemlerin ve cihazların iletkenlerine girişimde bulunarak bunların içine ulaşması ve sistem veya aygıtların bozulmasına ya da yanlış çalışmasına neden olmasıdır. EMP benzeri darbe gerilimleri genel olarak nanosaniye süreli darbelerdir. Cihazların böyle darbeler karşısındaki davranışlarını incelemek için yapay EMP üreteçleri kullanılır. Bu üreteçler EMP'nin oluşturduğu elektrik ve manyetik alanları üretirler. Bu çalışma kapsamında EMP benzeri nanosaniyelik darbelerin aygıtların iletkenlerine ve elektronik kartlarına ulaşmaları durumunda meydana gelebilecek olaylar değerlendirilmiştir. Bu amaçla, yaklaşık 50 nanosaniyede tepe değerine ulaşan ve toplamda yaklaşık 1000 nanosaniye süren 10 kV'a kadar darbe gerilimi üreten bir üreteç tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Üreteç tek katlı Marx devresi ilkesi ile çalışmaktadır. Elektronik aygıtların devre kartlarını benzetmek için elektronik devrelerde sıkça karşılaşılan yedi farklı geometride akım yolu FR-4 malzemeden yapılmış devre kartına hazırlanmıştır. Darbe gerilimi üreticiden elde edilen gerilimlerle akım yolları arasındaki boşalma olayları incelenmiştir. Numune akım yollarında geometriye bağlı olarak boşalma noktaları belirlenmiş, uygulanan gerilimler ile elektrotların yüzde elli atlama eğrileri çıkarılmıştır. Yapılan deneysel çalışma, teorik hesaplamalar ile desteklenmiştir. Bunun için sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar analizi yapılmıştır. Bu çalışma ile nanosaniyelik darbe gerilimine maruz kalan elektronik kartlarda geometriye bağlı olarak etkilenme üzerine yorum yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** EMP, hızlı geçici darbe gerilimi, yüzeysel boşalma, akım yolları.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Aysam AKSES. aysam@uekae.tubitak.gov.tr; Tel: (262) 648 12 16.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Programında tamamlanmış olan "Zamanla hızlı değişen gerilimlerde boşalma olaylarının incelenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 27.12.2006 tarihinde dergiye ulaştırılmış, 22.01.2007 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 01.02.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## Investigation of the flashover process under fast transient voltages

### Extended abstract

Improvements in technology had widened the use of electricity. The process beginning with direct current continued with alternative current. Wide usage had brought different requirements with. The natural effect of lightning and the disturbance effect of switching in electrical installation necessitated research on this subject. It's necessary to have an idea on the behavior of electrical systems facing such an effect, before they are put into operation. This necessity had triggered generation of pulse voltages in laboratories. Pulse voltages generated gave the chance of performing tests on systems and components forming systems. In the course of time, pulse voltages have been generated not only for experimental objective, and also directly for industrial, medical, military etc. objectives. The microsecond and millisecond pulses reduced to nanosecond even picosecond pulses with the development in technology.

Nanosecond pulses may be formed by EMP (ElectroMagnetic Pulse). EMP can be originated naturally in space; beside it can be formed artificially. A high altitude EMP can effect a wide area on earth. The most important disturbance effect of EMP is coupling to the conductors of electronic systems and equipments, entering the device and causing a breakdown or malfunction. EMP like pulses are usually nanosecond pulses. To examine the behavior of devices facing such a pulse, artificial EMP simulators are used. These simulators generate the electric and magnetic fields simulating EMP.

In this study, the possible events that may take place when the EMP like nanosecond pulses reaches to the conductors and circuits of electronic devices are evaluated. In this study it is intended to perform conducted EMP tests directly on to the conductors. For this aim, a pulse generator with an output up to 10 kV peak value, generating a pulse with a risetime of about 50 ns and total duration of about 1000 ns is designed and constructed. The realized generator operates according to principle of a single stage Marx circuit. Accurate and reliable measurement of the fast voltage pulse is an important point to be considered. Different ways of measurement of the high voltage pulse is experimented. An oscilloscope with capability of sampling 4 GSa/s is used to scope

the pulse generated. The high speed and the other technical benefits of the oscilloscope brought many advantages with.

For simulating the circuit of electronic device, widely used seven different geometrical current ways are prepared on to the board made of Fr4. Fr4 is a fire rated electrical-grade, dielectric fiberglass laminate epoxy resin system combined with a glass fabric substrate. Series of pulses of different voltage level is applied by the generator on the sample board, and the flashovers between current ways are observed. Number of flashover occurred over the applied pulses is noted as a table. Data on this table versus the voltage applied is used to draw graphics, which can be evaluated as the fifty percent discharge curves of the electrodes. Another work performed on the sample board is the determination of the flashover points for different geometries. Arc points of the electrodes were observed visually during the tests; besides, the electrodes were investigated by an electron microscope.

The experimental work performed is tried to be supported with theoretical analysis. For this aim, electrical field intensity and field distribution of the electrodes under the voltage applied is numerically analyzed. Analysis is performed on computer using FEMM program based on finite elements method. The expected point of flashover is the point where the maximum electrical field observed. Both the experimental study and the computer analysis gave the similar results. Current way electrodes set straight parallel has lower fifty percent discharge level when compared with parallel electrodes having angles or arcs. Among the seven different geometries, electrodes having 135° mutually has the minimum fifty percent discharge voltage level. On parallel electrodes, flashover takes place on the edges however electrodes with arcs or angular in shape flashes at these angle points.

The electromagnetic interference radiated from the test setup is determined. For this aim, the emission of the system is measured by biconical antennas during the test for all seven geometrical current ways. One step further, the current induced by the emission coupled to a power cord 1 m away from the setup is measured and evaluated.

**Keywords:** EMP, fast transient pulse voltage, surface flashover, current ways.

## **Giriş**

Çeşitli uygulama, araştırma ve geliştirme çalışmalarında kullanılan güç ve gerilim düzeyinin yükselmesi, yüksek darbe gerilimi tekniğini üzerinde en çok çalışılan konulardan biri haline getirmiştir (Akses, 2001). Füzyon, yüksek güçlü parçacık demeti, lazerler ve benzeri konular, gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Bu teknik, temel olarak 1960'larda İngiltere ve eski SSCB tarafından tetiklenmiş, daha sonra ABD ve teknoloji olarak ileri diğer devletler tarafından geliştirilmiştir. Darbe gerilimi uygulamaları genel olarak askeri amaçlar doğrultusunda gelişme göstermiştir. Yakın geçmişte, özellikle soğuk savaş döneminin sona ermesinden sonra, bu teknoloji endüstriyel amaçlara da yönelmiş, enerji, uzay, çevre, elektronik ve malzeme bilimlerinde uygulama alanı bulmuştur (Akiyama, 1995).

Darbe gerilimi uygulamalarının bir amacı, doğrudan endüstriyel veya askeri uygulama olabileceği gibi bir amacı da bu uygulamalara karşı deneysel çalışmalardır. Günümüz teknolojilerinde savaş sistemleri insandan çok insanlara kullanım kolaylığı sağlayan sistemleri hedef almaktadır. Yapay yollarla üretilen elektromanyetik darbe (EMP) veya yönlendirilmiş yüksek güçlü mikrodalga, hedef aldığı elektronik sisteme zarar vererek haberleşme, enerji üretimi ve iletimi, ulaşım veya elektronik sisteme sahip askeri silahları kullanılmaz duruma getirebilir. EMP yıldırım düşmesi sonucu doğal yolla da oluşabilir. Elektriksel ve elektronik sistemlerin yaygın kullanımı ve bu sistemlere olan yüksek bağlılık, olumsuz bir durumla karşılaşmamak için bu sistemlerin korunmasını zorunlu kılmıştır. Bu nedenle sistemlerin, kullanıma sunulmadan önce, karşılaşılabilecekleri zamanla hızlı değişen geçici işaretler karşısındaki davranışları yapılan deneylerle değerlendirilir (Akses, 2001, Akses vd., 2002). Bu deneylerde, elektromanyetik alan yapay olarak oluşturulup denenecek sisteme uygulanabileceği gibi, oluşan alanın sistemde endükleyeceği akım ve gerilimler doğrudan sisteme uygulanabilir.

Darbe gerilimleri üzerine yapılan çalışmalar farklı yönlerde doğru hız kazanarak yayılmıştır.

Bu çalışma yapılırken gerçekleştirilen literatür taramasında (Grekhov vd., 2005, Verma vd., 2004a, Gundersenk vd., 2004, Rim vd., 2001), üretilen darbelerin cephe sürelerinin nanosaniye ve bazı uygulamalar için pikosaniye mertebelerine düştüğünü göstermektedir. Bu derece hızlı darbeler özellikle optik uygulamalarda, uzay teknolojilerinde ve tıbbi amaçlar için üretilmektedir. Mikrodalga kullanımının artması, hızlı darbe gerilimleri üretme çalışmalarının bu amaçla yönelmesini de sağlamıştır. İncelenen çalışmaların büyük bölümü lazer için gereken darbeleri üretmektedir. Bu amaçla nanosaniyelik ve pikosaniyelik darbeler üretilmektedir. Optik uygulamalarında darbenin etki süresi kadar tekrarlanma frekansı da önemlidir. İncelenen güncel çalışmalar (Grekhov vd., 2005, Efanov ve Korenev, 2004, Verma vd., 2004b), üretilen darbelerin tekrarlanma hızını arttırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, kullanılan devre elemanları çeşitlilik göstermektedir. Hızlı anahtarlama ihtiyacı yarılletken anahtarların, özellikle MOSFET'lerin kullanımını arttırmıştır. İncelenen çalışmalarda görünen durum, MHz mertebelerinde tekrarlanabilen darbe üretimine ulaşıldığıdır.

Bu çalışmaya konu olan darbeler, elektromanyetik etki ile oluşması beklenen darbelerdir. Bu darbeler mikrosaniye ve nanosaniye mertebelerindedir. Elektromanyetik etki ile oluşan hızlı darbelerde tekrarlanma frekansı, optik uygulamalardaki gibi ön plana çıkmamaktadır. Literatürde bu amaçla üretilen hızlı darbeler, genel olarak anten kullanılarak elektrik alan şekline dönüştürülmekte ve EMP üreteçlerinde kullanılmaktadır (Martin, 1992).

Hızlı darbe gerilimi üretiminde en yaygın kullanılan üreteçler, kablo üreteçleri, LC devreleri ve Marx üreteçidir. Bazı uygulamalarda birden fazla yöntem bir arada kullanılabilir. Bu üreteçlerin bazıları, bu çalışmada yapımı gerçekleştirilerek denenmiş ve uygulama amacına en uygun olan üretece karar verilmiştir.

Üretilen darbe gerilimlerinin doğru ve duyarlı ölçülmesi başka bir önemli konudur. Teknolojik ilerleme, ölçü aletlerinin ölçme duyarlılığını ol-

dukça geliştirmiştir. Güncel dönemde yapılan çalışmalarda ölçme duyarlılığına verilen önem ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada da amaca uygun, duyarlı ölçme sistemi kurulmuş, üretilen hızlı darbe gerilimlerini görüntülemeye 4 GSa/s örnekleme hızına sahip osiloskop kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, elektronik sistemlerin karşılaşılabilecekleri hızlı değişen geçici gerilimler karşısında davranışları incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle gerçekleştirilecek deneylerde kullanılmak üzere bir darbe gerilimi üretici tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Elektronik aygıtlarda bulunan devre kartlarının benzeri bir kart hazırlanmış ve bu kartın akım yolları arasına, tasarlanmış olan üreteç ile pozitif ve negatif darbe gerilimleri uygulanarak atlama gerilimi sonuçları değerlendirilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda EMP ve benzeri darbelerin oluşturduğu elektrik alanının benzetimi yapılmaktadır. Bu çalışmada, elektromanyetik darbenin oluşturduğu alan etkisinden çok, oluşan alanın devre iletkenlerine girişi durumunda karşılaşılabilecek durum incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışma, teorik hesaplamalar ve analizlerle desteklenmiştir.

### Üretecin tasarımı ve yapımı

Yapılacak deneysel çalışmada kullanılacak hızlı darbe gerilimi üreticinin tasarımı için farklı yöntemler denenmiştir. İlk denenen yöntem daha önceden yapılmış olan ve standart yıldırım darbesi üreten bir üreticinin yapılacak değişiklikler ile amaçlanan dalga şeklinde darbe üretebilmesidir. Mevcut standart yıldırım darbe üreticinin ürettiği darbenin cephe süresi 1.2  $\mu$ s, sırt yarı değer süresi ise 50  $\mu$ s'dir. Bu süreler, hedeflenen nanosaniyeler süreli darbeler için fazla uzun olduğundan devre eleman değerlerinde değişiklik yapılmıştır. Üreteç devresindeki cephe ve sırt dirençlerinin değerlerini değiştirmek, hedeflenen süreye düşmeye yetmediği gibi elde edilen darbe şeklini de bozmuştur.

İkinci yöntem olarak mevcut devrenin ürettiği standart yıldırım darbesinin cephesinde istenen nanosaniyelik süre sonunda gerilimi kesme yoluna gidilmiş, bu amaçla bir tepe (kesme) devresi kullanılmıştır. Tepe devresi oluşturabilmek için kondansatör ve küre çiftinden oluşan yapı,

darbe üretici çıkışına bağlanmıştır. Hedeflenen sistemde, darbe üreticinin çıkışında standart 1.2/50  $\mu$ s'lik darbe vardır. Tepe devresinin küre aralığı, elde edilen yıldırım darbesinin tepe gerilim değerinde atlama yapacak şekilde ayarlanmalıdır. Darbe üreticinin çıkışında elde edilen darbe, tepe devresine uygulandığından, tepe devresinin küreleri çok kısa zamanda anahtarlama yaparak hızla tepe değerine yükselen bir darbe oluşturur. Darbenin cephe süresi, tepe devresinin küre aralığı değiştirilerek ayarlanır. Sırt süresi ise yıldırım darbe üreticinin çıkışında alınan darbe ile aynıdır. Bu amaçla yıldırım darbe üreticinin çıkışına 25 mm çaplı iki adet küreden oluşan anahtar sistemi konulmuştur. Açıklanan çalışmalar yapılmış, ancak tepe devresi çıkışında oldukça bozuk dalga şekilli darbeler elde edilmiştir. Tepe devresi ile cephe süresini kısaltma yönteminin başarısız olmasının bir nedeni, düşük gerilim düzeylerinde (6-8 kV), anahtarlama amaçlı kullanılan küre sayısının artması ile kararsız durum oluşturmasıdır. Bunun yanında, küçük gerilim değerlerinde, tepe devresinde kullanılan kürelerin aralığının istenen tepe değerinde atlama yapacak şekilde ayarlanması oldukça zordur ve duyarlı ölçme gerektirir (Basov vd., 1995; Gilman vd., 1999).

Nanosaniye süreli darbe gerilimi elde etmek için başka bir yol olarak demet kablo kullanımı planlanmıştır. Buna göre belirli bir gerilim düzeyine kadar yüklenen bir kablo, başka bir kabloya veya kondansatöre, dirençler üzerinden boşaltılmıştır. Bu amaçla kurulan devrede Huber Suhner firmasının N tipi koaksiyel kablosu kullanılmıştır. İstenen kapasite değerine ulaşmak için doldurma kısmında kullanılan uzun kablo uzunluğu devreyi kullanışsız hale getirirse de sonuçta nanosaniyelik darbe gerilimleri elde edilmiştir. Ancak, 20 mm dış çapa sahip bu kabloda iç iletken ile dış iletken (siper) arasında kullanılan dielektrik malzemenin izin verilen en yüksek işletme gerilimi kablunun katalogunda 3.7 kV olarak verildiğinden, çalışma sırasında en fazla 4 kV'luk darbe elde edilebilmiştir. Bu gerilimin çalışma amaçları için düşük kalacağı göz önüne alınarak orta gerilimde kullanılan 36 kV'luk tek damarlı bir kablo ile devrenin gerçekleştirilmesi düşünülmüştür. Söz konusu bu

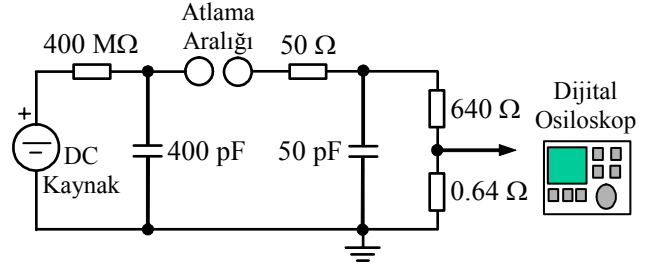
kablo hacmi ve ağırlığı ile üreticinin kolay kurulumu ve taşınabilir yapısını bozacağından çalışmada kullanımı uygun görülmemiştir (Smith, 2002).

Hedeflenen darbe şekline ulaşmak için en uygun yöntemin, endüktif özelliği mümkün mertebe düşük olan kapasite ve dirençlerle tek katlı Marx devresi kurmak olduğuna karar verilmiştir. İlk kurulan devrede kullanılan nanofarad mertebeli kondansatörün oluşturduğu olumsuzluklar göz önünde bulundurularak yapılan araştırmada darbe gerilimi üretmek için daha uygun, porselen yapıda kondansatörler bulunmuştur. Doldurma kondansatörü olarak 800 pF-7 kV'luk iki kondansatör seri bağlanmış ve 14 kV'luk 400 pF kapasiteli eleman elde edilmiştir. Yük kondansatörü olarak 10 kV gerilim değerine sahip 50 pF'luk kondansatör kullanılmıştır. Doldurma kondansatörünün pikofarad mertebesinde olması, zamanla hızlı değişen gerilim üretiminde kolaylık sağlamıştır.

Kurulan Marx devresinde cephe süresini belirleyen direnç 50 Ohm, sırt süresini belirleyen direnç ise 640 Ohm olarak elektrik devresi çözümlenmesi yapmaya uygun Pspice isimli bir bilgisayar programı ile hesaplanmıştır. Devre girişine, devreden akan akımı sınırlamak ve ardışık darbeler arasında üretme, ölçme, kayıt etme kontrolü için istenen miktarda zaman aralığı bırakabilmek amacıyla herbiri 7.5 kV'luk 200 Mohm değere sahip seri bağlı iki adet öndirenç kullanılmıştır. Tasarlanıp gerçekleştirilen devrenin şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Devre, 0-25 kV arasında ayarlı olarak gerilim verebilen bir doğru gerilim kaynağından beslenmektedir. Ölçme için Agilent marka Infinium modeli bir dijital osiloskop kullanılmıştır. 4 GSa/s örnekleme hızına sahip 1 GHz'lik bu osiloskop, hızlı değişen işaretleri yakalamak için oldukça duyarlı ve uygundur. Yüksek darbe gerilimini ölçme, önce 1000:1 çevirme oranına sahip HP marka yüksek gerilim probu ile yapılmıştır. Daha sonra ölçmeler Marx üretici çıkışına bağlanan hem dirençsel, hem de kapasitif gerilim bölücüler ile tekrarlanmıştır. Dirençsel gerilim bölücü olarak 640 Ohm'luk bir dirençle

seri bağlı 0.64 Ohm'luk bir direnç kullanılmıştır. Kapasitif gerilim bölücü ise, 50 pF'luk yük kondansatörüne seri bağlanan 50 nF'luk kondansatör ile oluşturulmuştur.



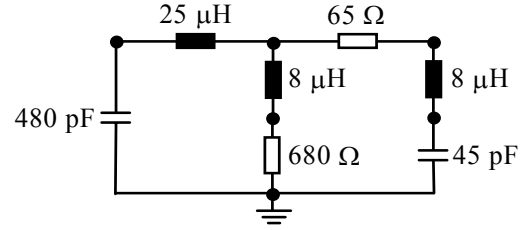
Şekil 1. Tasarlanan üretici devresi

Daha önceki çalışmalardan edinilen deneyim doğrultusunda atlama aralığındaki bir boşalmanın yüksek elektromanyetik yayınına sahip olduğu bilinmektedir. Oluşan elektromanyetik ışınım, bir girişime neden olarak yakın çevresindeki duyarlı aygıtları etkileyebilir. Yayınına uzun süre maruz kalmak, insan sağlığı üzerinde de olumsuz durumlar yaratabilir. Bu nedenle gerçekleştirilen devrede anahtarlama elemanı olarak görev yapan küreler, ölçme sistemine etki etmelerine engel olmak amacıyla ekranlama özelliği yüksek sacdan yapılmış bir kutu içine alınmıştır. Ancak yüksek gerilim probu ile gerçekleştirilen ölçmeler sırasında, ölçme sistemine ulaşan işaretlerin tek kaynağının anahtarlama elemanı olmadığı görülmüştür. Devrenin kendi iletkenlerinin şekillenmiş işaretler yaydığı ve bu işaretlerin ölçme probundaki ana işarete eklenen işaretler oluşturabildiği görülmüştür. Bu sorun, duyarlı ölçme yapmaya engel olduğundan devrenin tamamının ekranlama etkinliği yüksek olacak şekilde kılıflanması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla darbe üretici devresinin tümü 1 mm kalınlığında sacdan yapılmış, 20 cm x 20 cm x 20 cm boyutlarında bir metal kutu içine kurulmuştur. Kutuya yüksek gerilim girişi, özel imal ettirilen geçiş bağılacı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçme (osiloskop) çıkışı için Huber-Suhner firmasının koaksiyel N tipi şase bağılacı kullanılmıştır. Böylece giriş-çıkış bağlantılarının, kutu ekranlama etkinliğini en az düzeyde etkilemesi amaçlanmıştır. Kutu kapağının çevresi, kendinden yapışkanlı alüminyum folyo ile desteklen-

miş, kutu-kapak birleşim noktalarında kaçığa neden olacak olası aralıklar kapatılmıştır.

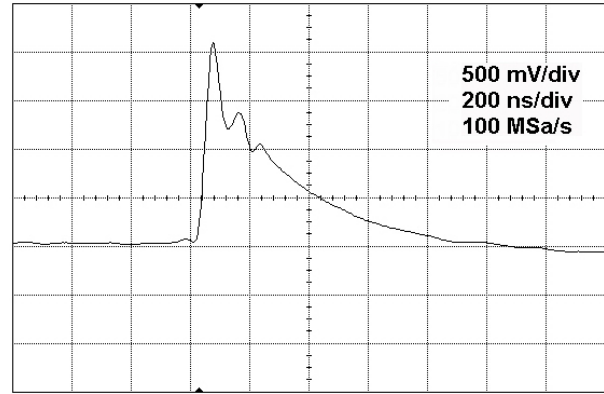
Devrenin kutu içine montajı sırasında en önemli konulardan biri bağlama, diğeri ise topraklamadır. Elemanların kendi aralarındaki bağlamaları, mümkün merteye ara bağlantı elemanı kullanmadan, doğrudan yapılmıştır. Kullanılan kondansatörler ve dirençlerin giriş-çıkış uçları, vida-somun ile bağlamaya imkan verecek şekildedir. Devre elemanlarının birbirlerine doğrudan bağlanmadığı durumlarda, 20 mm x 1 mm'lik bakır şeritler kullanılmıştır. Bağlantı elemanları mümkün merteye kısa seçilmiş ve bağlantılar sıkı yapılmıştır. Bağlantı elemanı olarak kablo kullanımı veya uzun bağlantı yapılması, devreye ek kaçak endüktans getirmektedir. Bağlantıların yeterince sıkı olmaması durumunda ise ek empedansın yanı sıra yüksek gerilim ile çalışıldığından uçlarda oluşan korona, küçük aralıklarda meydana gelen ark, çıkış dalga şeklini bozucu yönde etkili olmaktadır. Devre elemanlarının toprağa bağlantıları, bağlantı elemanı kullanılmadan, doğrudan yapılmıştır. Bu amaçla kutu içinde, doğrudan bağlamaya olanak veren bağlama uçları bırakılmış, elemanlar bu uca vidalanarak sabitlenmiştir. Doğrudan bağlama, etkin toprak almayı sağladığı gibi devrenin kutu içinde oynamadan (rijit) durmasını da sağlamıştır. Devrenin eşpotansiyel toprak düzlemi, devreyi içine alan sac kutudur.

Gerçeklenen devre elemanları ile ideal durumda hesaplama yapan bilgisayar programlarının verdiği sonuçlar şüphesiz tam anlamıyla uyumlu olmayacaktır. Bu nedenle HP 4194A empedans analizörü kullanılarak her elemanın düşük ve yüksek frekansta empedans değerleri incelenmiştir. 100 ns'lik bir darbe, 10 MHz'lik bir işarete karşılık gelir. Gerçeklenen devre elemanlarının bu frekanstaki direnç, endüktans ve kapasite değerleri ölçülmüş, atlama aralıklı kürelerin de endüktans özellikleri yaklaşık tahmin edilerek Şekil 2'de verilen devre elde edilmiştir. Devre elemanlarının 10 MHz'teki karakteristikleri göz önüne alınarak hazırlanan bu devrenin Pspice analizinin verdiği darbe gerilimi, uygulamada elde edilen darbe gerilimi ile çok büyük benzerlik göstermiştir.

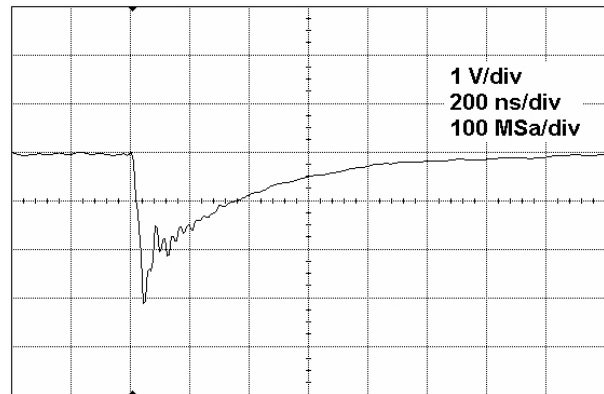


Şekil 2. Gerçeklenen darbe üreticinin 10 MHz'deki eleman değerleriyle devre şeması

Gerçeklenen üretic devresi hem pozitif hem negatif darbe gerilimi üretebilmektedir. Bu amaçla giriş doğru gerilim kaynağının kutbiyeti değiştirilebilmektedir. Şekil 3 ve Şekil 4 sırasıyla elde edilen pozitif ve negatif darbeyi göstermektedir.



Şekil 3. Üretilen pozitif darbe gerilimi



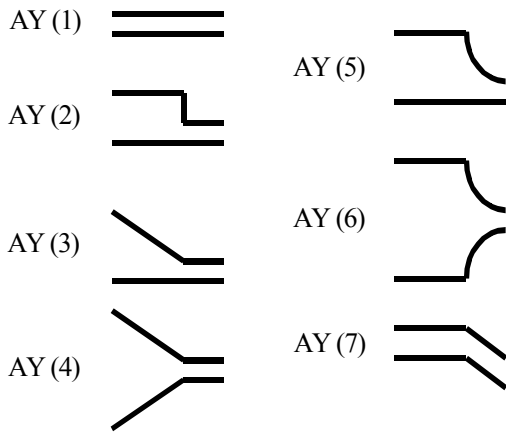
Şekil 4. Üretilen negatif darbe gerilimi

### Deneysel çalışma

Elektronik devre kartları yaygın olarak FR-4 dielektrik malzemeden yapılır. Kullanılacağı yere göre bu kartların büyüklüğü ve kalınlığı değişiklik gösterir. Bu çalışmada elektronik ay-

gıtların içindeki devre kartlarına benzer deney numuneleri olarak 100 mm ene, 150 mm boya ve 1.5 mm kalınlığa sahip devre kartları kullanılmıştır. Bu kart hazırlanırken birçok elektronik aygıtın devre kartlar incelenmiştir. Kartların üzerine, elektronik devrelerde sıkça görülen devre akım yollarından yedi farklı geometride akım yolu hazırlanmıştır. Kullanılan akım yollarının iletkenleri 1 mm genişliğe sahiptir. Çizilen akım yolları, biri akımı taşıyan (canlı, faz, pozitif) iletken, diğeri dönüş iletkeni (toprak, negatif, nötr) olarak değerlendirilmiştir. Oluşabilecek bir darbe geriliminin meydana getireceği boşalma olayının bu iletkenler arasında gerçekleşmesi beklenmektedir. Akım yolu geometrileri, paralel hatlar, köşeli-sivri uçlu hatlar, açılı dönüşler, yay şeklinde dönüşler gibi, devrelerde görülebilen farklı şekilleri içerecek şekilde seçilmiştir (Şekil 5).

Deney öncesinde, deneyin uygulanacağı kart, toz-kir bakımından eşit koşulları oluşturabilmek için saf alkol ile temizlenmiştir. Boşalma olayları ile ilgili daha kesin sonuç bulabilmek için kart üzerine hazırlanan yedi farklı geometriye sahip akım yolunun 1 mm-2 mm-3 mm aralıklı şekilleri deneyden geçirilmiş ve deney farklı gerilim düzeyleri için tekrar edilmiştir.



Şekil 5. Deneyde kullanılan akım yolu (AY) şekilleri

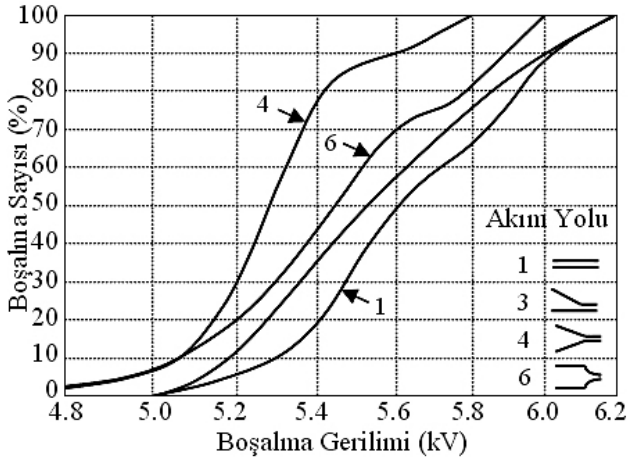
Hazırlanmış olan darbe gerilim üreticinin çıkışı, endüktif bozulmaları en az düzeyde tutmak için sac şerit şeklinde tasarlanmıştır. Çıkış ucu

krokodil ile sonlandırılmış, böylece deneyden geçirilen kart üzerindeki her akım yolu örneğine daha kolay bağlantı olanağı sağlanmıştır. Üreteç, dış kılıfı doğrudan toprakla bağlantılı olması için bakır toprak düzlemi üzerine oturtulmuş, kart ise yalıtkan köpük üzerine yerleştirilmiştir. Üreteç çıkışı canlı uç olduğundan, akım yolunun ikinci iletkeni topraklanmıştır.

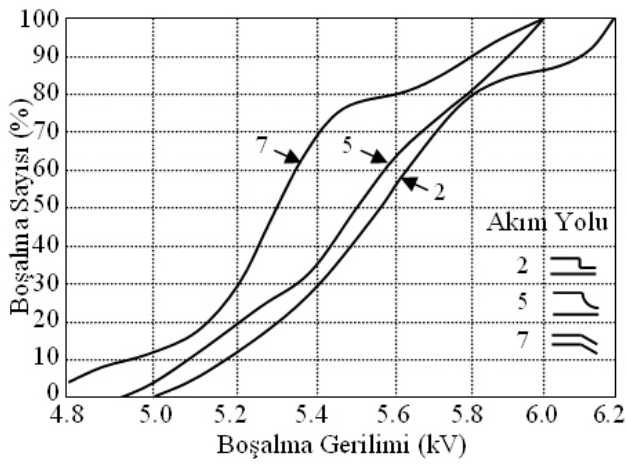
Üreticinin giriş gerilimi, üreticinin küre aralıklarının belirlediği atlama düzeyine kadar yavaşça arttırılmış ve kürelerde atlamanın meydana geldiği (darbe geriliminin üretildiği) düzeyde sabitlenmiştir. Bu şekilde örnek akım yoluna, yaklaşık olarak 3-4 saniye aralıklarla toplam 50 adet darbe gerilimi uygulanmıştır. Üreteç çıkışına bağlanan osiloskop ekranından uygulanan darbeler gözlenmiş, bu arada uygulanan 50 adet darbe geriliminde örnek akım yolunda boşalma meydana getiren darbe sayısı belirlenmiştir. Örnek üzerine uygulanan darbe gerilimi sayısını belirlemek için darbe üreticinin kat küresinden gelen atlama sesleri sayılmış, osiloskop ekranındaki darbe şekillerindeki değişim incelenmiştir. Uygulanan darbelerden atlama (boşalma) oluşturanların sayısı ise küre sesine ek olan boşalma sesi, devre kartı üzerinde görünen ışıklı atlama ve osiloskop ekranında izlenen kesik darbe ile belirlenmiştir.

Deney numunelerine uygulanan farklı düzeydeki darbe gerilimlerinin ardından boşalma meydana gelenlerin sayısı, gerilim genliğine göre grafik haline getirilmiş, böylece "yüzde elli atlama (boşalma) eğrileri" elde edilmiştir. Aynı işlem negatif darbe gerilimlerinde de tekrarlanmış ve sonuçlar grafik olarak verilmiştir (Şekil 6, Şekil 7). Şekil 5'te verilen numune geometrilerinin renkleri, grafiklerde hangi eğrinin hangi numuneye ait olduğunu göstermektedir.

Grafikler üzerinde yüzde elli atlama meydana gelen gerilim düzeylerine göre bir sıralama yapıldığında, hem pozitif hem negatif darbe geriliminde en erken atlamanın karşılıklı olarak yatayla 135° açı yapan 4 numaralı akım yolunda meydana geldiği görülmektedir.



(a)



(b)

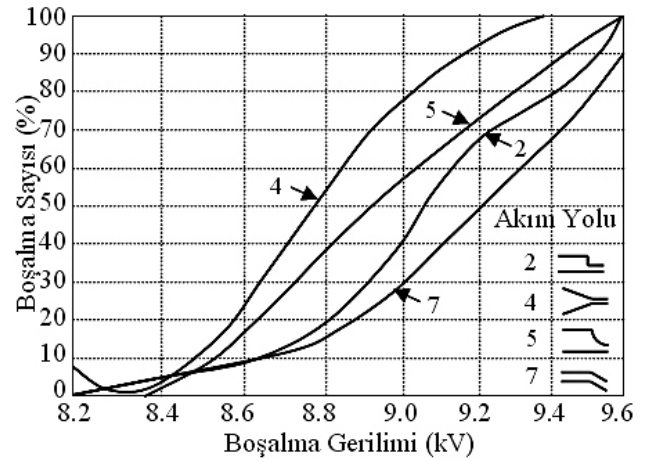
Şekil 6. 1 mm aralıklı akım yollarının pozitif darbe gerilimi karşısındaki eğrileri

Tablo 1. Yüzde elli boşalma gerilimlerine göre akım yollarının küçükten büyüğe sıralaması

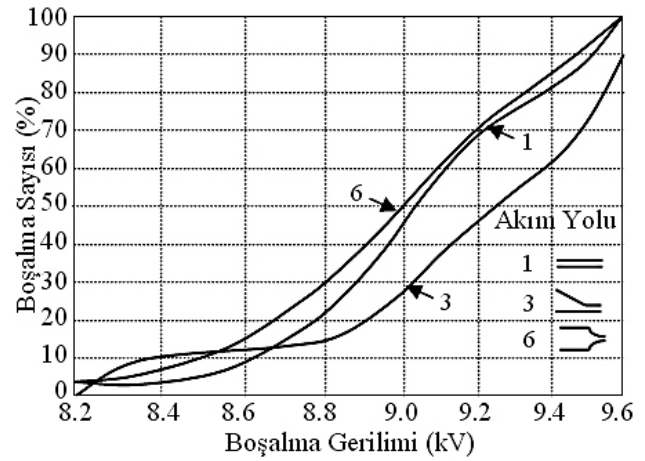
Pozitif Darbe Gerilimi	Negatif Darbe Gerilimi
Kırmızı (4)	Kırmızı (4)
Siyah (7)	Yeşil (5)
Mavi (6)	Mavi (6)
Yeşil (5)	Sarı (1)
Açık yeşil (3)	Pembe (2)
Pembe (2)	Siyah (7)
Sarı (1)	Açık yeşil (3)

Bunların ardından aynı şekilde yatay ile 45° açı yapan 7 numaralı akım yolu ve karşılıklı yay şeklindeki 6 numaralı akım yolu gelmektedir. Yay şekilleri, teğetlerinin paralel olduğu noktalarda (birbirine en yakın noktalar) atlama oluşturmuştur. Grafiklere göre düz paralel akım yol-

larında atlama, daha yüksek gerilim düzeylerinde meydana gelmektedir. Akım yollarının karşılıklı olarak açtığı şekiller, bir ucun açılı (ya da eğri) öteki ucun düz olduğu şekillere göre daha düşük gerilimlerde boşalma oluşturmaktadır. Elde edilen eğrilere göre kart üzerine hazırlanacak akım yollarında açılı dönüşlerden kaçınılmalı, iletkenlerin karşılıklı açtığı durum yerine bir tek iletkenin açtığı veya aç yapmadan karşılıklı paralel gittiği şekiller tercih edilmelidir.



(a)



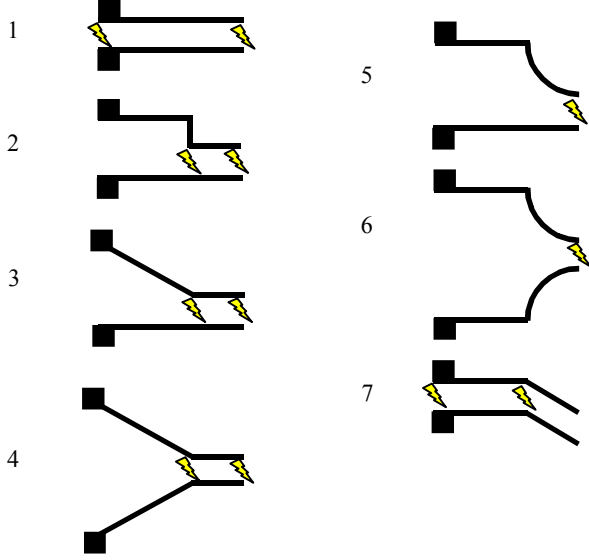
(b)

Şekil 7. 3 mm aralıklı akım yollarının negatif darbe gerilimi karşısındaki eğrileri

Deney süresince incelenen konulardan biri de farklı geometriye sahip akım yollarının (elektrotların) boşalma meydana getirdiği noktaların belirlenmesidir. Farklı geometrideki akım yollarının her birinde genel olarak boşalma aynı nok-



talarda meydana gelmektedir. Bu noktalar, boşalma sırasında gözle belirlenebildiği gibi, deney sonrası elektron mikroskobu ile incelenen numune üzerinde açıkça gözlenebilmektedir (Şekil 8).



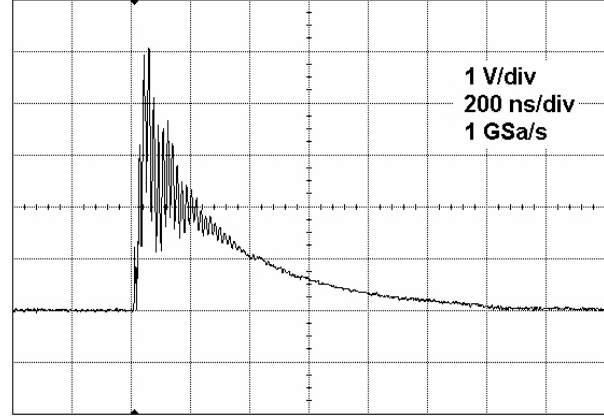
Şekil 8. Boşalmanın meydana geldiği noktalar

Şekil 8 incelendiğinde, düz bir hat boyunca paralel giden devre yolunda atlamalar uç noktalar da oluşmaktadır. İletkenlerden birinin düz, diğereğinin ise açılı veya yay şeklinde olduğu devrelerde boşalma, paralel giden hattın açığı yaptığı noktada meydana gelmektedir. Bu sonuç, karşılıklı olarak paralel giden ve açığı yapan elektrotlarda da gözlenmiştir. İletkenlerin açığı yaptığı noktalar sivri uç oluşturduğundan boşalmanın bu noktalarda meydana gelmesini sağlamaktadır. İletkenlerin oluşturduğu dönüşler ve yaylar, elektrotlar arasındaki mesafenin en kısa olduğu noktalar olduğundan boşalmalar bu noktalarda gerçekleşmiştir.

### Frekans bölgesinde inceleme

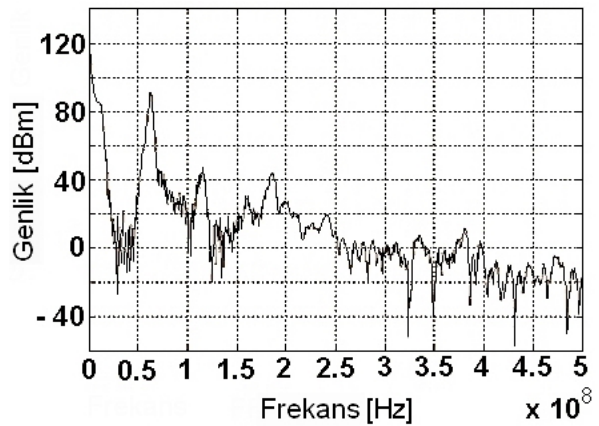
Üretilen darbe geriliminin etkili olduğu frekans bandını öğrenmek için zaman bölgesindeki darbe verilerinin frekans bölgesine dönüştürülmesi gerekir. Bunun için Fourier dönüşümü yapılabilir. Frekans bölgesinde elde edilen spektrum Fourier dönüşümü alınan işaretin şekline bağlı olarak bir temel bileşen ve yan bileşenlerden oluşur.

Genel olarak darbe şeklindeki dalgalarda sıfır noktasındaki genlik değerinin 3 dB düştüğü frekans, temel bileşen frekansıdır. Buna göre Şekil 10 incelenecek olursa, bu noktanın 1 MHz olduğu görülebilir. Üretilen ana darbe şeklinin sıfır genlik noktasından başlayıp tekrar sıfır genlik noktasına düştüğü süre olan toplam etki süresi 1  $\mu$ s'dir. Bu süre beklendiği gibi frekans bölgesinde 1 MHz'lik temel frekans bileşenine karşılık gelir.



Şekil 9. Uygulanan darbe gerilimi örneği

Darbe geriliminin en yüksek değerine ulaşmış ve düşüşe geçtiği ilk tepe yaklaşık 50-60 ns'dir ve bu nokta frekans bölgesinde 15 MHz'deki tepe noktası olarak görünmektedir. Bunun dışında frekans spektrumunda görünen bir başka büyük tepe, 63 MHz frekansındadır. Bu frekans, darbe geriliminin sırt bölgesinde oluşan salınımın frekansıdır.



Şekil 10. Şekil 9'da verilen darbenin MATLAB ile FFT alınmış hali

Bu sonuçlara göre bir değerlendirme yapmak gerekirse üretilen darbenin geniş bir frekans bölgesinde etkili olduğu söylenebilir. Darbenin cephe süresine bağlı olarak 15 MHz – 20 MHz aralığında yüksek genlikli bir etki görülmektedir. Sırt kısmında meydana gelen salınımlar 60 MHz'den başlayarak daha yüksek frekansları da içine alarak etkisini göstermektedir. Böyle bir işaretin yukarıda belirtilen frekanslarda çalışan bir sisteme kuple olması durumunda, sistemin temel işaretinin genliğine bağlı olarak bu işareti bozacağı veya tamamen bastırabileceği sonucu çıkarılabilir.

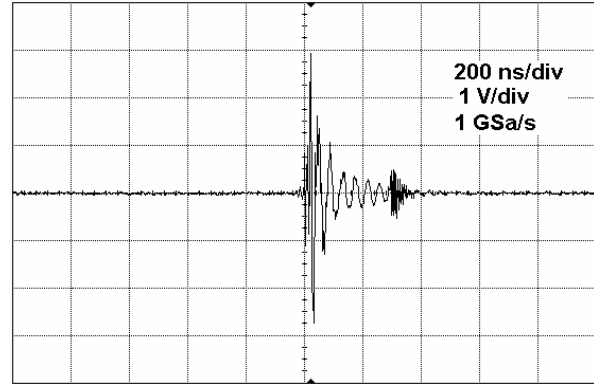
### DeneySEL çalışmanın EMU açısından incelenmesi

Aygıt ve sistemlerin beraber buldukları ortamda, birbirlerini elektromanyetik açıdan güvenlik ve performans sınırları içinde etkilemeden ve birbirlerinden etkilenmeden çalışmasına elektromanyetik uyumluluk (EMU) denir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sırasında gerek üreticiden, gerek elektrotlardaki boşalma olayından kaynaklanan bir girişim olduğu açıktır. Bu girişimin mertebesini öğrenmek için deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde üretic ve deneyden geçirilen elektrotların oluşturduğu elektromanyetik kirlilik, uygun frekans değerine sahip bikonik anten ile algılanmış ve yüksek hızlı osiloskop ile görüntülenmiştir. Bu çalışma 3 mm aralıklı yedi farklı şekildeki akım yollarının tamamı için, 10 kV gerilim düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 11, elde edilen elektrik alan değerine bir örnek olarak verilmiştir. Güvenli ölçme yapmak için osiloskop girişinde 20 dB zayıflatıcı ile korunmuştur. 20 dB, gerilim üzerinde on kat zayıflatmaya karşılık gelir.

Numunelerde meydana gelen boşalma olayının oluşturduğu geçici etkinin genliği, elektrot geometrisine bağlı olarak 32 V/m ile 55 V/m arasında değişmektedir. Elektrotların geçici etki süresi 100 ns-200 ns arasında değişmektedir.

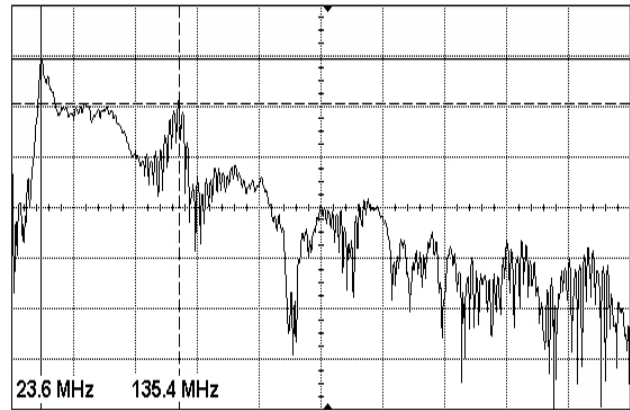
5 ve 6 numaralı elektrotların oluşturduğu alan genliği, diğerlerinden daha düşüktür. Bunun nedeni, bu geometrilerde elektrotların birbirlerine en yakın olduğu yerin bir nokta olması ve boşalmanın tamamının bu noktada meydana gel-

mesidir. Eşit mesafeli paralel yapıdaki elektrotlarda boşalma noktası sapabilmekte, zaman zaman aynı anda iki noktada boşalma meydana gelebilmektedir.



Şekil 11. 3 numaralı akım yolundaki boşalma ve darbe üreticinin birlikte oluşturduğu girişim

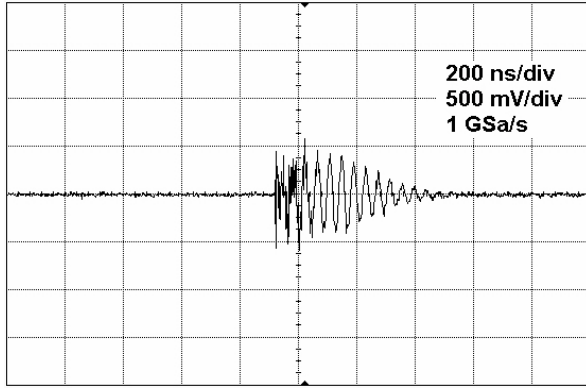
Şekil 11'de görüleceği gibi girişim işareti iki farklı kaynaktan gelmektedir. Darbe üreticinin oluşturduğu girişim büyük oranda kat kürelerinden kaynaklanmaktadır. Üreteç, elektromanyetik açıdan ekranlama etkinliği olan kutu içinde olduğundan kürelerin oluşturduğu girişim genliği akım yolunun oluşturduğu girişime göre daha küçüktür. Daha ayrıntılı inceleme yapmak için elde edilen işaretin Fourier dönüşümü yapılmıştır (Şekil 12).



Şekil 12. Girişim işaretinin frekans bölgesindeki görüntüsü

Frekans bölgesinde iki büyük bileşen görülmektedir. Genliklerine göre bu işaretler ayırt edilirse, üreticinin 135 MHz, elektrotların 24 MHz'de alan oluşturdukları görülebilir. Yapılan

çalışma, deney düzeneğinin çevreye yaydığı alan işaretlerini göstermektedir. Bu işaretlerin yakın çevredeki bir kabloya kuplajını değerlendirmek için düzeneğin 1 m uzağına standart AC cihaz güç kablosu konulmuş, kablo  $50 \Omega$  ile sonlandırılmıştır. Kelepçe tipi akım probu ile kabloda endüklenen işaret algılanmış ve osiloskopta görüntülenmiştir (Şekil 13).



Şekil 13. Kabloda endüklenen işaretin osiloskop görüntüsü

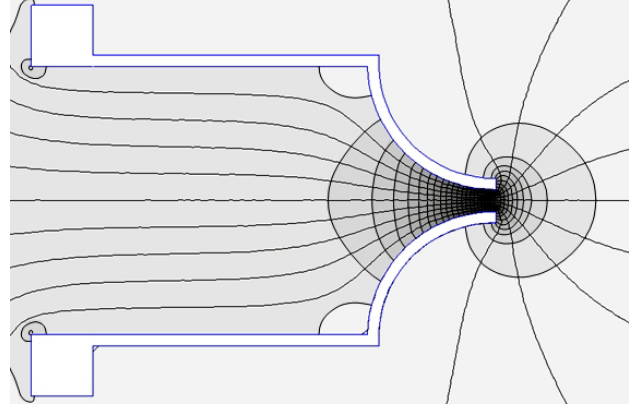
Elde edilen işaretin genliği 1250 mV'tur.  $50 \Omega$ 'luk sistemde bu işaret 25 mA'lık bir akım akmasına neden olur. Kabloya kuple olan işaretin frekans bölgesindeki görüntüsü incelenmiş ve Şekil 12'de verilen görüntü ile genlik değerleri dışında aynı olduğu belirlenmiştir.

### Teorik çalışma

Gerçekleştirilen deneysel çalışmadan sonra, elde edilen veriler teorik hesaplama ile desteklenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla "sonlu elemanlar yöntemi" kullanılarak numune elektrotlar üzerinde alan ve gerilim dağılımları incelenmiştir. İncelemede FEMM 4.0 hazır programı kullanılmıştır.

Kullanılan program, verilen elektrostatik problemini, üçgen elemanlar kullanarak, sonlu elemanlar yöntemi ile çözmektedir. Bu amaçla iki boyutlu olarak ortam ve iletken karakteristikleri tanımlanmış, deneyde kullanılan yedi farklı elektrot geometrisi ölçekli olarak çizilmiştir. Şekil 14, 2 mm açıklığa sahip 6 numaralı akım yolunun 8 kV'luk gerilim altındaki alan dağılımını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi elektrik alan yoğunluğunun en yüksek olduğu

bölüm karşılıklı iki yayın birbirine en yakın olduğu bölgedir. Yapılan deneysel çalışmada da boşalma olayı bu noktada meydana gelmiştir. Analiz, 19424 adet eleman kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 14. 6 numaralı akım yolunun FEM analizi sonucunda elde edilen elektrik alan dağılımı

Eğer koşullar uygun ve gerilim yeterli düzeyde ise elektrotlar arasında alan şiddetinin en büyük olduğu noktada boşalma beklenmelidir. Elektrotların tamamının alan dağılımları çizdirildiğinde, alan şiddetinin en büyük olduğu noktaların, Şekil 8'de verilen noktalar olduğu görülmüştür. Bu bağlamda yapılan deneysel çalışma, teorik hesaplama ile tam olarak uygunluk göstermiştir.

Deneysel çalışma sırasında elektrotlara uygulanan gerilimler programa girilmiş, boşalma meydana getiren gerilim düzeylerinde elektrotlar arasında oluşan potansiyel fark ve elektrik alan dağılımı incelenmiş, en büyük alan değeri saptanmıştır.

### Sonuçlar

Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Hızlı darbe gerilimi üretmek için farklı yöntemler kullanılabilir. Tepe devresi ile cephe süresini kısaltma yöntemi 5-10 kV mertebelerinde, anahtarlama elemanının çok hassas ayarlanmasını gerektirdiğinden uygulanması oldukça zor bir yöntemdir.
- Nispeten düşük gerilimlerde tek katlı Marx devresi kullanarak doğrudan nanosaniyelik darbeler üretilebilir. Ancak bu yöntem has-

sas hesaplama ve doğru tasarım ölçütlerine gereksinim duymaktadır.

- Akım yollarının yüzde elli boşalma eğrileri incelendiğinde karşılıklı açı yapan akım yollarında boşalmanın daha düşük gerilim düzeylerinde meydana geldiği gözlenmiş, aynı yönde, paralel olarak açı yapan şekillerde daha yüksek ve herhangi bir açı yapmadan düz paralel giden akım yolu şeklinde en yüksek dayanım elde edilmiştir.
- İncelenen akım yollarında paralel geometri-deki elektrotlarda boşalma uç noktalarda, dönüşlü geometrilerde teğetlerin paralel ve en yakın olduğu noktalarda, açılı geometrilerde ise açı yapılan noktalarda meydana gelmiştir.
- Deneysel çalışma ile elde edilen bulgular, bilgisayarda yapılan hesaplamalı analiz sonuçlarıyla uyumuştur.
- Deneysel çalışmanın oluşturduğu elektromanyetik girişim etkisi duyarlı cihazlar için göz önünde bulundurulması gereken mertebededir.

## Kaynaklar

- Akiyama, H., (1995). Pulsed power in Japan, *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, July 3-6, 1995, Albuquerque, New Mexico, **1**, 13-16.
- Akses, A., (2001). Darbe gerilimleri, yıldırım ve EMP üreteçleri, *Yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akses, A., Kalenderli, Ö., Yürekli, A. İ., Kumbasar, A. H., (2002). Design and construction of a 12 kV, impulse generator, *EMC Europe 2002 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, September 9-13, 2002, Sorrento, Italy, 257-260.
- Basov, G. F., Batrikov, A. N., Koval'chuk, B. M., Kremnev, V. V., Kumpjak, E. V., (1995). High power megavolt pulsed generator with nanosecond rise time, *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, July 3-6, 1995 Albuquerque, New Mexico, **2**, 1426-1431.
- Efanov, V., Korenev, S., (2004). Nanosecond Marx pulsed generator with semiconductor switches, *Twenty-Sixth International Power Modulator*

*Symposium*, May 23-26, 2004, San Francisco California, 520-525.

- Gilman, C., Lam, S. K., Naff, J. T., Klatt, M., Nielsen, K., (1999). Design and performance of the FEMP-2000: a fast rise time, 2 MV EMP pulser, *Twelfth IEEE International Pulsed Power Conference*, June 27-30, 1999, Monterey, California, **2**, 1437-1440.
- Grekhov, I. V., Korotkov, S. V., Stepaniants, A. L., Khristyuk, D. V., Voronkov, V. B., Aristov, Y. V., (2005). High-power semiconductor-based nano and subnanosecond pulse generator with a low delay time, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **33**, 4, 1240-1244.
- Gundersenk, M., Kuthi, A., Behrend, M., Vernier, T., (2004). Bipolar nanosecond pulse generation using transmission lines for cell electro-manipulation, *Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium*, May 23-26, 2004, San Francisco, California, 224-227.
- Martin, J. C., (1992). Nanosecond pulse techniques, *Proceedings of the IEEE*, **80**, 6, 934-945.
- Rim, G. H., Pavlov, E. P., Kim, J. S., (2001). Nanosecond pulse generation with nonlinear capacitors and magnetic power compression, *Thirteenth International Pulsed Power Conference*, June 18-22, 2001, Las Vegas, Nevada, **2**, 1287-1289.
- Smith, P. W., (2002). *Transient Electronics Pulsed Circuit Technology*, John Wiley & Sons, London.
- Verma, R., Shyam, A., Chaturvedi, S., Kumar, R., Lathi, D., Sarkar, P., Chaudhary, V., Shukla, R., Debnath, K., Sonara, J., Shah, K., Adhikary, B., Patel, R., Jigna, T., Jignesh, V., (2004a). A fast and portable mega-volt source for pulsed power applications, *The 31st IEEE International Conference on Plasma Science*, 28 June-1 July 2004, Baltimore, Maryland, 444-450.
- Verma, R., Shyam, A., Chaturvedi, S., Kumar, R., Lathi, D., Sarkar, P., Chaudhary, V., Shukla, R., Debnath, K., Sharma, S., Sonara, J., Shah, K., Adhikary, B., Jigna, T., Piyush, J., (2004b). A transmission line based compact repetitive and portable cascaded Blumlein pulser, *Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium*, May 23-26, 2004, San Francisco California, 526-529.