

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ZAMANLA HIZLI DEĞİŞEN GERİLİMLERDE
BOŞALMA OLAYLARININ İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Aysam AKSES**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

EYLÜL 2006

**ZAMANLA HIZLI DEĞİŞEN GERİLİMLERDE BOŞALMA
OLAYLARININ İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Aysam AKSES
(504012003)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Eylül 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Aralık 2006

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Aydoğan ÖZDEMİR (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Celal KOCATEPE (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Oruç BİLGİÇ (Y.T.Ü.)
Yrd.Doç.Dr. Serhat İKİZOĞLU (İ.T.Ü.)

EYLÜL 2006

ÖNSÖZ

Sonsuzluk özlemiyle akan zamana direnmenin tek yolu, nesillere aktarılacak eserler bırakmaktır. Hızla gelişen teknolojiye farklı uygulama alanları ile kendine yer bulan hızlı darbe gerilimleri ile ilgili bu tez çalışmasının tüm akademik dünyaya yararlı olacağını ümit ediyorum.

Tez çalışmalarım süresince ve öncesinde bana her konuda yardımcı olan, karşılaştığım her sorunda desteği ve yol göstericiliğiyle engelleri aşmamı sağlayan, birlikteliğimizin her anında bilgilerine derinlik kazandıran, yaşamında fedakarca bana da bir yer açan, hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye karşılığı mümkün olmayan katkılarından ötürü teşekkürlerimi sunuyorum.

Uzun zaman ve yoğun emek sonucunda hazırlanan bu çalışmada bana bütün olanaklarını açan TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü'nün yöneticilerine, çalışmalarında yardım ve desteklerini esirgemeyen ETTM bölümündeki mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

Yaşadığım her sıkıntıda yanımda olarak ihtiyaç duyduğum motivasyonu sınırsız destekle veren, duraklayanın kaybettiği bu maratonda hep ileri bakmamı sağlayan, geçmişten geleceğe vazgeçilmez dostlarım, kardeşlerim Gökhan, Karolin, Özgür ve Alin'e, yaşamıma "sıcak esintileriyle" uğrayan sevdiklerime teşekkür ediyorum.

Ve son olarak, sadece bu çalışmamda değil, hayatımın her anında bana katlanan ve sevgileriyle hayatımı güzelleştiren, çalışmam boyunca destek ve motivasyonlarıyla hep yanımda olan biricik anneciğime, kardeşlerim Mases, Aryel, Serdar'a, yukarıdan desteklerini hep yanımda hissettiğim babam ve AYdedeme teşekkürlerimi, zor anlarımda hayatımın anlamı olan Ayberk'ime, çalışmamın sonuna yetişen İlber'imize varlıklarından dolayı sevgilerimi sunuyor, kalıcı olacağını umduğum bu çalışmamı onlara armağan ediyorum.

Eylül 2006

Aysam AKSES

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
2. DARBE GERİLİMLERİ VE ÜRETEÇLERİ	5
2.1. Giriş	5
2.2. Darbe Gerilimleri	6
2.3. Darbe Gerilimi Üretimi	6
2.3.1. Hava Çekirdekli Transformatör	6
2.3.2. İletim Hattı Sistemi	8
2.3.3. Darbe Oluşturan Ağlar	10
2.3.4. Kapasitif ve Endüktif Enerji Depolayan Darbe Üreteçleri	11
2.3.5. Diğer Yöntemler	15
2.4. Anahtarlama	16
2.4.1. Gaz Anahtarlar	16
2.4.2. Sıvı Anahtarlar	17
2.3.3. Katı Anahtarlar	17
2.4.4. Plazma Anahtarlar	19
3. DARBE ÜRETECİ TASARIMI	21
3.1. Giriş	21
3.2. Farklı Yöntemlerle Tasarım ve Gerçekleme Çalışmaları	21
3.3. Üretecin Tasarımı ve Gerçeklenmesi	26
3.3.1. Devre Elemanlarının Frekansa Göre Tanımı	30
3.4. Değerlendirme	33
4. HIZLI DEĞİŞEN DARBE GERİLİMLERİNİN ÖLÇÜLMESİ	36
4.1. Giriş	36
4.2. Kapasitif Gerilim Bölücü İle Ölçme	37
4.3. Dirençsel Gerilim Bölücü ile Ölçme	38
4.4. Yüksek Gerilim Probu ile Doğrudan Ölçme	39
4.5. Ölçme ve Görüntüleme Duyarlılığı	41
4.6. Değerlendirme	42

5. DENEYSEL ÇALIŞMA	44
5.1. Giriş	44
5.2. Deney Düzeneği	46
5.3. Deney Yöntemi	47
5.4. Deney Sonuçları	50
5.4.1. Boşalma Oluşturan Gerilim Düzeylerine Geometrinin Etkisi	50
5.4.2. Farklı Geometrilere Boşalmanın Meydana Geldiği Noktaların Saptanması	52
5.5. Değerlendirme	56
5.6. Uygulanan Ardışık Darbelerin Kararlılığı	57
5.7. Uygulanan Darbelerin Frekans Bölgesinde İncelenmesi	59
5.8. Yapılan Deneysel Çalışmanın EMU Açısından İncelenmesi	61
5.8.1. EMU	61
5.8.2. Deneysel Çalışma	62
6. TEORİK ÇALIŞMA	70
6.1. Problemin Kuramsal Temeli	71
6.2. Problemin Üst Görünüme Göre Çözümü	73
6.3. Problemin Yan Görünüme Göre Çözümü	79
6.4. Boşalma Olaylarının Kuramsal Değerlendirilmesi	86
6.4.1. Yüzeysel Boşalmalar	88
6.4.2. Darbe Geriliminde Elektriksel Boşalma	89
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	93
KAYNAKLAR	99
EK A. YÜZDE ELLİ BOŞALMA EĞRİLERİ	107
EK B. FEMM ANALİZİ İLE ALAN DAĞILIMLARI	110
EK C. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM DÜZEYLERİ	114
ÖZGEÇMİŞ	118

KISALTMALAR

AC	: Alternative Current (Alternatif akım)
A.B.D.	: Amerika Birleşik Devletleri
dB	: Desibel
DC	: Direct Current (Doğru akım)
EMC (EMU)	: Electromagnetic Compatibility (Elektromanyetik Uyumluluk)
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
EMP	: Electromagnetic Pulse (Elektromanyetik Darbe)
EMS	: Electromagnetic Susceptibility (Elektromanyetik Alınganlık)
ESD	: Electrostatic Discharge (Elektrostatik Boşalma)
FEMM	: Finite Elements Method Magnetics
FFT	: Fast Fourier Transform (Fourier Dönüşümü)
HPMW	: High Power Microwave (Yüksek Güçlü Mikrodalga)
LISN	: Line Impedance Stabilization Network (Hat empedansı dengeleme şebekesi)
LEMP	: Lightning Electromagnetic Pulse (Yıldırım Elektromanyetik Darbesi)
PVC	: Polyvinil Chlorur (Polivinil Klorür)
RF	: Radio Frequency (Radyo Frekansı)
S.S.C.B.	: Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
UV	: Ultra Violet (Mor Ötesi)

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1 Darbe Gerilimi Uygulama Alanları	2
Tablo 5.1 FR-4'ün elektriksel özellikleri.....	45
Tablo 5.2 Yüzde elli boşalma gerilimlerine göre elektrotların sıralanması.....	51
Tablo 5.3 Elektrotların farklı frekanslardaki endüktansları	55
Tablo 5.4 Ölçmede kullanılan cihazlar	62
Tablo 6.1 Elektrotların farklı elektrot açıklıklarında, 8 kV için en büyük ve en küçük alan değerleri	85

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Hava çekirdekli transformatör	8
Şekil 2.2 : İletim hattı üreteçleri	9
Şekil 2.3 : Yapay iletim hattı ağı	11
Şekil 2.4 : Sandviç blok şeklinde yapılmış bir üreteç	11
Şekil 2.5 : Marx üreteci prensip devresi	12
Şekil 2.6 : Tek katlı Marx devresi	13
Şekil 2.7 : İletim hattı transformatörü	15
Şekil 2.8 : Spiral üreteç	15
Şekil 2.9 : Anahtar örnekleri	18
Şekil 2.10 : Yarıiletken anahtarların (MOSFET) seri bağlanması	19
Şekil 2.11 : Tetikleme bakımından hibrit yapıda bir Marx Üreteci	19
Şekil 2.12 : Plazma anahtar sistemi	19
Şekil 3.1 : Yıldırım darbe üreteci	22
Şekil 3.2 : Üretilen yıldırım darbesi	22
Şekil 3.3 : İletim hattı modeli ile darbe üreteci	24
Şekil 3.4 : Kablo üreteci ile elde edilen darbe şekli	25
Şekil 3.5 : Tasarlanan ve gerçekleştirilen darbe üreticinin devre şeması	27
Şekil 3.6 : Doğru gerilim kaynağının çıkış dalgalılığı	28
Şekil 3.7 : Gerçeklenen üreticinin iç devresi	29
Şekil 3.8 : İdeal durumda devre elemanları	30
Şekil 3.9 : İdeal durumdaki devrenin verdiği Pspice çıktısı	30
Şekil 3.10 : Empedans analizörü	31
Şekil 3.11 : Elemanların 10 MHz'deki değerleri ile devre şeması	32
Şekil 3.12 : Şekil 3.11'de verilen devrenin Pspice analizi çıktısı	32
Şekil 3.13 : Gerçeklenen devrenin çıkış dalga şekli	33
Şekil 3.14 : Üretilen negatif darbe gerilimi	34
Şekil 4.1 : Ölçme ve görüntülemeye kullanılan osiloskop	36
Şekil 4.2 : Kullanılan doğru gerilim kaynağı	37
Şekil 4.3 : Kapasitif gerilim bölücü ile ölçme	38
Şekil 4.4 : Dirençsel gerilim bölücü ile ölçme	39
Şekil 4.5 : Yüksek gerilim probu	39
Şekil 4.6 : Kalibrasyon darbesinin doğrudan ölçülmüş şekli	40
Şekil 4.7 : Kalibrasyon darbesinin yüksek gerilim probu ile ölçülmüş şekli	41
Şekil 4.8 : Üretilen darbe geriliminin 4 GSa/s örnekleme hızında görüntüsü	42
Şekil 5.1 : Örnek bir elektronik devre kartı	45
Şekil 5.2 : Akım yolu örnekleri	46
Şekil 5.3 : Deney düzeneği	46
Şekil 5.4 : Deneyde kullanılan elemanların fotoğrafı	47
Şekil 5.5 : Örnek devre kartına uygulanan bir darbe	49
Şekil 5.6 : Kartta boşalma meydana gelmesiyle oluşan kesik darbe	49

Şekil 5.7	: Pozitif darbe geriliminde 1 mm açıklıktaki örnek akım yollarının yüzde elli boşalma eğrileri	50
Şekil 5.8	: Negatif darbe geriliminde 3 mm açıklıktaki örnek akım yollarının yüzde elli boşalma eğrileri	51
Şekil 5.9	: 6 numaralı elektrot sisteminin atlama olayından sonra atlama bölgesinin mikroskop görüntüsü	53
Şekil 5.10	: Elektrotlarda boşalmanın gözlemlendiği noktalar	53
Şekil 5.11	: 1 numaralı elektrot sisteminde boşalma	54
Şekil 5.12	: Standart EMP darbe şekline bir örnek	56
Şekil 5.13	: Kayıpsız bir iletim hattında endüklenen en büyük açık devre gerilimi	57
Şekil 5.14	: Ardışık darbelere örnekler	58
Şekil 5.15	: 1 GSa/s örnekleme ile alınmış bir darbe gerilimi örneği	59
Şekil 5.16	: Şekil 5.15'te verilen darbenin osiloskopta frekans bölgesi görüntüsü	60
Şekil 5.17	: Şekil 5.15'te verilen darbenin MATLAB ile FFT alınmış hali	60
Şekil 5.18	: Deney düzeneği	63
Şekil 5.19	: 3 numaralı elektrot sistemi ve üretcin birlikte oluşturduğu girişim	64
Şekil 5.20	: 3 numaralı elektrodun tek başına oluşturduğu girişim	64
Şekil 5.21	: Üretcin tek başına oluşturduğu girişim	65
Şekil 5.22	: Şekil 5.19'da verilen girişimin frekans bölgesindeki görüntüsü ..	66
Şekil 5.23	: Girişim işaretinin kabloya kuple olduğu durum	67
Şekil 5.24	: MIL-STD 461D CS 116 deney sınırı	68
Şekil 5.25	: Kabloya kuple olan işaretin frekans bölgesindeki görüntüsü	69
Şekil 6.1	Bir akım yolu şeklinin sonlu elemanlar programında tanımlanması.	73
Şekil 6.2	Akım yollarının boyutları	74
Şekil 6.3	Bir akım yolu probleminde sonlu elemanlar çözümü tanım bilgileri	75
Şekil 6.4	Bir akım yolu problemi için sonlu elemanlar çözümünde ortamın tanımlanması	76
Şekil 6.5	Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar ağı	76
Şekil 6.6	Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen potansiyel dağılımı	77
Şekil 6.7	Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen %5 potansiyel farkları ile eş potansiyel çizgileri	77
Şekil 6.8	Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen elektrik alan dağılımı	78
Şekil 6.9	Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen maksimum ve minimum elektrik alan değerleri	78
Şekil 6.10	Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile çözümde kullanılan düğüm ve eleman sayısı	79
Şekil 6.11	Bir akım yolu şeklinin yandan görünümünün programda tanımlanması	80
Şekil 6.12	Akım yolu şekli için sonlu elemanlar çözümünde ortamın tanımlanması	80
Şekil 6.13	Şekil 6.11'de verilen ortamın sonlu elemanlar ağı.....	81
Şekil 6.14	Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen potansiyel dağılımı	81

Şekil 6.15	Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eş potansiyel çizgileri	81
Şekil 6.16	Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen elektrik alan dağılımı	82
Şekil 6.17	Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eş potansiyel çizgileri ve elektrik alan vektörleri ile birlikte elektrik alan dağılımı	82
Şekil 6.18	Şekil 6.11'deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta potansiyelin uzaklıkla değişimi	83
Şekil 6.19	Şekil 6.11'deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta teğetsel elektrik alan bileşeninin uzaklıkla değişimi	83
Şekil 6.20	Şekil 6.11'deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta normal (dik) elektrik alan bileşeninin uzaklıkla değişimi	84
Şekil 6.21	Şekil 6.11'deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta bileşke elektrik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi	84
Şekil 6.22	Delinme dayanımının gerilimin uygulanma süresine göre değişimi	88
Şekil 6.23	Darbe geriliminde delinme	89
Şekil 6.24	Darbe geriliminde delinme olasılığı	91

SEMBOLLER

ϵ	: Dielektrik sabit
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabit
μ_r	: Bağıl manyetik geçirgenlik (permeabilite)
Ω	: Ohm
c	: Boşlukta ışık hızı
$^{\circ}\text{C}$	: Derece Celcius
ϕ	: EMP'nin yayılma doğrultusunun yüzey teğeti ile yaptığı açı
C_p	: Primer kondansatörü
C_s	: Sekonder kondansatörü
v	: Kablo içinde yerel ışık hızı
C_y	: Yük kondansatörü

ZAMANLA HIZLI DEĞİŞEN GERİLİMLERDE BOŞALMA OLAYLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Elektrik, icadıyla beraber kullanımı artmış, gelişen teknoloji ile kullanım alanları çeşitlilik göstermiştir. Doğru akım ile başlayan süreç, alternatif akım ile devam etmiştir. Kullanım alanının artması, farklı ihtiyaçları da beraberinde getirmiştir. Doğal yolla oluşan yıldırımın etkisi, elektrik tesislerinde oluşan açma-kapamaların oluşturduğu geçici ve bozucu durum, bu olayların incelenmesini gerekli kılmıştır. Elektriksel sistemlerin, işleme sokulmadan önce böyle bir durum karşısındaki davranışlarının bilinmesi gerekir. Bu gereklilik zaten var olan darbe geriliminin laboratuvar koşullarında üretilmesi çalışmasını tetiklemiştir. Üretilen darbe gerilimleri sistemler ve sistemleri oluşturan elemanlar üzerinde deney imkanı vermiştir. Zamanla darbe gerilimleri sadece deneysel amaç için değil, doğrudan endüstriyel, tıbbi, askeri vb. amaçlar için üretilmiştir. Önceleri mikrosaniye ve milisaniye mertebelerindeki darbeler, yeni teknoloji kullanım alanlarında nanosaniye hatta pikosaniye mertebelerine inmiştir.

Nanosaniyelik darbeler, EMP (ElektroManyetik Darbe) yoluyla da 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 kuple olarak bunların içine ulaşması ve sistem veya cihazların bozulmasına ya da yanlış çalışmasına neden olmasıdır.

EMP benzeri darbe gerilimleri genel olarak nanosaniye mertebeli darbelerdir. Cihazların böyle bir darbe karşısındaki davranışlarını incelemek için yapay EMP üreteçleri kullanılır. Bu üreteçler EMP'nin oluşturduğu elektrik ve manyetik alanları üretirler.

Bu tez kapsamında EMP benzeri nanosaniyelik darbelerin cihazların iletkenlerine ve elektronik kartlarına ulaşmaları durumunda meydana gelebilecek olaylar değerlendirilmiştir. Bu amaçla 10 kV'a kadar çıkabilen , yaklaşık 50 nanosaniyede tepe değerine ulaşan ve toplamda yaklaşık 1 mikrosaniye süren darbe üreten bir üreteç tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Üreteç tek katlı Marx devresi prensibi ile çalışmaktadır. Elektronik cihazların devre kartlarını simüle etmek için elektronik devrelerde sıkça karşılaşılan yedi farklı geometride akım yolu Fr4 malzemeden yapılmış devre kartına hazırlanmıştır. Darbe gerilimi üreteci ile farklı genliklerde gerilimler bu karta uygulanmış ve boşalma olayları incelenmiştir. Numune akım yollarında geometriye bağlı olarak boşalma noktaları belirlenmiş, uygulanan farklı 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 bağı olarak etkilenme üzerine yorum yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmanın oluşturduğu elektromanyetik girişim (EMI) etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar hem zaman bölgesinde, hem frekans bölgesinde değerlendirilmiştir.

INVESTIGATION OF THE FLASHOVER PROCESS UNDER FAST TRANSIENT VOLTAGES

SUMMARY

Electricity, with its invention, had increased the usage, and with the improvement in technology, the usage had shown variety. The process beginning with direct current continued with alternative current. The increase in the application had brought with different requirements. The natural effect of lightning and the disturbance effect of switching operation in electrical installations necessitated research on this subject. For the electrical systems probable to have this effect, it's necessary to obtain information for the behaviour, before they are operated. 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, but also directly for industrial, medical, military etc. objectives. The pulses with the microsecond and millisecond time lengths, 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. An EMP caused by a high altitude burst can have an effect over wide zone 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 break down 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 reach to the conductors and circuits of electronic devices are evaluated. For this aim, a pulse generator with an output up to 10 kV, generating a pulse with a risetime of about 50 ns and total duration of about 1 μ s is designed and constructed. The generator operates on principle of a single stage Marx circuit. For simulating the circuit of electronic device, widely used seven different geometrical current ways are prepared on to the board made of Fr4. Pulses of different voltage level is applied by the generator on the sample board, and the flashover is observed. The flashover points on the different geometries are determined and the fifty percent discharge curves of the electrodes are obtained. The experimental work performed is tried to be supported with theoretical analysis. For this aim, computer analysis using finite elements method is made.

In this study, comments on the effects of nanosecond voltages pulses coupled to electronic circuits are made. The electromagnetic interference (EMI) formed by the experimental work performed is evaluated. The work is done both in frequency and time domain.

1. GİRİŞ

Çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmalarında kullanılan güç ve gerilim düzeyinin yükselmesi, darbe gerilimi teknolojisini üzerinde en çok çalışılan konulardan biri haline getirmiştir [1]. Füzyon, yüksek güçlü parçacık demeti, lazerler ve benzeri konular, gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Bu teknoloji temel olarak 1960’larda İngiltere ve eski S.S.C.B. tarafından tetiklenmiş, daha sonra A.B.D. ve teknolojik olarak ileri diğer devletler tarafından geliştirilmiştir. Dünyanın büyük bölümünde darbe gerilimi teknolojileri 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. Tablo 1.1, bu uygulama alanlarının, uygulama şekline göre sınıflandırmasını göstermektedir [2].

Darbe gerilimi teknolojilerinin bir amacı, doğrudan endüstriyel veya askeri uygulama olabildiği gibi bir amacı da bu uygulamalara karşı deneysel çalışmadır. 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 bağımlılık, olumsuz bir durumla karşılaşmamak için bu sistemlerin korunması zorunluluğunu getirmiştir. Bu nedenle sistemlerin, kullanıma sunulmadan önce, karşılaşılabilecekleri zamanla hızlı değişen geçici işaretler karşısındaki davranışları yapılan deneylerle değerlendirilir [1, 3]. Bu deneylerde, elektromanyetik alan yapay olarak oluşturulup denenecek sisteme uygulanabildiği gibi, oluşan alanın sistemde endükleyeceği akım ve gerilimler doğrudan sisteme uygulanabilir.

Tablo 1.1. Darbe gerilimi uygulama alanları

Uygulama Temeli	Uygulama Şekli	Uygulanan Alan
Yüksek Enerji Yoğunluklu Plazma	X-ışını	Litografi, Mikroskop, Lazer, Malzeme, Işık kaynağı, Tıbbi kullanım, Mikro makineler
	Nötron	Radyografi, Reaktör malzeme sınaması, Kristal analizi, Tıbbi kullanım
	Nükleer füzyon	Güç santrali
	Manyetik alan	Malzeme bilimi
Elektron Demeti	Mikrodalga ve milimetre dalga	Plazma ısıtma, Hızlandırıcı, Lazer, Radar, Enerji iletimi, Sterilizasyon
	Boşalmalar	Lazer, Kirlilik kontrolü
İyon Demeti	Plazma	Nükleer füzyon, Malzeme, İmplantasyon
Elektromanyetik Hızlandırıcı	Yüksek Basınç	Nükleer füzyon yakıtı, Malzeme bilimi, Uzay uygulamaları
Boşalma	Uyarma ve kimyasal reaksiyon	Lazer, Kirlenme kontrolü, Film oluşumu, Ozon üretici, Işık kaynağı
Yoğun Elektromanyetik Alan		Mineral ayrıştırma, kaya parçalama
Yüksek Gerilim		Açma-kapama ve yıldırım darbe gerilimi deneyleri, Yalıtım deneyleri

Darbe gerilimleri üzerine yapılan çalışmalar farklı yönlerde doğru hız kazanarak yayılmıştır. Bu tezin kaynaklar bölümünde listelenen çalışmalar ve listede olmamasına rağmen yapılan literatür taramasında incelenen çalışmalar, üretilen darbelerin cephe sürelerinin nanosaniye ve bazı uygulamalar için pikosaniye mertebelerine düştüğünü göstermektedir. Bu derece hızlı darbeler özellikle optik uygulamalarda, uzay teknolojilerinde ve medikal amaçlar için üretilmektedir. Mikro dalga kullanımının artması, hızlı darbe gerilimleri üretme çalışmalarının bu amaca 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, üretilen darbelerin tekrarlanma hızını arttırmayı amaçlamaktadır. Bu amaçla, kullanılan devre elemanları çeşitlilik göstermektedir. Hızlı anahtarlama ihtiyacı yarıiletken anahtarların, özellikle

MOSFET'lerin kullanımını arttırmıştır. İncelenen çalışmalarda görünen durum, MHz mertebelerinde tekrarlanabilen darbe üretimine ulaşıldığıdır. Bu tez çalışmasında amaçlanan darbeler, elektromanyetik etki ile oluşması beklenen darbelerdir. Bu darbeler mikrosaniye ve nanosaniye mertebelerindedir. Elektromanyetik etki ile oluşan hızlı darbelerde tekrarlama frekansı, optik uygulamalardaki gibi ön plana çıkmamaktadır. Literatürde bu amaçla üretilen hızlı darbeler, genel olarak anten kullanılarak elektrik alan şekline dönüştürülmekte ve EMP üreteçlerinde (simülatörlerinde) kullanılmaktadır [4].

Hızlı darbe gerilimi üretiminde en yaygın kullanılan yöntemler kablo üreteçleri, LC devreleri ve Marx üreteçidir. Bazı uygulamalarda birden fazla yöntem bir arada kullanılabilir. Bu yöntemlerin bazıları bu tez çalışmasında denenmiş ve uygulama amacına en uygun gelen yönteme karar verilmiştir.

Üretilen darbe geriliminin doğru ve duyarlı ölçülmesi başka bir önemli konudur. Üretilen gerilimler yüksek genlikli olduğundan ölçme ve görüntüleme aletine alınmadan önce düşürülmesi gerekir. Bu amaçla kullanılan yöntemler temelinde gerilimi uygun şekilde bölmeyi sağlar. Kullanılan ölçü ve görüntüleme aletinin duyarlılığı da ölçme doğruluğunu belirleyici etkindir. Teknolojik ilerleme, ölçü aletlerinin ölçme duyarlılığını oldukça geliştirmiştir. Güncel dönemde yapılan çalışmalarda ölçme duyarlılığına verilen önem ön plana çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında da amaca uygun, duyarlı ölçme sistemi kurulmuş, üretilen hızlı darbeleri görüntülemeye 4 GSa/s örnekleme hızına sahip osiloskop kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında, elektronik sistemlerin karşılaşılabilecekleri hızlı değişen geçici gerilimler karşısında davranışları incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle gerçekleştirilecek deneylerde kullanılmak üzere bir darbe gerilimi üretici tasarlanmıştır. Daha sonra deneye uygun olacak şekilde bu üreteç gerçekleştirilmiştir. Elektronik aygıtlarda bulunan devre kartlarına benzer bir kart hazırlanmış ve bu karta, elektronik devrelerde yaygın olarak kullanılan akım yolları kurulmuştur. Gerçekleştirilen üreteçle örnek devre kartına pozitif ve negatif darbe gerilimleri uygulanmış sonuçlar değerlendirilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda EMP ve benzeri darbelerin oluşturduğu elektrik alanın benzetimi yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında, elektromanyetik darbenin oluşturduğu alan etkisinden çok, oluşan alanın devre iletkenlerine bağlaşımı (kuplajı) halinde karşılaşılabilecek durum incelenmektedir.

Dielektrik malzemelerde yüksek gerilim nedeniyle oluşabilecek delinme veya yüzeysel boşalma olayları için gerçekleştirilen deneylerde, mikrosaniyelik darbeler kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında daha hızlı darbeler kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışma, teorik hesaplamalar ve analizlerle desteklenmiştir. Yapılan çalışmalar, elektromanyetik uyumluluk açısından da incelenmiş, düzeneğin oluşturduğu elektromanyetik girişimin düzeyi ölçülmüştür.

2. DARBE GERİLİMLERİ VE ÜRETEÇLERİ

2.1. Giriş

Elektrik ve elektronik aygıtlar çalışmaları sırasında farklı yüksek gerilim şekilleri ile karşı karşıya kalırlar. Bu durum aygıtlar (sistem) ve aygıtları oluşturan yalıtkanlar (elemanlar) üzerinde tasarım, üretim sırasında ve kullanılmadan önce yüksek gerilim deneyleri yapılarak değerlendirilir. Bu deneylerden amaç, yalıtkanların istenen yalıtım özelliklerini sağlayıp sağlamadığını, ne derece sağladığını ve gerilim altında nasıl davrandıklarını belirlemektir. Yalıtkanlık özelliğini kaybeden malzeme, kullanıldığı aygıtın çalışma durumunu bozabileceği gibi sistem ve kullanıcı güvenliğini de tehlikeye sokabilir [1, 3, 5].

Darbe gerilimleri, gerek gündelik hayatta, gerek elektrik tesislerinde sıkça karşılaşılan gerilim şekillerindendir. Yıldırım gibi doğal olaylar, darbe gerilimi oluşturabildiği gibi yapay olarak elektrik devrelerinde ve tesislerde açma-kapama veya elektromanyetik tabanlı uygulamalar da darbe gerilimi kaynağı olabilir. Karşılaşılan gerilimler, genelde, geçici, kısa süreli, hızlı değişen, büyük genlikli ve tek kutbiyetli (polariteli) gerilimlerdir.

Aygıtı besleyen güç veya işaret hatlarında geçici gerilimlerin meydana gelmesi ve bu gerilimlerin aygıtın içine taşınması hatalı çalışma veya tamamen bozulma ile sonuçlanabilir. Gerilimler aygıtta iletkenler yoluyla doğrudan ulaşabileceği gibi elektromanyetik bağlaşım (kuplaj) ile dolaylı olarak da etki edebilir. Aygıt çevresinde oluşabilecek yüksek gerilimli bir boşalma olayı, beraberinde şiddetli elektromanyetik alanlar oluşturur. Oluşan alanlar, bağlaşım halinde oldukları iletkenlerde yüksek gerilimler endükleyip zarar verici akımlar akıtabilirler.

Elektriksel sistemlerin ve elemanların kullanıma sunulmadan önce dayanımlarını tanımlamak ve sınamak çok önemlidir. Bu bakımdan laboratuvar ortamında kısmi boşalma ölçmeleri, dayanım deneyleri, atlama ve delinme deneyleri gerçekleştirilir.

2.2. Darbe Gerilimleri

Günümüz çalışmalarının büyük kısmı, nanosaniye ve nanosaniye-altı darbelerin üretilmesi ve uygulamadaki etkileri konusunda yoğunlaşmaktadır. Kısa süreli darbe üreteçleri,

- EMP (elektromanyetik darbe), LEMP (yıldırım EMP) benzetimlerinde (simulatorlerinde)
- HPMW (yüksek güçlü mikrodalga) uygulamalarında
- Lazer ve plazma tekniğinde (optoelektronik uygulamalarında)
- Biyoelektrikte, biyolojik hücrelere elektriksel etki ve bunun medikal uygulamalarında
- Radar uygulamalarında
- Yüksek gerilim tekniğinde (yalıtım deneyleri)
- Elektrik tesislerinde (yıldırım, açma-kapama, ESD) sebebiyle oluşabilecek zamanla hızlı değişen geçici gerilim benzetimlerinde kullanılır [6, 7, 8].

Darbe gerilimi, yüklü sistemlerden, darbe üreteçlerinden, kablo veya demet iletim hatlarından elde edilebilir. Hızlı sistemler, düşük endüktansa ihtiyaç duyduklarından genel olarak yüklenmiş iletim hattı demetinin hızlı anahtarlama ile yük üzerine boşaltılması ilkesiyle çalışır. Benzer ilkeyle çalışan hava çekirdekli transformatör devreleri de hızlı değişen darbe gerilimi üretiminde kullanılabilir [6].

2.3. Darbe Gerilimi Üretimi

2.3.1. Hava Çekirdekli Transformatör

Darbe gerilimi üretme yöntemlerinden bir tanesi, darbe transformatörü kullanmaktır. Darbe transformatörlerinin tasarımında alternatif akım transformatörlerinden biraz daha farklı ölçütler göz önünde bulundurulur. Manyetik çekirdeğe sahip darbe transformatörlerinde çekirdek, primer ve sekonder arasındaki bağlantıyı sağlamamanın yanı sıra primerin endüktansını yükselterek mıknatıslanma akımının sınırlandırılmasına yardımcı olur. Ancak transformatörün yüksek güç ve gerilimde kullanılması durumunda, doymaya engel olmak için büyük boyutlu ve çok sarımlı çekirdek gerekir. Güç seviyesi daha da yükseltince, bir noktadan sonra çekirdek boyutu pratik olmaz. Bu sorunu, G. Rohwein ve J. C. Marin manyetik çekirdeği olmayan transformatör geliştirerek çözmüşlerdir. Manyetik bağlantı sağlayan bir çekirdeğin

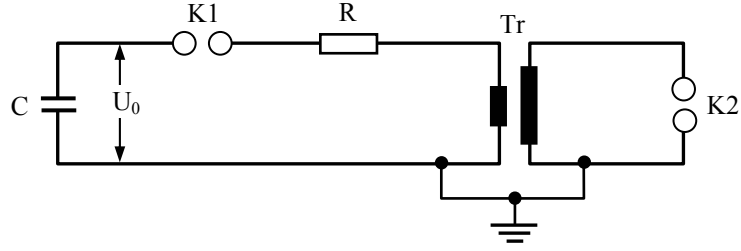
olmaması nedeniyle primer ve sekonder sargıların birbirlerine mümkün mertebe yakın sarılması gerekir. Bu nedenle sargı olarak bobin yerine ince bakır folyolar üst üste sarılır. Sargılar arasına yalıtım sağlamak amacıyla ince plastik ve benzeri malzemeden tabakalar yerleştirilir [9].

Hava çekirdekli transformatörler, gerilimleri üç-dört milyon volt mertebesine çıkabilmesine karşın basit yapıya sahiptir. 200-300 kV mertebesine kadar böyle bir transformatörü tasarlamak oldukça rahattır ama daha yüksek gerilim seviyesine çıkmak için iyi deneyim ve uygun koşullar gerekir. Çok yüksek gerilimlerde transformatör içinde manyetik malzeme kullanmak oldukça zordur. Transformatörün kazancını yüksek tutmak için primer sargıyı besleyen kaynağın kaçak endüktansı mümkün mertebe küçük olmalıdır. Bunun yanında kullanılan kapasitenin ve anahtarlama elemanının da endüktif özelliği bulunmamalıdır. Yüksek gerilim sistemlerinde bir başka sorun, yalıtılmış yapıdaki transformatörlerde küçük geçici gerilimlerin bile primer-sekonder sargılar arasındaki yalıtımı bozabilmesidir. Bu nedenle oto-transformatör yapısı daha çok tercih edilir [9, 10, 11].

Yüksek gerilim darbe transformatörleri genel olarak 70:1 sekonder-primer sarım oranına sahiptir. Küçük yük üzerine boşaltıldığında genel olarak kazançları, çevirme oranından biraz daha fazladır. Sarım sayısı değiştirilerek gerilim yükseltilebilir ama belirli bir seviyeden sonra oluşan yüksek alanlar, gerilim artışını sınırlar [12].

Milyon volt mertebesindeki transformatörler, bir metre küplük hacme sahip yağ dolu bir kazan içinde kullanılabilir. Bir milyon voltun altındaki gerilimlerde çalışma ortamı olarak su veya yağ seçilebilir. Gerilimin tepe noktasına ulaşıldığında, depolanan enerji yağ veya su aralıklı anahtar ile CuSO_4 direnç üzerine boşaltılır. Elde edilen darbenin yükselme süresi yüke bağlı olmakla beraber 0,5 μs civarındadır. Bu tür sistemler delinme veya anahtarlama deneylerinde kullanılabilir [10].

100-200 kV'luk darbelerde daha basit yapıda ve 20:1 çevirme oranına sahip transformatörler kullanılabilir. Böyle bir yapı, primer tarafında μF mertebesinde bir kondansatör üzerinden beslenir ve çıkışında yüke bağlı olarak 20-30 ns'lik darbeler elde edilir. Şekil 2.1 hava çekirdekli bir üreticinin devresini göstermektedir. C kondansatörü U_0 gerilimine kadar yüklenir ve bu yük daha sonra K1 atlama aralığında atlama yoluyla primer sargısına boşalır. Bu durumda primer sargısından μs mertebesinde kA mertebesine çıkan bir akım akar. Primere manyetik olarak bağlı olan sekonder sargısında hızla yükselen yüksek darbe gerilimi meydana gelir.



Şekil 2.1. Hava çekirdekli transformatör

Bu darbenin hızı (yükselme süresi), K2 atlama aralığı yardımıyla değiştirilebilir. Çoğu zaman sekonder devresinde küçük kapasiteli bir yük kondansatörü de kullanılır. Primerden gelen anlık darbe, çok kısa sürede sekonder kapasitesinin uçlarında yüksek gerilim darbesi oluşmasına neden olur. Primer kapasitesi C_p ile sekonder kapasitesi C_s arasında genel olarak çevirme oranına bağlı olan bir oran vardır. Genel olarak bu oran, n sargılar arası çevirme oranı olmak üzere

$$C_p = n^2 C_s \quad (2.1)$$

olarak seçilir. Darbe transformatörlerinde karşılaşılan sorunlardan en önemlisi, tasarıma bağlı olarak darbe yükselme süresindeki kayıplar, daha doğrusu hesaplanan değer kadar hızlı yükselen darbe elde edememektir. Bunun en önemli sebebi sistemde oluşan istem dışı kaçak endüktanslar ve sargıların kendi iç kapasiteleridir bu sorunu ortadan kaldırmak için alternatif bir yöntem, primer sargısının tek değil çoklu yapılmasıdır [13, 14].

2.3.2. İletim Hattı Sistemi

Yüksek hızlı darbe gerilimi üretmek gerektiği yerlerde iletim hattı sistemi kullanılabilir. Bu sistemde, genel olarak eş eksenli-tek damarlı bir kablo, doğru gerilim kaynağı ile belirli bir gerilim seviyesine kadar akım sınırlayıcı bir eleman (direnc veya bobin) üzerinden elektrik yükü ile yüklenir. Kablonun bu yükü, anlık anahtarlama ile bir yük elemanı üzerine boşaltılır. Elde edilen dikdörtgen darbenin süresi, gerilim basamağının kablunun bir ucundan öteki ucuna kadar gitmesi için geçen sürenin iki katı kadardır [9, 15].

l yüklenen kablunun boyu, c ışık hızı, ϵ_r kablo yalıtkanının bağıl dielektrik sabiti, μ_r kablo yalıtkanının bağıl manyetik geçirgenliği olmak üzere kablo üzerinde darbenin hızı v_p ve oluşacak darbenin süresi t_p sırasıyla

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \text{ ve } t_p = \frac{2l}{v_p} \quad (2.2)$$

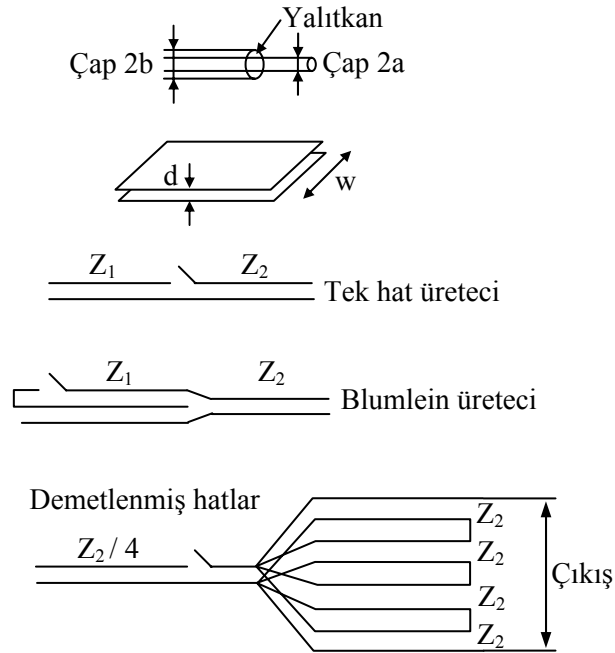
olarak hesaplanabilir. Kablonun birim uzunluğun endüktansı L ve kapasitesi C olmak üzere kablo üzerinde yayılan dalganın hızı

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{m/s}) \quad (2.3)$$

ve kablunun dalga (karakteristik) empedansı

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{ohm}) \quad (2.4)$$

olarak verilebilir. Empedansı bilinen bir hattın L ve C parametreleri hesaplanabilir. Devredeki kabloların çapı, kablolar arası mesafeye göre küçükse, kabloların paraleli hesaplanarak çözümleme yapılır. Şekil 2.2, iki temel hat üreticini göstermektedir.



Şekil 2.2. İletim hattı üreticileri

Birinci sistem, Z_1 empedanslı kablunun yüklenip Z_2 empedanslı başka bir kabloya veya yüke boşlatılması ilkesi ile çalışır. Burada G gerilim kazancı

$$G = \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2.5)$$

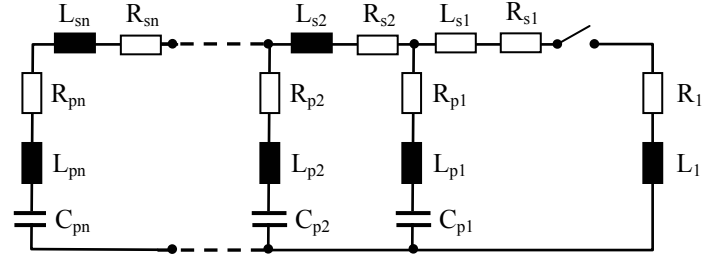
kadardır ve kablo empedanslarının eşit olması durumunda kazanç $1/2$ olur. Yüksek gerilimli darbe üretiminde tek kablo kullanmak oldukça düşük verimlidir. İkinci sistem A. D. Blumlein tarafından bulunmuştur ve $Z_2 = Z_1 + Z_1$ olarak seçilirse kazanç 1 olur. Paralel bağlı kablo sayısı artırılarak çıkışta elde edilecek gerilim seviyesi yükseltilebilir. Burada anahtarlama elemanı önem kazanır çünkü anahtar, yüklenen kablodaki enerjinin tamamını iletemezse verim küçük olur. Anahtarlama elemanının düşük endüktansa sahip olması gerekir [9, 10,16].

İletim hattı sistemi, doğrudan doğru gerilim ile beslenebileceği gibi, bir Marx devresinin çıkışına da konulabilir. Marx üreticinin oluşturduğu darbe gerilimi, kablo sistemini besleyerek daha yüksek gerilimli ve daha hızlı darbe gerilimleri elde edebilir [17, 18, 19].

2.3.3. Darbe Oluşturan Ağlar

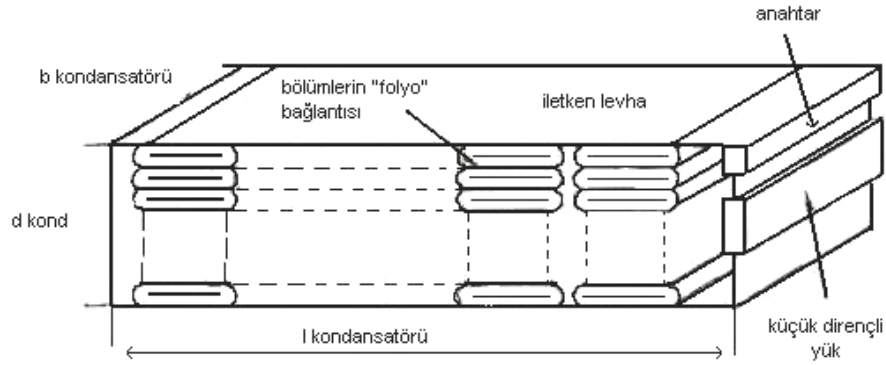
İletim hatları ile darbe gerilimi üretimi, oldukça basit bir yöntemdir ve fazla tasarım incelikleri gerektirmez. Ancak böyle bir üreteç için temin edilecek kablolar, sadece belirli özelliklerde, standart tipte piyasada bulunabilir. Örneğin koaksiyel kabloların büyük bölümü 50Ω empedans için üretilmiştir. Farklı empedans gereksinimlerinde özel kablolar imal ettirmek gerekir. Kabloların bir diğer dezavantajı ise iletim hattı boyunca elektromanyetik dalgaların iletim hızıdır. (2.2) numaralı eşitlikten görüldüğü gibi iletim hızı kablo iletkeninin ve yalıtkanının bağıl manyetik geçirgenliğine ve bağıl dielektrik sabitine bağlıdır. Kablolarda yaygın olarak kullanılan yalıtkan polimer plastik türevidir. Bunların bağıl dielektrik sabiti oldukça düşüktür ($\epsilon_r = 2-3$). Buna göre hat üzerinde iletim hızı yaklaşık 2×10^8 m/s civarındadır. Bu da yaklaşık nanosaniyede 20 cm hız demektir. 1 μ s'lik bir darbe üretmek için 100 m'lik kabloya gereksinim olur ki bu pek pratik değildir [9, 10, 19].

Böyle bir sisteme alternatif yaklaşım, iletim hattı modeline benzeyen "yapay iletim hattı" (Artificial Forming Line) sistemi kurmaktır. Darbe oluşturan ağlar, ya da daha yaygın bir ifadeyle yapay iletim hatları, iletim hatlarının temel parametrelerinden oluşur. Bir iletim hattını tanımlayan kapasite, endüktans ve direnç, uygun seri-paralel düzende bağlanarak hattın empedansı oluşturulur. Yapay model RLC elemanlarından oluştuğundan, birden çok iletim hattından oluşan sistem, RLC bloklarının art arda bağlanmasıyla gösterilir ki böyle bir sisteme "RLC merdiven ağı" denir. Şekil 2.3 böyle bir yapıyı göstermektedir [20, 21].



Şekil 2.3. Yapay iletim hattı ağı

RLC devresini kurarken önemli nokta, kaçak endüktans ve kapasiteleri mümkün mertebe düşük tutabilmektir. Bunu sağlamak için farklı bağlantı şekilleri kullanılabilir. Şekil 2.4 (sandwich block), L ve C elemanlarını, şerit ve plaka iletkenler ile uygun dielektrik malzemeler kullanarak oluşturan, bağlantıları modüler yapıda sağlamış bir üretici göstermektedir. Bu sistemde dielektrik malzemenin çevresine sarılan iletken şeritler hem kondansatörü, hem de endüktansı oluşturmuştur.



Şekil 2.4. Sandviç blok şeklinde yapılmış bir üreteç

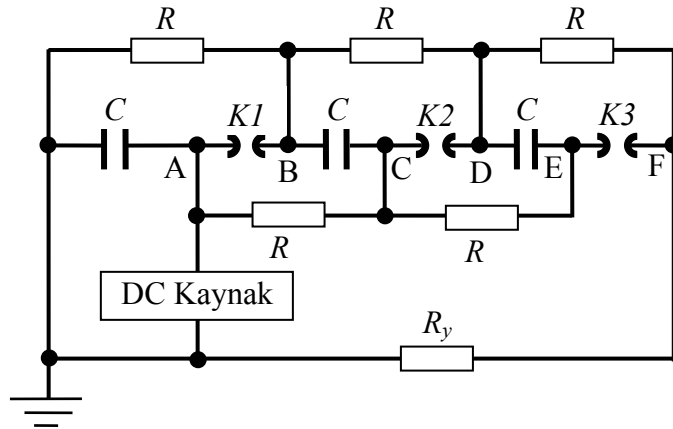
Üretilen dikdörtgen darbede, sistemden elde edilen enerji, genel olarak merdiveni oluşturan kondansatörde depolanır ve bu sisteme gerilim beslemeli ağ denir. Ne var ki manyetik enerjiyi merdiveni oluşturan endüktansta depolamak da mümkündür. Böyle bir sisteme akım beslemeli ağ adı verilir.

2.3.4. Kapasitif ve Endüktif Enerji Depolayan Darbe Üreteçleri

Genel olarak bir kondansatör veya kondansatör bankasını doldurup bir yük üzerine boşaltmak, en basit ve yaygın darbe üretme yöntemidir. Bu yöntem basit olmasının yanı sıra ucuzdur ve ihtiyaç duyulan anahtar elemanları kolay bulunabilir. Ancak bir tek kondansatörü doğru gerilim kaynağı ile doldurarak elde edilecek darbe gerilimi, belirli bir seviyenin üzerine çıkamaz. 100 kV mertebesinin üzerindeki gerilim

ihtiyaçlarında, devrede kullanılacak elemanların fiziksel büyüklükleri pek pratik olmaz ve güvenilir çalışmaları garanti edilemez. Devreyi besleyen doğru gerilim kaynağının temini zor olacağı gibi devrede çok yüksek doğru gerilimin bulunması, beraberinde getireceğı korona problemi nedeniyle pek tercih edilmez. Bu sorunların önüne geçmek için, bir grup kondansatörün paralel olarak doldurulup hızlı anahtarlama ile seri boşaltılması ilkesiyle alışan Marx üreteçleri geliştirilmiştir. Üretecin gerilim kazancı, paralel doldurulan kondansatör sayısı ile orantılıdır. Çok yüksek darbe gerilimi ihtiyaçlarında Marx üreteçleri yaygın olarak tercih edilir, çünkü megajul mertebesinde enerji depolayıp, megavolt mertebesinde darbe gerilimini mikrosaniye süresinde yüke boşaltabilir. Bu üreteç, yıldırım ve EMP (elektromanyetik darbe) benzetimlerinde, X-ışını ve elektron demeti üreteçlerinde ve yüksek güçlü gaz lazerlerinde tercih edilir. Literatürde çok çeşitli Marx devresi tanımlanmıştır ve bu üreteçler sadece yüksek güçlü bir tek darbe üretmede değıl, daha düşük gerilimli, yüksek tekrarlamaya oranına sahip, yarıiletken anahtarlama ile çalışan sistemlerde de tercih edilmektedir [9].

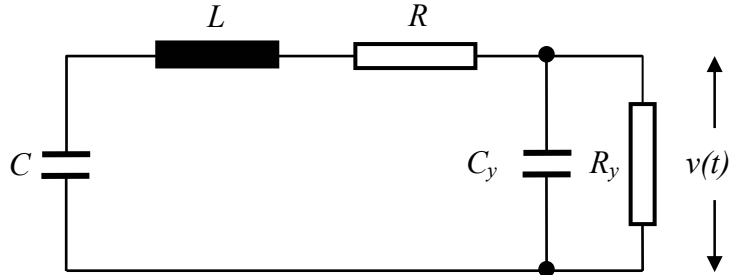
Şekil 2.5 üç katlı en basit haliyle bir Marx üretecini göstermektedir. Devrede kullanılan anahtarlama elemanı, basit, iki elektrotlu, uçlarındaki potansiyel delinme gerilimini geçince atlama gerekleşiren atlama aralıklarıdır.



Şekil 2.5. Marx üreteci prensip devresi

C kondansatörleri V doğru gerilimi ile R direnci üzerinden doldurulur ve A, C, E noktaları V potansiyeline çıkarken B, D, E noktaları sıfır potansiyelde kalır. R dirençlerinin devre çalışırken ihmal edilebilecek kadar büyük olduğu varsayılırsa $K1$ anahtarında atlama olunca B noktasının potansiyeli V ve C noktasının potansiyeli $2V$ olur. $K2$ anahtarının uçlarındaki gerilim atlamaya sebep olacağından D noktası $2V$ ve

E noktası $3V$ potansiyeline çıkacaktır. $K3$ anahtarındaki atlamayla R_y yük direncinin üzerinde $3V$ gibi bir gerilim oluşur. Böylece sistemin kazancı kat sayısı (doldurma kondansatörü sayısı) kadar, yani 3'tür. Uygulamadaki Marx üreteçlerinin yapısı biraz daha karmaşıktır zira devreye kaçak endüktans ve kapasiteler eklenir [9].



Şekli 2.6. Tek katlı Marx devresi

Marx üretecinin tek kata indirilmiş eşdeğer devresi Şekil 2.6'da verilmiştir. Bu devrenin analizini yapmak gerekirse, devredeki kapasitenin gerilimi V ise, yük üzerindeki $V(s)$ gerilimi

$$V(s) = \frac{V}{s} \cdot \frac{\left(R_y // \frac{1}{sC_y} \right)}{\frac{1}{sC} + sL + R + R_y // \frac{1}{sC_y}} \quad (2.6)$$

$$= \frac{V}{sLC_y} \cdot \frac{1}{s^3 + as^2 + bs + c}$$

olur. Burada

$$a = \left(\frac{R}{L} + \frac{1}{C_y R_y} \right), \quad b = \left(\frac{1}{LC_y} + \frac{1}{LC} + \frac{R}{LR_y C_y} \right), \quad c = \frac{1}{LCC_y R_y} \quad (2.7)$$

ile gösterilmiştir. Ters dönüşüm yapılarak $v(t)$

$$v(t) = \frac{V}{LC_y} \left[\frac{\exp(-\alpha_1 t)}{(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 - \alpha_3)} + \frac{\exp(-\alpha_2 t)}{(\alpha_2 - \alpha_1)(\alpha_2 - \alpha_3)} + \frac{\exp(-\alpha_3 t)}{(\alpha_3 - \alpha_1)(\alpha_3 - \alpha_2)} \right] \quad (2.8)$$

olarak bulunur. Burada α_1 , α_2 ve α_3

$$s^3 + as^2 + bs + c = 0 \quad (2.9)$$

eşitliğinin kökleridir. Bu kökler sadece Şekil 2.6'daki devre elemanlarının değerleri yerlerine konulduğunda bulunabilir. Köklerden bazıları sanal olacağından çıkış dalga şekli salınım gösterecektir. L ve R değerleri de, kullanılan atlama aralığına bağlı olarak zamana bağlı parametrelerdir. Hassas çözümleme, bu özelliği göz önüne almayı gerektirir.

Marx üreticinin çıkış darbe şeklinin, farklı amaçlar için (yıldırım, açma-kapama, EMP) çoğu zaman şekillendirilmesi gerekir. Bu işlem Şekil 2.6'da verilen devredeki R ve R_y dirençlerinin ayarlanması ile yapılabilir. Bu yöntemi kullanarak ve endüktansın sıfır olduğunu kabul ederek yeniden analiz yapılırsa yük üzerindeki gerilim,

$$V(s) = \frac{V}{RC_y} \cdot \frac{1}{s^2 + s \left[\frac{1}{R_y C_y} + \frac{1}{RC_y} + \frac{1}{RC} \right] + \frac{1}{RR_y CC_y}} \quad (2.10)$$

Yük direncinin seri dirençten çok daha büyük olacağı (R_y >> R) ve yük kapasitesinin doldurma kapasitesinden çok küçük olacağı (C_y << C) göz önüne alınırsa köklerden biri,

$$\beta_1 \cong \frac{1}{RC_y} \quad (2.11)$$

olarak bulunur. Ters dönüşüm ile

$$v(t) \cong \frac{V}{(\beta_1 - \beta_2)RC_y} [\exp(-\beta_2 t) - \exp(-\beta_1 t)] \quad (2.12)$$

elde edilir. Burada

$$\beta_1 \cong \frac{1}{RC_y} \text{ ve } \beta_2 \cong \frac{1}{R_y C} \quad (2.13)$$

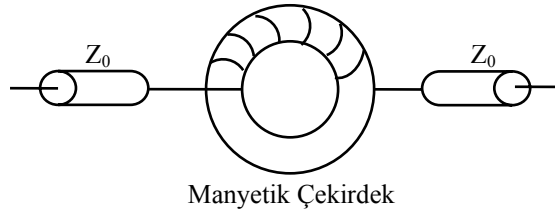
dir. $\beta_1 \gg \beta_2$ olduğu için, elde edilecek darbe, tepe değerine kısa sürede (hızlı) yükselen ve tepe değerinden uzun sürede (yavaş) düşen bir karakteristiğe sahip olacaktır. Buradan, tepe değere ulaşma (cephe, alın) süresinin R ve C_y, sırt (kuyruk) süresinin R_y ve C elemanlarının değerleriyle ayarlanabildiği sonucu çıkarılmaktadır.

2.3.5. Diğer Yöntemler

Darbe gerilimi üretmek için en sık kullanılan yöntemler geçmiş başlıklar altında verilmişti. Ancak darbe gerilimi üretmenin bir çok farklı yöntemi vardır. Daha az kullanılmakla beraber bu yöntemler çok farklı şekillerde darbe çıkışı verebilir.

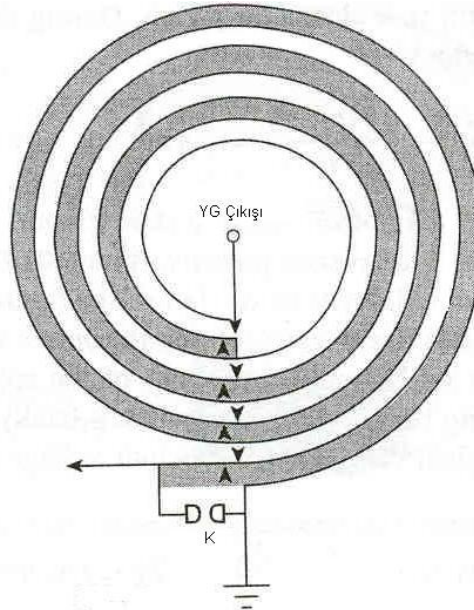
İletim hattı transformatörü, iletim hattı ile darbe gerilimi transformatörünün birleştirilmiş halidir (Şekil 2.7). Genel olarak darbe gerilimi üretmeye uygun bir çekirdek üzerine bir kablonun sarılmasıyla oluşturulur. Gerilim seviyesini yükseltmek veya cephe süresini değiştirmek için, birden çok kablo seri veya paralel olarak bağlanabilir. Çıkışta dikdörtgen darbe elde edilir.

Hata!



Şekil 2.7. İletim hattı transformatörü

Spiral üreteç, nadiren kullanılmasına karşın küçük boyutlu ve verimli bir yapısı vardır (Şekil 2.8). MV mertebesinde çok yüksek gerilim üretebilir. Teknik olarak sarmalanmış bir Blumlein üretecine benzemektedir. Spiralin her bir katı bir aktif ve bir pasif hattın oluşur. Çıkışında üçgen dalga şekline sahip darbe gerilimi elde edilir.



Şekil 2.8. Spiral üreteç

2.4. Anahtarlama

Yüksek güçlü darbe uygulamalarında tera-watt seviyesindeki güçleri pikosaniye mertebesinde sürelerde iletebilen anahtarlar yaygın olarak kullanılır. Anahtarların kapama veya açma işlevi doğal yolla, kendinden delinme ilkesi ile olabileceği gibi dışarıdan tetikleme ile de gerçekleştirilebilir. Anahtarlamanın temel prensibi oldukça basittir; belirli bir zamanda anahtar ortamının özelliğini yalıtıcıdan iletken veya tam tersi, iletken yalıtkana çevirme. Ne var ki bunu hassas ve verimli sağlamak karmaşık bir görev gerektirir. Sadece anahtar ve devre elemanlarının parametreleri değil, gerçekleşen fiziksel ve kimyasal işlemlerin de detaylı bilinmesi gerekir. Vakum anahtarları dışında, anahtar elektrotları arasındaki ortam, anahtar performansını etkileyen en önemli faktördür. Bu ortamlar maddenin farklı hallerinde olabileceğinden anahtarlar katı, sıvı, gaz ve plazma anahtarlar olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, daha birçok farklı özelliğe göre yapılabilir; tetikleme mekanizmasına göre kendinden delinen veya dışardan tetiklemeli, yüklemeye özelliğine göre statik yüklenmiş veya darbe yüklenmiş, iletim kanalına göre tek kanallı veya çok kanallı, boşalma özelliğine göre hacimsel boşalmalı veya yüzey boşalmalı vb.

2.4.1. Gaz Anahtarlar

Gaz anahtarların hemen hepsi, gazların iyonizasyonu ve delinmesi ilkesini kullanarak çalışır. Normal bir gaz, yalıtkandır ve iyonize edilirse iletken duruma geçebilir. Atlama aralıklı gaz anahtarlar en yaygın kullanılan anahtarlardır. Megaamper ve megavolt mertebelerine kadar çalışabilirler. Genel yapıları, ekranlı bir kutu içine konulan elektrotlar arasına basınçlı gaz doldurma şeklindedir. İçerideki gaz, hava ya da boşluk (vakum) olabilir. Atmosfer basıncıyla kullanılan anahtarlar da vardır. Kendinden delinmeli anahtarlar, elektrotlar arasındaki gazın delinme gerilimine ulaşıncaya atlama meydana getirerek devreyi kapatan anahtarlardır [22, 23]. Anahtarın iletim durumuna geçmesi, dışarıdan tetikleme ile de gerçekleştirilebilir [16, 24,].

Dışarıdan tetiklemeli anahtarların büyük kısmı elektriksel tetiklemelidir ve bu tür anahtarlar genel olarak trigatron olarak adlandırılır (Şekil 2.9). Bu anahtarda atlama aralığı elektrotları, dolgu gazının delinme geriliminin bir kademe altı değerinde potansiyele yükseltilir. Tetikleme elektroduna bir elektriksel darbe gönderilerek

anahtarın iletme geçmesi sağlanır. Böyle bir anahtar geniş ve verimli tetikleme aralığı, basit ve kullanışlı yapısı nedeniyle avantajlara sahiptir. Ancak bir tetikleme üretci gerektirmesi, tetikleme sisteminin ana sistemden yalıtılamaması nedeniyle yüksek gerilime maruz kalması ve tetiğin ömrünün düşük olması, trigatronun dezavantajlarıdır. Tetikleme için kullanılan bir başka yöntem, elektron demeti göndererek sistemin tetiklenmesidir. Anahtar ortamına gönderilen elektron demeti, iyonizasyonu sağlar. İyonizasyonu sağlamak için sistem UV ışın veya lazer göndererek de tetiklenebilir [16].

2.4.2. Sıvı Anahtarlar

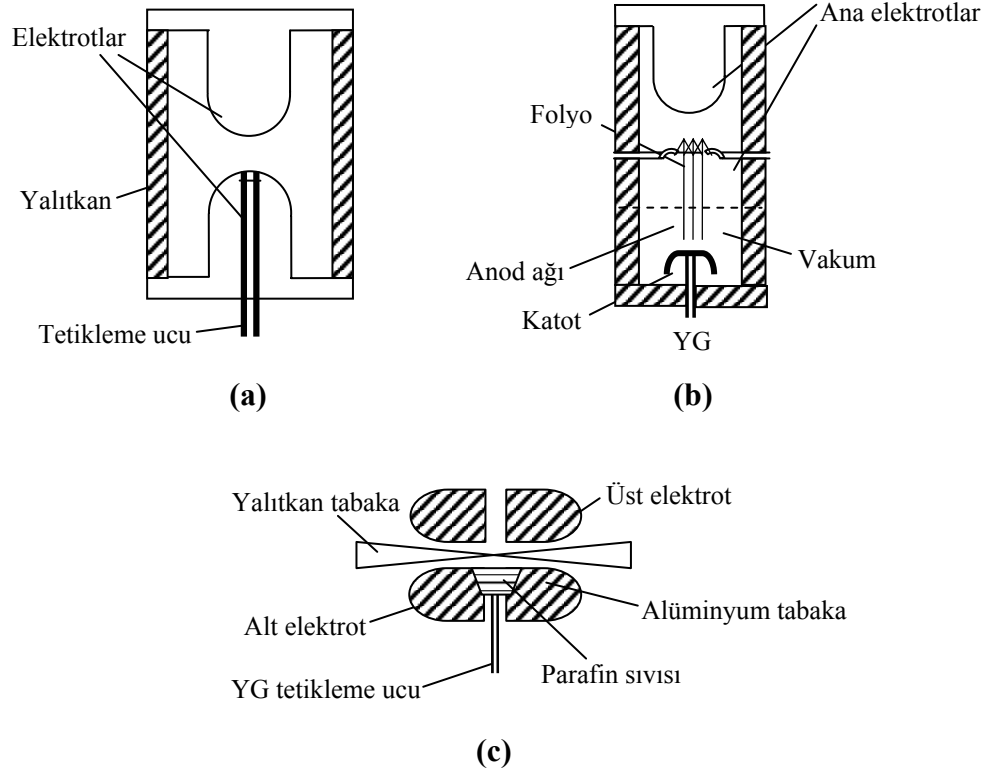
Sıvı anahtarların gelişmesi, sıvıların yüksek delinme dayanımları ve anahtar yapısına uygunlukları nedeniyle gerçekleşmiştir. Sıvı anahtarların yapısı, elemanları, çalışma ilkesi gaz anahtarlarıinki ile büyük benzerlikler gösterir. En büyük fark, anahtarlamanın meydana geldiği ortamdan, dolayısıyla gaz ve sıvıların gösterdiği fiziksel özelliklerinden kaynaklanır. Birçok sıvının delinme dayanımı 100-1000 kV aralığındadır ki bu, basınçlı gaz anahtarlardan daha yüksek gerilimi tutabileceklerini gösterir. Aynı gerilim değerinde gazlardan daha kk elektrot açıklığına ihtiyaç duymaları, daha kk endüktans oluşturmalarını sağlar ve bu nedenle düşük endüktif özellik gerektiren uygulamalarda tercih edilirler.

En sık kullanılan sıvı anahtarlama malzemesi su ve transformatör yağıdır. Su, yüksek anahtarlama hızı gerektiren uygulamalarda daha çok tercih edilir, çünkü transformatör yağında anahtarlama sırasında karbonlaşma olur ve belirli aralıklarla, oluşan karbon artıklarının alınması gerekir. Gaz anahtarlarda olduğu gibi sıvı anahtarlar da kendinden delinmeli veya dışarıdan tetiklemeli olarak çalışabilir [16].

2.4.3. Katı Anahtarlar

Katı anahtarlar, sıvı anahtarlar gibi, kk elektrot açıklığında yüksek gerilim tutabilen yapıları sayesinde düşük endüktif özellik gösterirler. Temel ilke, diğer anahtarlara benzer olarak elektrotlar arasında katı yalıtkan malzeme konularak delinme gerilimini ayarlamaktır. En büyük dezavantajı, bir defa delinme meydana geldiğinde, artık o katı yalıtkanın anahtarlama kullanılamamasıdır. Genel olarak dışarıdan tetiklemeli kullanılırlar. Tetikleme işlemi lazer ile olabileceği gibi fotoiletken yarıiletken anahtarlarda olduğu gibi ışık darbesiyle de yapılabilir.

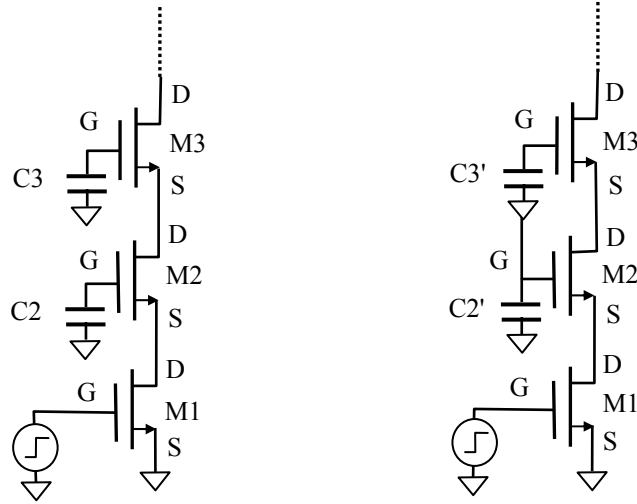
Manyetik anahtarlar da katı anahtar sınıfındandır. Burada anahtarlama işlemi, manyetik geçirgenlikte de anlık ve çok büyük değişiklik oluşturarak gerçekleştirilir.



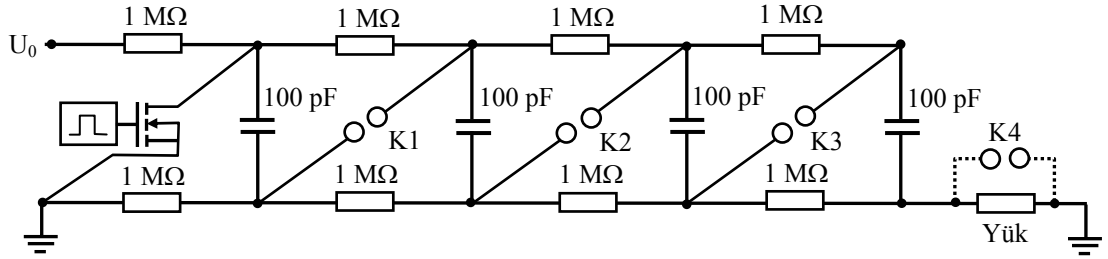
Şekil 2.9. Anahtar örnekleri: (a) gaz anahtarlardan trigatron örneği; (b) elektron tetiklemeli anahtar; (c) detonator tetiklemeli katı anahtar [16]

Günümüz teknolojisinde, darbe gerilimi üretiminde yarıiletken anahtar kullanımı yavaş yavaş yaygınlaşmaktadır. Modern güç MOSFET'leri sınırsız ömürleri, küçük fiziksel boyutları ve dirençleri ile tercih edilir olmuşlardır. Yarıiletken anahtarların en büyük dezavantajı, fazla yüksek gerilim seviyelerine çıkamamalarıdır. Bu sorunu kısmen aşmak için elemanlar seri olarak bağlanabilir (Şekil 2.10). Böylece 1-2 kV mertebelerindeki dayanımları arttırılabilir [25, 26].

Marx üreteçlerinde yarıiletken anahtarlar, atlama aralıklı anahtarlar ile beraber de kullanılabilir. Böyle bir hibrit devre, her iki anahtar tipinin avantajlarını barındırır. Genel olarak Marx üretecinin ilk atlama aralıklı anahtarının diğer kat anahtarlarından biraz önce tetiklenmesi istenir. Bunun için ilk anahtarın atlama aralığı biraz daha küçük yapılabileceği gibi, ilk tetikleme verecek anahtar olarak bir MOSFET de kullanılabilir (Şekil 2.11) [27-30].



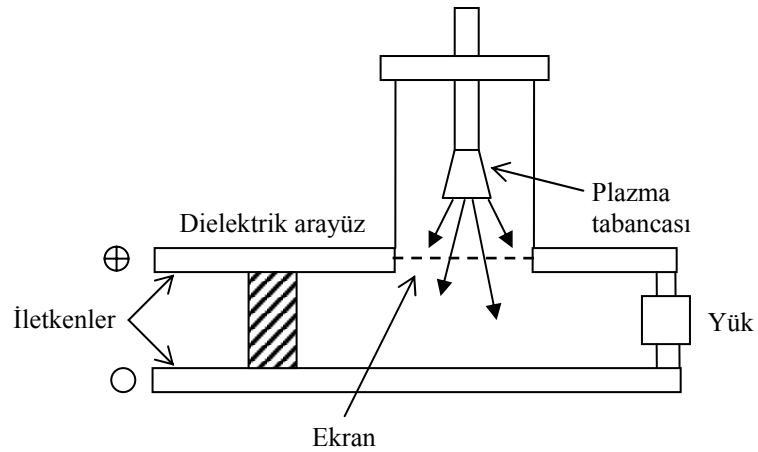
Şekil 2.10. Yarı-iletken anahtarların (MOSFET) seri bağlanması



Şekil 2.11. Tetikleme bakımından hibrit yapıda bir Marx üretici

2.4.4. Plazma Anahtarlar

Cesur bir ifadeyle yüksek güç anahtarlarının tamamı plazma anahtarlarının bir çeşidi olarak düşünülebilir. Çünkü katı, sıvı, gaz anahtarların hepsinde anahtarlama sırasında plazma yapı oluşur. Plazma anahtarlara bir örnek Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Plazma anahtar sistemi

Plazma tabancasındaki karbon plazma negatif yüklenmiş hatta doğru püskürtülür ve böylece anahtarlama ortamı, yüksek iletkenlikli plazmayla doldurulmuş olur. Vakum tüp içindeki anahtarlama işlemi, manyetik alan kullanarak, tabancaya gerek olmadan, plazmanın yayılmasıyla da sağlanabilir [16].

3. DARBE ÜRETECİ TASARIMI

3.1. Giriş

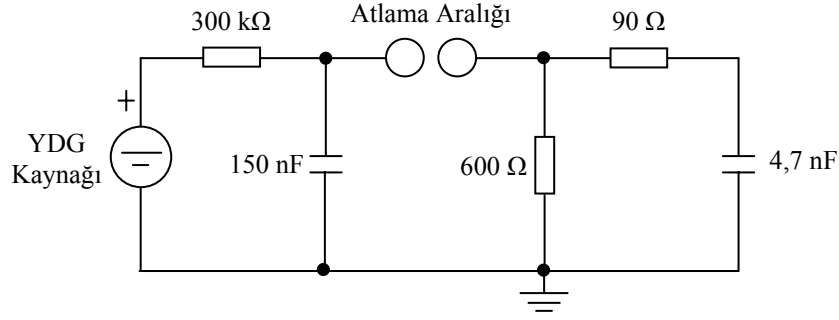
İkinci bölümde verilen bilgiler, tez kapsamında yapılması planlanan darbe üreticinin temelini oluşturmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda, gerçekleştirilmesi planlanan deneysel çalışmada kullanılacak darbe gerilimi üretici için farklı yöntemler denenmiştir. Öncelikli olarak çalışma için gerekli özellikler çıkarılmış, bu özellikleri karşılayabilecek üretici tasarlama ve gerçekleştirme yoluna gidilmiştir. Darbe gerilimi üretmenin çeşitli yöntemleri vardır ve bu yöntemler ikinci bölümde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Anlatılan her yöntemin diğer yöntemlere göre üstün ve dezavantajlı olduğu yanları vardır. Bu tez kapsamında, teorik olarak edinilen bilgilerin yanı sıra pratik olarak bu yöntemler denenmiş ve en uygun yöntem üreteç tasarımında temel alınmıştır.

3.2. Farklı Yöntemlerle Tasarım ve Gerçekleme Çalışmaları

Bu çalışma kapsamında öncelikli olarak zamanla hızlı değişen gerilim üretici tasarlanmıştır. Tasarımda kullanılan temel parametreler zaman ve gerilimdir (genlik). Buna göre ilk hazırlanan üreteç için en yüksek gerilim düzeyi olarak 10 kV uygun görülmüştür. Gerilim ayarlı bir kaynaktan elde edildiği için uygun devre elemanları kullanıldığında tepe değeri 0-10 kV arasında değiştirilebilir. Üretilecek olan darbe geriliminde mikrosaniyeden kısa sürelerde yükselme ve düşme karakteristiği hedeflenmektedir.

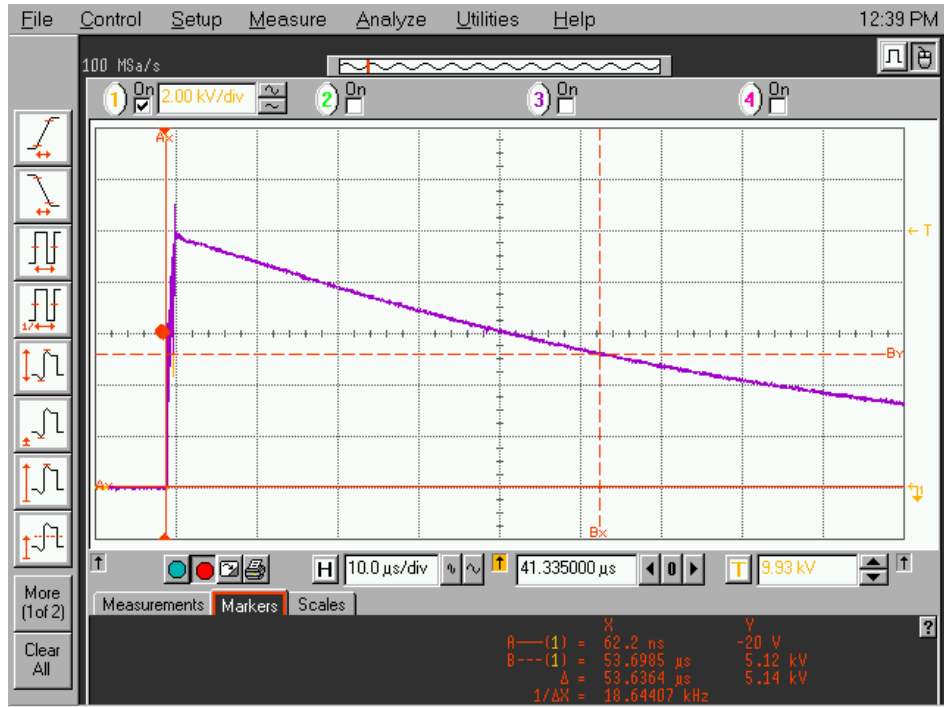
Bu veriler doğrultusunda ilk olarak kapasitelerin enerji depolama elemanı olarak kullanıldığı Marx devresi kurulmaya çalışılmıştır. Gerilim seviyesi yeterli olduğundan devrenin tek katlı olması planlanmıştır. Devre elemanlarını seçmek için önce bilgisayarda Pspice paket programı ile analiz yapılması uygun bulunmuştur.

Daha önce (yüksek lisans tezi kapsamında [1]) tasarlanıp geliştirilmiş olan yıldırım darbe üreticinin kısa süreli darbe üretimi doğrultusunda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Sözü edilen devre Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Yıldırım darbe üretici

Üreteç, 0-25 kV arasında doğru gerilim verebilen bir ayarlı kaynaktan beslenmektedir. Uygulanan doğru gerilim, 300 kΩ'luk öndirenç üzerinden devreye verilmektedir. Böylece zaman sabiti büyütüldüğü gibi, devrede oluşabilecek yüksek akımlar da sınırlanmış olur. Uygulanan gerilim ile doldurulan 150 nF'lık kondansatör, atlama aralıklı kürelerde meydana gelen atlama ile boşalmaya başlar. 90 Ω'luk direnç üzerinden dolan 4,7 nF'lık kondansatör, 90 Ω ve 600 Ω üzerinden boşalır. 4,7 nF'lık kondansatör uçlarında darbe gerilimi oluşur. Şekil 3.2'deki darbe şeklinden de görüleceği gibi tasarlanan üreteç standart yıldırım darbesi vermektedir.



Şekil 3.2. Üretilen yıldırım darbesi

Darbe şeklinin cephe süresi 1,2 μs, sırt yarı değer süresi ise 50 μs'dir. Bu süreler, hedeflenen nanosaniyelik darbeler için fazla uzundur. Darbe sürelerini düşürmek için devre eleman değerlerinde değişiklik planlanmıştır. Elde edilen darbe şeklini

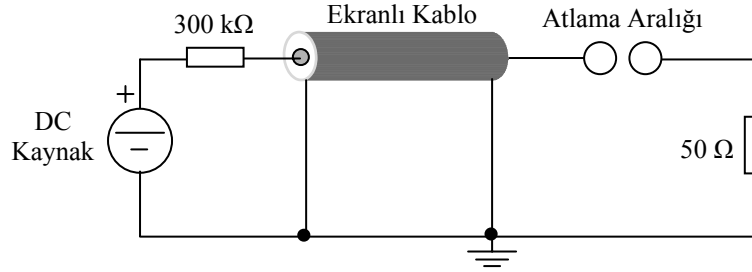
belirleyen elemanlardan ikisi, cephe ve sırt dirençleridir. Bu amaçla cephe ve sırt dirençlerinin değerleri değiştirilmiştir. Pspice analizi yapılarak kondansatörler sabit kalmak koşuluyla kullanılması gereken direnç değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlere göre devredeki dirençler değiştirilmiş ve darbe şekli görüntülenmiştir. Yeni dirençler ile elde edilen darbe oldukça bozuk ve salınımlıdır. Darbe şeklinin fazla salınımlı olması nedeniyle cephe süresi hassas ölçülememiştir. Salınımın nedeni devrede meydana gelen kaçak endüktans olarak değerlendirilmiştir. Yapılan bilgisayar analizi ile pratik sonucun birbirini eşit olarak tutmaması, kullanılan elemanlardan kaynaklanmaktadır.

İkinci yöntem olarak dalganın cephesini kesme yöntemi denenmiştir. Bu yöntemde, herhangi bir yükselme (cephe) süresine sahip darbenin cephesi, uygun tepe devresi ile kesilerek kısaltılmaktadır. Literatürde tepe devresi kullanarak cephe süresini kısaltma yöntemini kullanan birçok çalışma mevcuttur [31-33].

Tepe devresi oluşturabilmek için kondansatör ve küre çiftinden oluşan yapı, darbe üretici çıkışına bağlanmıştır. Hedeflenen sistemde, darbe üreticinin çıkışında standart 1.2/50 μ 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 pirinç küreden oluşan anahtar sistemi konulmuştur. Tanımlanan çalışmalar yapılmış, ancak tepe devresi çıkışında oldukça bozuk darbeler elde edilmiştir. Tepe devresi ile cephe süresini kısaltma yönteminin başarısız olmasının bir nedeni, düşük gerilim düzeylerinde (6-8 kV), anahtarlama amaçlı kullanılan kürelerin sayısının artması ile kararsız durum oluşturmalarıdır. Bunun yanında, küçük gerilim değerlerinde, tepe devresinde kullanılan kürelerin aralıklarının tepe değerinde atlama yapacak şekilde ayarlanması oldukça zordur ve hassas ölçme gerektirir [34].

İkinci bölümde anlatılan yöntemlerden en yaygın kullanılanlarından bir tanesi kabloların enerji depolayan eleman olarak kullanıldığı iletim hattı modelidir. Nanosaniye mertebeli darbe gerilimi üretmek için iletim hattı modeli kablo kullanma yöntemi denenmiştir. Bu yöntemde bir kablonun yüksek doğru gerilim ile

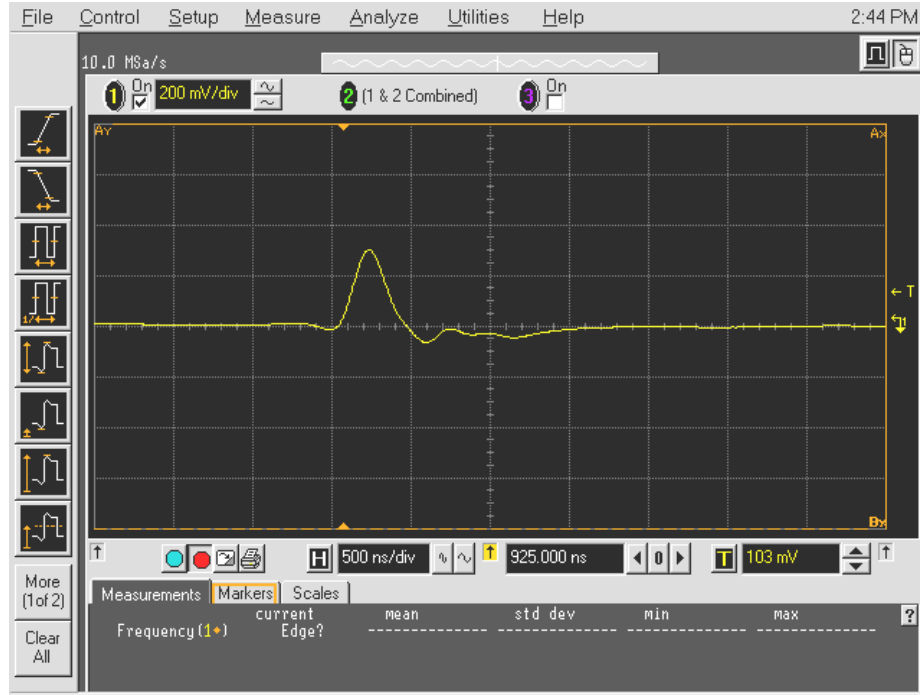
doldurulması ve daha sonra hızlı anahtarlama ile başka bir kablo ya da yüke boşaltılması ilkesi kullanılmaktadır. Bu amaçla kurulan devrede Huber Suhner firmasının N tipi koaksiyel kablosu kullanılmıştır (Şekil 3.3) [35, 36].



Şekil 3.3. İletim hattı modeli ile darbe üretici

Şekil 3.3'te de görüleceği gibi, koaksiyel kablo, 300 kΩ'luk öndirenç üzerinden beslenmiştir. Besleme olarak 25 kV'a kadar çıkabilen doğru gerilim kaynağı kullanılmıştır. Doğru gerilim kaynağının çıkış gerilimi yavaş yavaş yükseltilmiştir. Kürelerde atlama meydana gelince, kabloda biriken enerji, 50 Ω'luk yük üzerine boşalmıştır. Bu dolma-boşalma olayı, çıkışta kısa süreli bir darbe gerilimi üretir. Oluşan darbenin süresi, kablonun uzunluğu ve yük tarafından belirlenir. Hazırlanan bu devrenin çıkışında alınan gerilim, osiloskop ile görüntülenmiştir (Şekil 3.4). Elde edilen darbe, yükselme süresi ile düşme süresi birbirine yakın, nanosaniye mertebelerinde bir darbe gerilimidir. Çıkışta alınan dalga şekli cephe süresi bakımından hedeflenen darbeye yakındır. Şekil 3.4'te görüleceği gibi elde edilen darbe dalga şekli bozulmasız ve salınımsızdır. Ancak, 30 mm dış çapa sahip bu kabloda iç iletken ile dış iletken ekran arasında kullanılan dielektrik malzemenin izin verilen en yüksek işletme gerilimi katalogunda 3,7 kV olarak verilmiştir. Bu durum çalışma sırasında elde edilen darbe geriliminin genliğinin çok düşük kalmasına neden olmuştur. Gerilim genliğini yükseltmek için, daha yüksek gerilim dayanımına sahip kabloya ihtiyaç vardır. Bu amaçla orta gerilimde kullanılan 36 kV'luk tek damarlı bir kablo temin edilmiş ve yeni devre elemanı olarak seçilmiştir. Ancak bulunan orta gerilim kablosu hacim ve kütle olarak oldukça büyüktür. Kalın iletken çapına sahip olması nedeniyle esnekliği de sınırlıdır. Bu dezavantajlar, tasarlanıp gerçekleştirilmesi planlanan darbe üreticinin taşınabilir yapısına uygun gelmemektedir. Kablo kullanarak darbe gerilimi elde etmede bir başka sıkıntı ise kablonun uzunluğudur. Hedeflenen darbe zaman parametresi açısından elde edilmiş

olsa da gerilim genliği hedeflenenden oldukça küçük kalmıştır. Bu nedenle kablo üretici yöntemi bu çalışmada uygulanamamıştır.



şekil 3.4. Kablo üretici ile elde edilen darbe gerilimi

Kısa süreli darbe gerilimi elde etmek için yeni bir Marx devresi tasarımı planlanmıştır. Yeni tasarlanacak devrede sınırlayıcı koşul, tasarlanan devrenin eldeki mevcut devre elemanları ile gerçekleştirilmeye çalışılmasıdır. Daha önceki çalışma kapsamında temin edilmiş olan yüksek gerilim kondansatörleri ve dirençleri ile yeni devre tasarlanmıştır. Tasarım işleminde öncelikli olarak devre elemanlarının değeri hesaplanmıştır. Teorik hesaplama, Pspice programı kullanılarak yapılmıştır. Buna göre, eldeki mevcut kondansatörlerden büyük değeri olanları doldurma, küçük değeri olanları yük kondansatörü olacak şekilde, farklı devre elemanlarının kombinasyonları ile Pspice analizleri yapılmış ve uygun eleman değeri hesaplanmıştır. Teorik hesaplama ile tasarlanan devrenin alçak gerilim modeli yapılmıştır. Bunun için 220 V'luk şebeke gerilimi ile çalışan, girişindeki transformatörler ile yalıtılan, hesaplanmış değeriye sahip metalize polyester kondansatörler ve karbon dirençlerden oluşan devre gerçekenmiştir. Devre tek katlı Marx üretici yapısında olduğundan bir tek anahtarlama elemanı yeterli olmuştur. Yüksek gerilim devresinde kullanılması planlanan atlama aralıklı küreler yerine, alçak gerilim modelinde mikro anahtar kullanılmıştır. Besleme kaynağı ile

doldurulan doldurma kondansatörü, mekanik olarak çalışan mikro anahtarın tetiklenmesi ile devreye boşaltılmıştır.

Çıkışta elde edilen darbe şekli süre olarak, hesaplanan dalgadan oldukça farklı çıkmıştır. Hesaplanan darbe şeklindeki kısa sürelerle ulaşılamamasının nedeni, kullanılan anahtar olarak değerlendirilmiştir. El ile mekanik olarak anahtarlama, istenilen duyarlılıkta olmamaktadır.

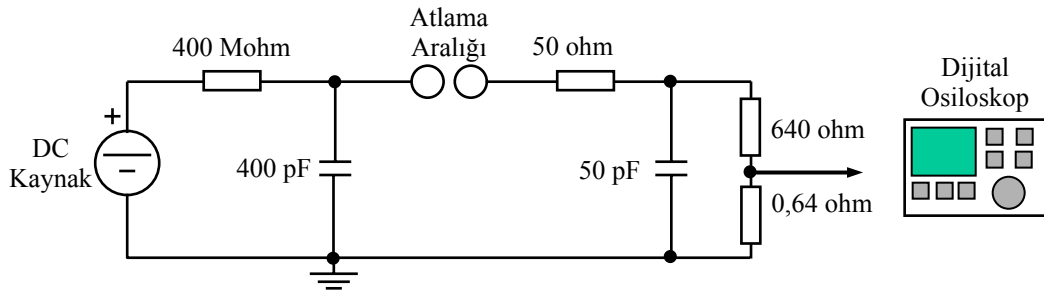
Nanosaniyelik darbe elde etmek için, kullanılan anahtarlama elemanının bu hıza elverişli olması gerekir. Daha önceki çalışmada [1], mikrosaniyelik darbe üretiminde kullanılan alçak gerilim modeli üzerinde tasarım denemesi yapma yöntemi, daha yüksek hız ihtiyacı nedeniyle bu çalışmada uygulanamamıştır. Bu nedenle, teorik olarak hesaplanan devre elemanı değerleri kullanılarak doğrudan yüksek gerilim devresi kurulmuştur. Doldurma kondansatörü olarak Dearborn firmasının 150 nF ve 17,5 kV'luk kondansatörü kullanılmıştır. Doldurma kondansatörü değiştirilmemek kaydıyla kurulan birkaç farklı devrenin hiçbiri, Pspice analizi sonucu elde edilen dalga şeklindeki nanosaniyelik darbe hızına ulaşamamıştır. Kurulan devrelerin çıkışında elde edilen darbeler mikrosaniye mertebelerinin altına inememiş, bunun yanında, yüksek örnekleme hızında görüntülendiğinde oldukça fazla salınım göstermiştir. Kullanılan yağlı tipteki kondansatörlerin kapasitif özelliklerinin, nanosaniyelik darbe gerilimi üretimi için yeterli olmadığı değerlendirilmiştir.

3.3. Üretimin Tasarımı ve Gerçeklenmesi

Hedeflenen darbe şekline ulaşmak için en uygun yöntemin, endüktif özelliği mümkün mertebe düşük kondansatör ve dirençlerle Marx düzeneği kurmak olduğuna karar verilmiştir. Planlanan gerilim düzeyi 10 kV olduğundan, Marx üreticini çok katlı yapmaya gerek duyulmamıştır. Tek katlı bir Marx devresi, kullanılan elemanların ve özellikle anahtarlama kürelerinin az sayıda olmasından dolayı daha kararlı sonuçlar verebilecektir. Önceden yapıldığı gibi eldeki elemanlara uygun olarak Pspice analizleri yapılmış ve devreyi oluşturacak kondansatör ve dirençlerin değerleri hesaplanmıştır. İlk kurulan düzeneklerde kullanılan yağlı tip 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'lık kondansatör tercih edilmiştir. Böylece oluşturulacak darbe geriliminin tepe değeri 10 kV ile sınırlandırılmıştır. Doldurma kondansatörünün pikofarad mertebesinde olması, zamanla hızlı değişen gerilim üretiminde kolaylık sağlamıştır. Kondansatörün dolma-boşalma yapısı hızlandırılmıştır.

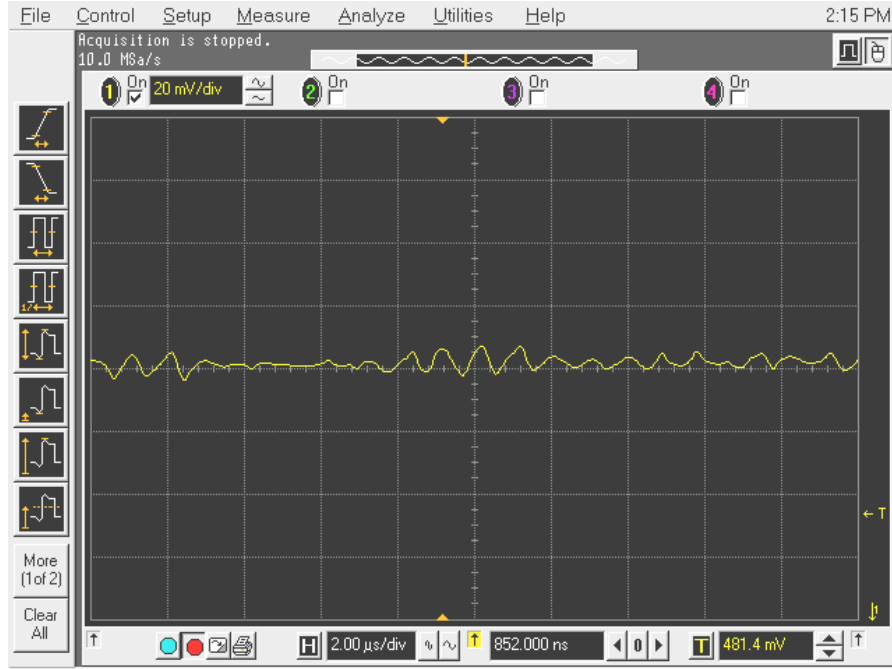
Kurulan Marx devresinde cephe süresini belirleyen direnç 50 Ω , sırt süresini belirleyen direnç ise 640 Ω olarak hesaplanmıştır. Cephe ve sırt süresini belirleyen dirençler, dışı metalik kılıfla kaplı, 60 W'lık tel dirençlerdir. Devre girişine, devrede akan akımı sınırlamak ve ardışık darbeler arasında istenen miktarda zaman aralığı bırakabilmek amacıyla 7,5 kV'luk 200 M Ω değere sahip seri bağlı iki adet öndirenç kullanılmıştır. Böylece dolma-boşalma, kaynak gerilimi ile ayarlanabilir duruma gelmiştir. Devrede hızlı anahtarlama işlemi, pirinç malzemeden yapılmış bir çift küre ile yapılmaktadır. 20 mm çaplı küreler, PVC kaide ile sabitlenmiştir. Tasarlanıp gerçekleştirilen devrenin şeması Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Tasarlanan ve gerçekleştirilen üretcin devre şeması

Gerçeklenen darbe üretci, 0-25 kV arasında ayarlanabilen doğru gerilim kaynağından beslenmektedir. Kaynak, ayarlı transformatör yardımıyla gerilimi yükselten bir ünite ile doğrultucu katından oluşmuştur. Kaynağın pozitif ucu canlı uç, negatif ucu ise toprak olarak uygulanmıştır. Devresinde sigorta dışında, asıl ve yedek olmak üzere çift koruma vardır. Akım algılayıcı, ayarlı olduğu düzey üstündeki akımlarda ve 25 kV'un üzerindeki gerilimlerde devreyi hızla kesecek özelliğe sahiptir. Mobil yapıya sahip kaynak, oluşturulan üretcin de taşınabilir olmasını sağlamıştır. 220 V, 50 Hz, 15 A girişe karşılık 25 kV doğru gerilim, 100 mA çıkış etiketine sahip kaynakta negatif-pozitif değişken kutbiyette doğru gerilim alınabilmektedir.

Devrenin besleme kaynağının üretilen darbeye etki etmemesi için mümkün mertebe temiz, dalgasız çıkış vermesi beklenir. Bu amaçla, kullanılan DC kaynağın çıkış gerilimi, yüksek hızlı osiloskop ile incelenmiştir. Şekil 3.6’da görüldüğü gibi dalgalılığın genliği 20 V’tan küçüktür.



Şekil 3.6. Doğru gerilim kaynağının çıkış dalgalılığı

Daha önceki çalışmalardan edinilen deneyim doğrultusunda atlama aralığındaki bir boşalmanın yüksek elektromanyetik yayınıma sahip olduğu bilinmektedir. Oluşan elektromanyetik ışıma, bir girişime neden olarak yakın çevresindeki duyarlı cihazları etkileyebilir. Yayınıma 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 geçen işaretlerin tek kaynağının anahtarlama elemanı olmadığı, devrenin kendi iletkenlerinin şekillenmiş işaretler yaydığı ve bu işaretlerin ölçme probuna gelebildiği görülmüştür. Bu sorun, duyarlı ölçme yapmaya engel olabildiğinden devrenin tamamının ekranlama etkinliği yüksek olacak şekilde kılıflanması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu sorunu gidermek amacıyla darbe üreteç devresinin tümü 1 mm kalınlığında sacdan yapılmış, 20 cm x 20 cm x 20 cm boyutlarında kutu içine kurulmuştur. Kutuya yüksek gerilim girişi, özel imal ettirilen

geçiş bağlacı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçme (osiloskop) çıkışı için Huber-Suhner firmasının koaksiyel N tipi şase bağlacı kullanılmıştır. Böylece giriş-çıkış bağlantılarının, kutu ekranlama etkinliğini en az düzeyde etkilemesi amaçlanmıştır. Kutu kapağının çevresi, kendinden yapışkanlı alüminyum folyo ile desteklenmiş, kutu-kapak birleşim noktalarında kaçığa neden olacak olası aralıklar kapatılmıştır.

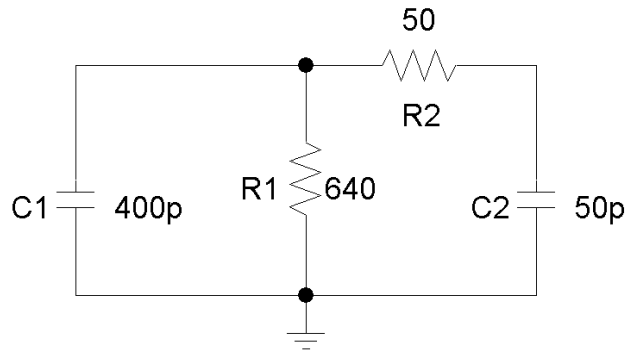
Devrenin kutu içine montajı sırasında en önemli konulardan biri bağlama, diğeri ise topraklamadır. Elemanların kendi aralarındaki bağlamaları, mümkün mertebe ara bağlantı elemanı kullanmadan, doğrudan yapılmıştır. Kullanılan kondansatörler ve dirençlerin giriş-çıkış uçları, vida-somun ile bağlamaya imkan verecek şekildedir. Devre elemanlarının birbirlerine doğrudan bağlanamadığı durumlarda, 20 mm x 1 mm'lik bakır şeritler kullanılmıştır. Bağlantı elemanları mümkün mertebe kısa seçilmiş ve bağlantılar sıkı yapılmıştır. Bağlantı elemanı olarak kablo kullanımı veya uzun bağlantı yapılması, devreye ek kaçak endüktans getirecektir. 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 olacaktır. 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 (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Gerçeklenen üreticinin iç devresi

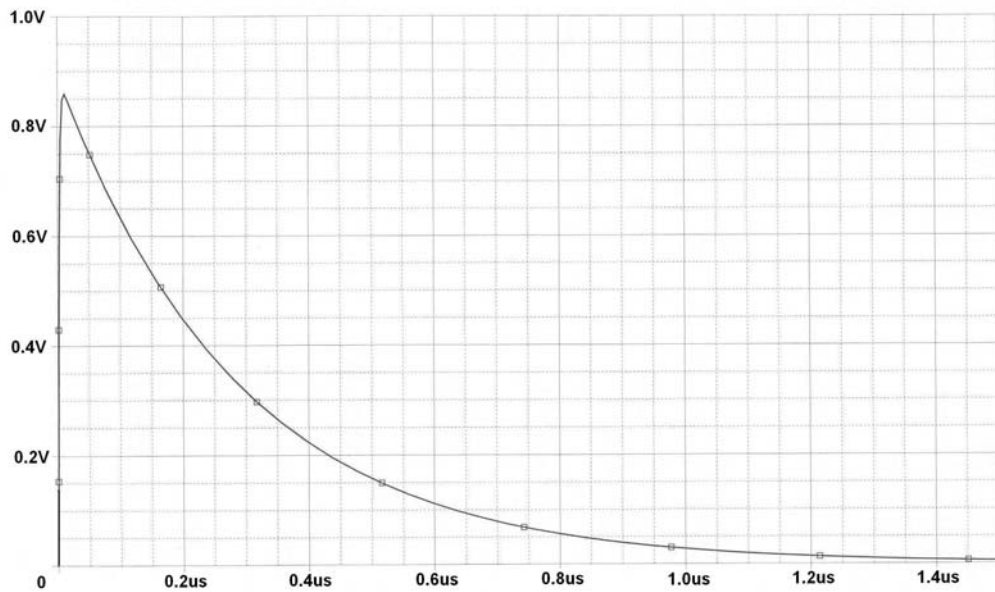
3.3.1. Devre Elemanlarının Frekansa Göre Tanımı

Tasarlanmış olan devrenin elemanları, daha önce de belirtildiği gibi Pspice ile hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerle kurulan devrenin uygulamada aynı sonucu vermesi mümkün değildir. Bunun nedenlerinden biri, teorik hesaplamada bulunan değerlerin ideal yapıda olması yani saf kapasite veya dirençten oluşmasıdır. Oysa ki pratikte hiçbir eleman ideal durumdaki gibi değildir. İkinci neden ise, hesaplamanın doğru akım değerleri üzerinden yapılmasıdır. Birçok eleman, artan frekans ile empedansında değişiklik gösterir. Bu tez kapsamında tasarlanan devre nanosaniyelik işaretler üreteceğinden, frekans oldukça yüksektir.



Şekil 3.8. İdeal durumdaki devre elemanları

Şekil 3.8, hesaplanan değerlerle oluşturulan devre ve Şekil 3.9 bu devrenin Pspice analizi sonucunda elde edilen dalga şeklini göstermektedir. Bu sonuç, devre elemanlarının ideal olduğu duruma ilişkindir.

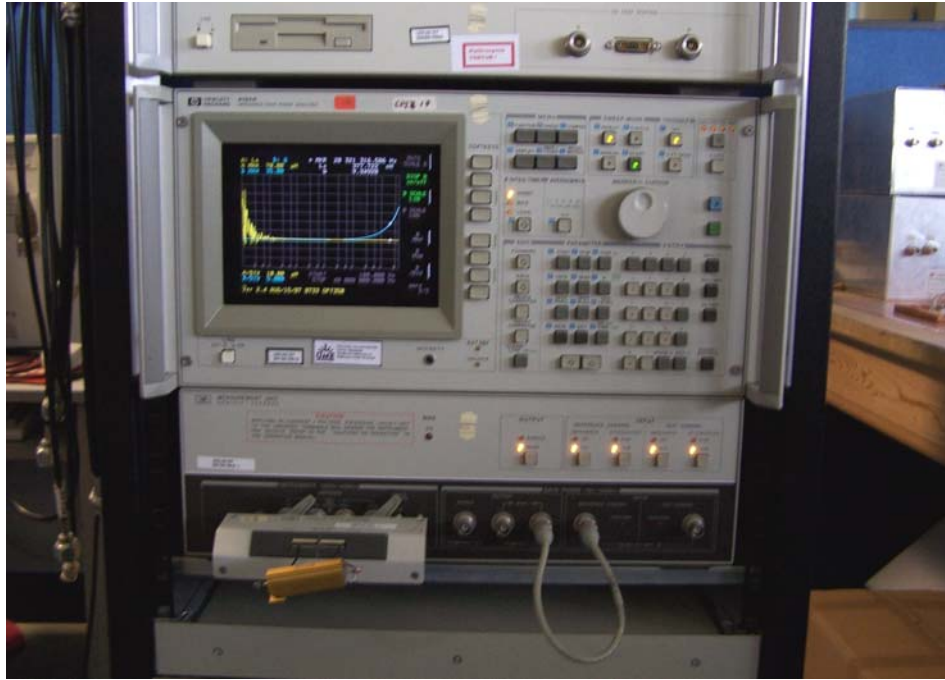


Şekil 3.9. İdeal durumdaki devrenin verdiği Pspice çıktısı

Uygulamada alınacak sonucu daha gerçekçi görebilmek için devre elemanları üzerinde ayrıntılı çalışma yapılmıştır. Burada hedeflenen sonuç, devre elemanlarının empedansını belirleyen değerleri gerçek durumda belirlemek ve elemanların yüksek frekansta gösterecekleri elektriksel özellikleri hesaba katabilmektir. 100 ns’lik bir darbe gerilimi, frekans bölgesinde

$$f[Hz] = \frac{1}{T[s]} \Rightarrow \frac{1}{100 \cdot 10^{-9}[s]} = 10 \cdot 10^6 Hz = 10 MHz \quad (3.1)$$

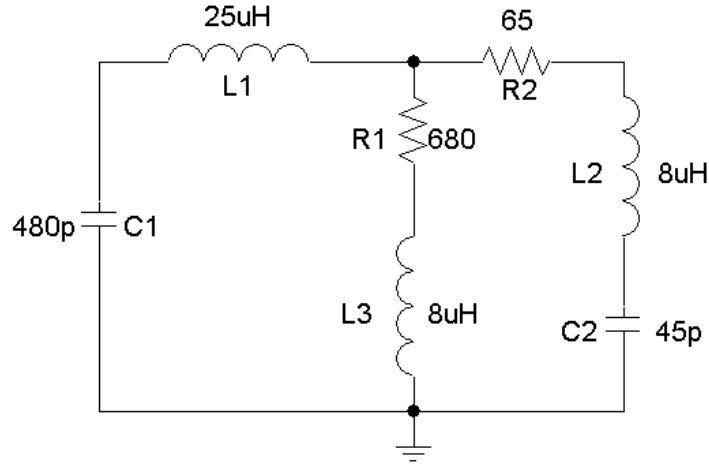
bir işarete karşılık düşer. Devreyi oluşturan direnç ve kondansatörlerin 10 MHz’de, doğru akım değerlerinden farklı değer göstermesi beklenmektedir. Bu nedenle direnç ve kondansatörlerin yüksek frekanslardaki değerleri, HP firmasının 4194A model empedans analizörü ile ölçülmüştür (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Empedans analizörü

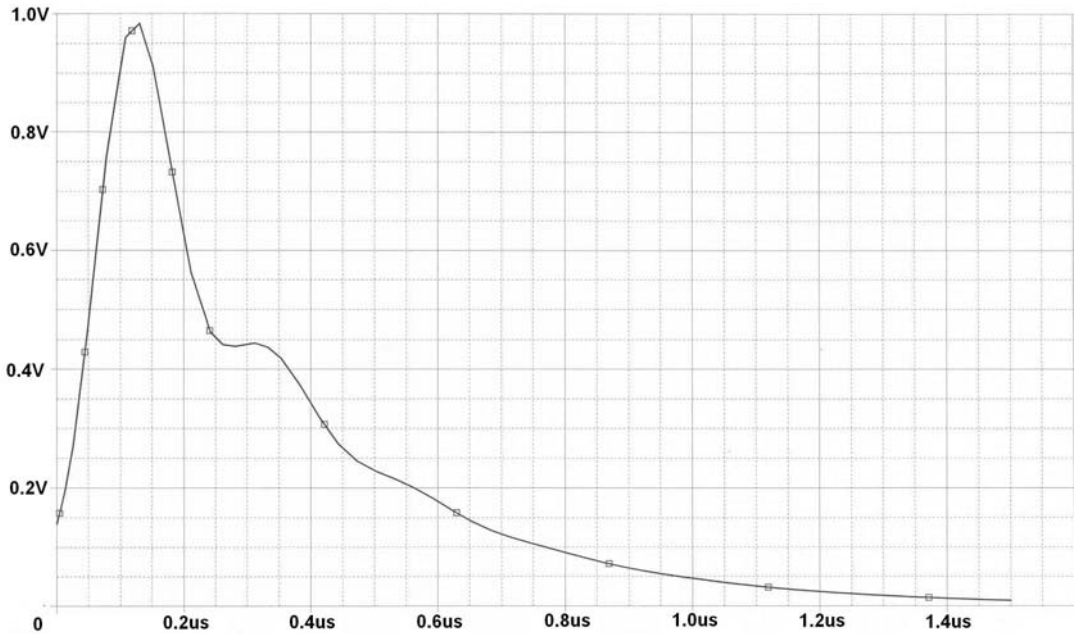
Kullanılan cihaz 100 Hz – 40 MHz frekans aralığında, giriş uçlarına bağlanan elemanın direnç, kapasite, endüktans, empedans, admitans, faz açısı gibi elektriksel özelliklerini gösterebilmektedir. Devreyi oluşturan direnç ve kondansatörler Şekil 3.10’da gösterildiği gibi cihaza bağlanmış, 100 Hz – 10 MHz aralığı taranmış, değerlerin frekansla değişimi çizdirilmiş, daha sonra 100 Hz, 1 kHz, 1 MHz ve 10 MHz frekanslarında gösterdikleri direnç, kapasite ve endüktans değerleri kaydedilmiştir. Elemanların 100 Hz’de gösterdikleri değerler, Şekil 3.8’de verilen

devrenin değerlerine çok yakındır. Ancak 10 MHz’te elemanlar, doğru akım değerlerinden sapmıştır. Şekil 3.11, devre elemanlarının 10 MHz’te gösterdikleri kapasite, endüktans ve dirençlerin eklenmesinden sonra, Şekil 3.8’deki devrenin almış olduğu şekli göstermektedir.



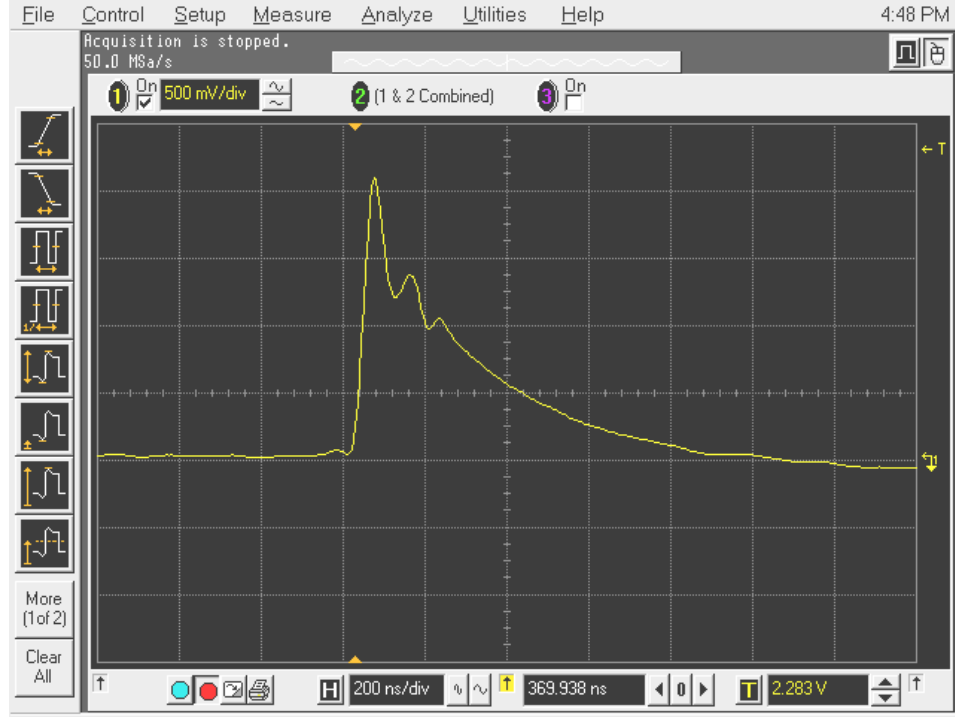
Şekil 3.11. Elemanların 10 MHz’deki değerleriyle devre şeması

Bu devrenin Pspice analizi sonucunda hesaplanan dalga şekli ile tasarlanıp gerçekleştirilen yüksek gerilim darbe üreticinin çıkışında osiloskop ile gözlenen dalga şekli sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’te verilmiştir.



Şekil 3.12. Şekil 3.11’de verilen devrenin Pspice analizi çıktısı

Teorik olarak hesaplanan ve pratik olarak elde edilen darbelerin birbirlerine çok yakın karakteristiklere sahip oldukları görünmektedir. Devrenin yüksek frekansta eleman değerlerinin belirlenmesine rağmen, anahtarlama elemanı olarak kullanılan kürelerin empedans özellikleri tahmini olarak devreye katılmıştır.



Şekil 3.13. Gerçeklenen devrenin çıkış darbe şekli

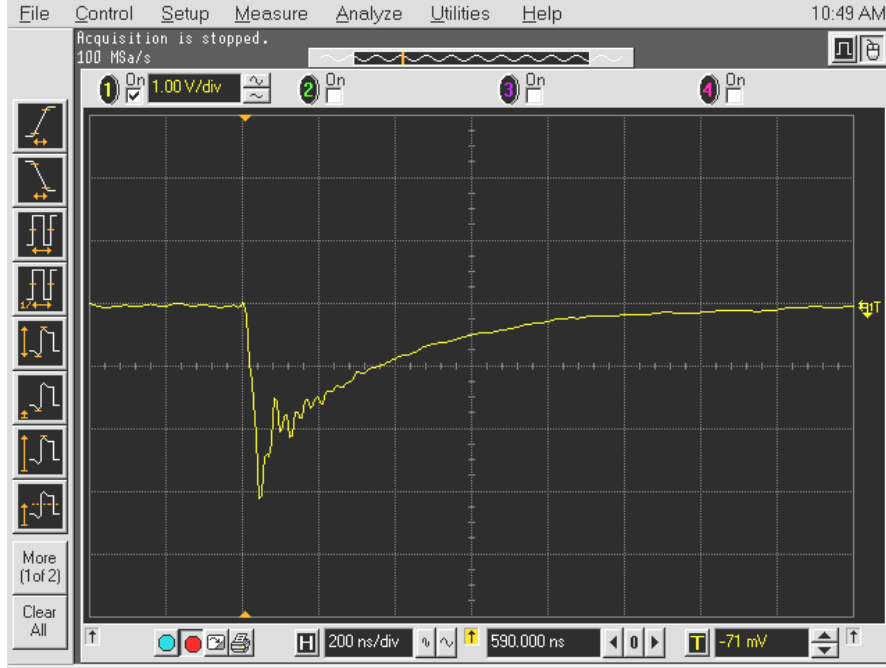
Bunun yanı sıra devredeki her bağlantı, ek direnç ve endüktans getirecektir. Bu küçük değerler ihmal edilmiştir. Pspice analizi sonucu elde edilen dalga şekli ile uygulamada ölçülen dalga şekli arasındaki küçük farklar, ihmal edilen değerlerden kaynaklanmaktadır.

Tasarlanan ve gerçekleştirilen üreteç, pozitif ve negatif çıkış verebilmektedir. Üretilen darbenin kutbiyeti, üreticinin beslemesini sağlayan doğru gerilim kaynağının kutbiyeti ile belirlenmektedir. Elde edilen negatif darbe gerilimi Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi, negatif darbe gerilimi, üretilen pozitif darbe ile aynı cephe ve sırt sürelerine sahiptir.

3.4. Değerlendirme

Bu bölümde yapılan çalışmada, yapılması planlanan deneysel çalışmada kullanılacak hızlı darbe gerilimi üretici tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Tasarım işlemi, farklı

yöntemlerin denendiği bir süreç sonunda gerçekleşmiştir. Eş eksenli (koaksiyel) yapıdaki kablo demetinin yüksek gerilim ile doldurulup hızlı anahtarlama ile boşaltılması yöntemi literatürde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Üretimin taşınabilir yapıda olması planlandığından, bu yöntem başarılı olmasına rağmen uygulanamamıştır.



Şekil 3.14. Üretilen negatif darbe gerilimi

Yaygın olarak kullanılan bir başka yöntem tepe devresi (peaking circuit) kullanarak cephe süresini kısaltmaktır. Bu yöntem denenmiştir ancak bu çalışmada ihtiyaç duyulan gerilim düzeyleri (5 kV – 9 kV), tepe devresi yönteminin kullanıldığı çalışmaların gerilim düzeyleri yanında düşük kalmaktadır. Bu yöntemin kullanılabilmesi için tepe devresinin anahtarlama elemanında hassas ayarlama olanağı gerekmektedir. Literatürde Marx devresinin tek başına hızlı darbe gerilimi üretici olarak kullanıldığı çalışma sayısı çok azdır. Bunun nedeni, çalışmalarda gereken yüksek veya çok yüksek gerilimin tek katlı Marx devresi ile sağlanamaması, çok katlı Marx devresinde ise kullanılan devre ve anahtarlama elemanlarının sayısının fazla olması nedeniyle kararlı ve bozulmaya uğramamış hızlı darbelerin elde edilememesidir. Genel olarak Marx üreticinin çıkışı tepe devresi ile kesilmiş veya üretilen darbe, kablo sistemine uygulanarak bu bölümde hızlandırılmıştır. Bu bakımdan bu tez çalışmasında kullanılan gerilim düzeyinin 10 kV ile sınırlı olması tek katlı Marx devresinin doğrudan hızlı darbe üretiminde kullanılabilmesini olanaklı

kılmıştır. Hızlı darbe elde edebilmek için denenen yöntemler sonucunda enerji depolayan elemanların (kondansatör) yapısının bu amaca uygun olması, anahtarlama elemanının yeterince hızlı olması, bağlantı elemanlarının sayısının mümkün mertebe az tutulması, elemanların kaçak empedans oluşturmaması için kısa ve şerit şeklinde seçilmesi, bağlantıların oldukça sıkı yapılması, devre içindeki bölümlerin ve devrenin kendisinin verimli biçimde elektromanyetik ekranlanması ve mutlaka toprak geçiş direnci düşük, toprağa yakın hatta toprak düzlemi üzerinde çalışılması gerekliliği sonucuna ulaşılmıştır.

Bu bölümde yapılan diğer bir çalışma, devreyi oluşturan elemanların farklı frekansta gösterdikleri direnç, kapasite ve endüktans özelliklerinin çıkarılmasıdır. Böylece tasarım aşamasında elemanların bu özellikleri kullanılarak ideal durumda oldukları varsayımıyla yapılacak hata önlenmiştir.

4. HIZLI DEĞİŞEN DARBE GERİLİMLERİNİN ÖLÇÜLMESİ

4.1. Giriş

Üretilen darbe gerilimini ölçme ve görüntüleme için Agilent firmasının Infinium model osiloskobu kullanılmıştır (Şekil 4.1). 1 GHz'lık bu osiloskop Windows 98 işletim sistemi ile çalışmaktadır. 4 GSa/s örnekleme hızına çıkabilmektedir. Nanosaniyelik işaretleri doğru ve hassas görüntüleyebilmek için yüksek örnekleme hızı gerekmektedir. Bu nedenle kullanılan osiloskop tez çalışmasında hedeflenen ölçmeler için uygundur. Osiloskop dört kanala sahiptir. Böylece aynı anda farklı işaretler incelenebilmektedir. Zaman bölgesinde görüntülenen işaretlerin Fourier dönüşümü ile frekans bölgesindeki görünümü de osiloskop tarafından gösterilebilmektedir.



Şekil 4.1. Ölçme ve görüntülemede kullanılan osiloskop

Tasarlanan ve gerçekleştirilen devrede farklı ölçme sistemleri kullanmak mümkündür. Girişte besleme olarak kullanılan doğru gerilim kaynağı, bir voltmetreye ve bir ampermetreye sahiptir. Voltmetre kullanılarak üç farklı aralıkta ölçme yapılabilir.

Buna göre düşük ölçek 0-5 kV, orta ölçek 0-10 kV ve yüksek ölçek 0-25 kV ölçe sınıır değerlerine sahiptir. Kaynağın voltmètresinin ölçüm değerleri, daha yüksek duyarlılığa sahip bir voltmetre (multimetre) ve yüksek gerilim probu kullanılarak doğrulanmıştır. Bu sistem giriş gerilimini ölçmede kullanılmıştır. Kaynağın üzerinde bulunan ampermetre ise, kaynak çıkışındaki akımı mA cinsinden ölçmektedir. Ampermetrenin göstergesi düşük ölçekte 0-25 mA, orta ölçekte 0-50 mA ve yüksek ölçekte 0-100 mA sınıır değerleri arasında ölçme yapabilmektedir (şekil 4.2).



şekil 4.2. Kullanılan doğru gerilim kaynağı

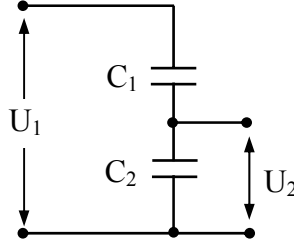
Ölçme ve görüntüleme için kullanılan osiloskop, en fazla 100 V'luk tepe değerini giriş olarak kabul edebilmektedir. Elde edilen yüksek darbe gerilimini ölçmek için bu gerilimin ölçü aletinin girişine uygun düzeye indirilmesi gerekir [37, 38].

4.2. Kapasitif Gerilim Bölücü ile Ölçme

Üretecin çıkışında elde edilen darbe gerilimini ölçmenin farklı yöntemleri vardır. Devre gerçeklendikten sonra ilk tercih edilen yöntem, kapasitif gerilim bölücü yardımıyla darbe gerilimi ölçmesidir. Bu yöntemin ilkesi (4.1) ve (4.2) numaralı formüllerle ve şekil 4.3 ile verilmiştir.

$$U_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \cdot U_2 \quad (4.1)$$

$$\ddot{u} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (4.2)$$



Şekil 4.3. Kapasitif gerilim bölücü ile ölçme

Bu $\ddot{u}$ çevirme oranı bağıntısına göre, üretcein çıkışındaki C_1 yük kondansatörüne seri olarak $C_2 = 5 \text{ nF} = 5000 \text{ pF}$ değerinde ölçme kondansatörü bağlanmıştır. Elde edilen çevirme oranı

$$\ddot{u} = \frac{5000 \text{ pF} + 50 \text{ pF}}{50 \text{ pF}} = \frac{U_1}{U_2} \approx 100 \quad (4.3)$$

olmuştur. Çıkış dalga şeklini gözlemek için osiloskop C_2 ölçme kondansatörü uçlarına bağlanmış, okunan genlik değerinin 100 katı, çıkışta alınan gerçek değeri vermiştir. Genlik olarak hedeflenen amaca ulaşılmasına rağmen kullanılan ölçme kondansatörü dalga şeklini oldukça bozmuş, bu nedenle cephe ve sırt sürelerinde hassas ölçme yapılamamıştır.

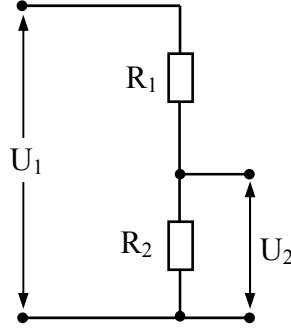
4.3. Dirençsel Gerilim Bölücü ile Ölçme

İkinci yöntem olarak dirençsel gerilim bölücü planlanmıştır [39]. Bu sistem için darbenin sırt süresini belirleyen $640 \text{ } \Omega$ 'luk dirence seri $0,64 \text{ } \Omega$ 'luk direnç bağlanmıştır. $0,64 \text{ } \Omega$ 'luk direnç üzerinden ölçme yapıldığında görülen genlik değeri, gerçek çıkış genliğinin binde biridir:

$$\ddot{u} = \frac{640 \Omega + 0.64 \Omega}{0.64 \Omega} = \frac{U_1}{U_2} \approx 1000 \quad (4.4)$$

Şekil 4.4 dirençsel gerilim bölücü ile ölçme ilkesini göstermektedir. Devrenin ekranlama etkinliğini bozmadan ölçme yapabilmek için üretce kutusu üzerine ekranlı N tipi eş eksenli bağlaç monte edilmiştir. Üreteç çıkışına kurulan dirençsel ölçme

sistemi, BNC uçlu ekranlı kablo ile bu bağlaca bağlanmıştır. Böylece elektromanyetik yayını en az düzeyde tutarak ölçme yapılabilir. Darbe ölçme ve görüntüleme için, bu bağlaç ile osiloskop girişi BNC uçlu kablo ile doğrudan birleştirilebilmekte, böylece prob kullanarak yapılan ölçmedeki yetersiz bağlantıdan kaynaklanan kayıplar engellenebilmektedir.



Şekil 4.4. Dirençsel gerilim bölücü ile ölçme

4.4. Yüksek Gerilim Probu ile Doğrudan Ölçme

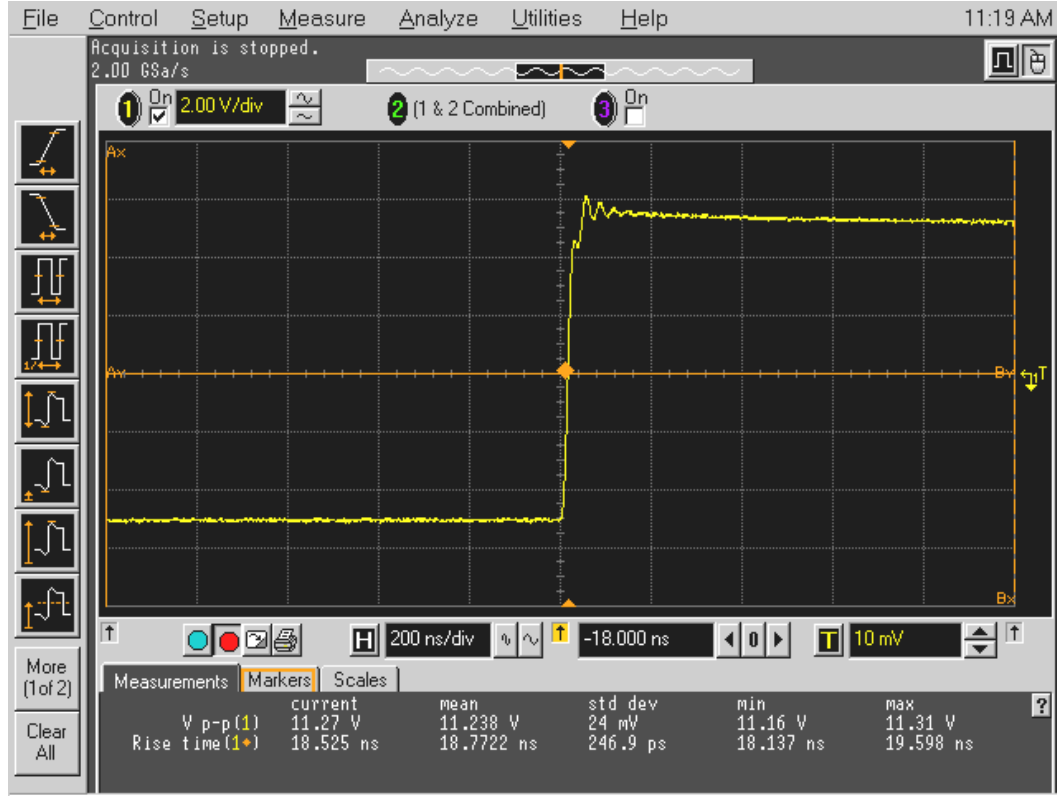
Ölçmede kullanılan diğer bir yöntem, gerilim bölücüye gerek kalmadan, doğrudan yüksek gerilim probu ile gerilimi ölçmektir [37, 38]. Bu amaçla Şekil 4.5'te fotoğrafı görülen HP 34111A yüksek gerilim probu kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Yüksek gerilim probu

Prob, 40 kV doğru gerilim değerine kadar kullanılabilir. 1000:1 çevirme oranına sahip olan bu prob, kilovolt olarak üretilen işaretleri osiloskoba volt olarak iletmektedir. Bu çevirme oranı ölçmede kolaylık sağlamaktadır. Prob, osiloskoba BNC bağlacı ile bağlanmaktadır. Probun topraklaması için ucunda kısa kablolar bulunan ayrı bir kablodan yararlanılmaktadır. Probun gerilim alıcı ucu, sivri uç veya kanca şeklinde değiştirilebilmekte ve ölçülecek gerilime temas ile ulaşmaktadır. Harici toprak kaskası ise en yakın topraklama iletkenine bağlanmaktadır.

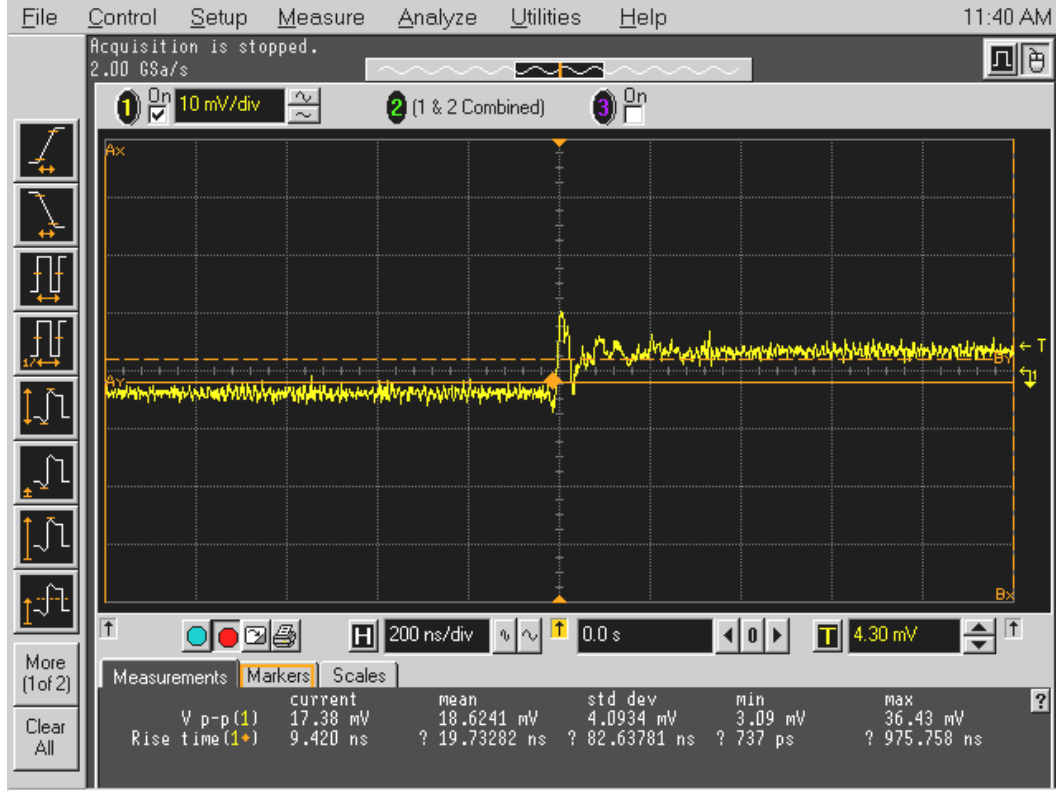
Kullanılan yüksek gerilim probunun performansını izlemek için kalibrasyon deneyi yapılmıştır. Bu amaçla HP 33120A model işaret üretici ile dalga şekli bilinen bir işaret üretilmiştir. Üretilen kare dalga, üretici çıkışı BNC kablo ile doğrudan dijital osiloskoba bağlanarak görüntülenmiştir. Şekil 4.6’da görüldüğü gibi darbe 10 V genliğe sahip, yaklaşık 18 ns’de tepe değerine ulaşan dalga şeklindedir.



Şekil 4.6. Kalibrasyon darbesinin doğrudan ölçülmüş şekli

Aynı kare dalga, bu defa yüksek gerilim probu üzerinden osiloskoba verilmiştir. 1000:1 çevirme oranı, volt mertebeli gerilimlerin milivolt olarak okunmasını sağlar. İşaret üretici en fazla 20 V tepe-tepe gerilimi üretebilmektedir. Dalgayı rahat görüntüleyebilmek için üretici bu gerilim değerine alınmıştır. Şekil 4.7, yüksek gerilim probunun performansını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi, yaklaşık 19

mV genliğe sahip dalga yaklaşık 19 ns’de tepe değerine ulaşmaktadır. Üreteç çıkışını doğrudan ölçme ile yüksek gerilim probu kullanarak ölçme arasında genlik ve yükselme süresi bakımından %5’lik bir sapma vardır ve bu sapma kabul edilebilir düzeydedir. Prob ile yapılan ölçmede ölçülen işaret doğrudan ölçmeye göre biraz daha bozuktur. Bu bozulma ve %5’lik değişim, probun ekransız kablusunun elektromanyetik kirlenmesi ve temas kayıplarından kaynaklanmaktadır.



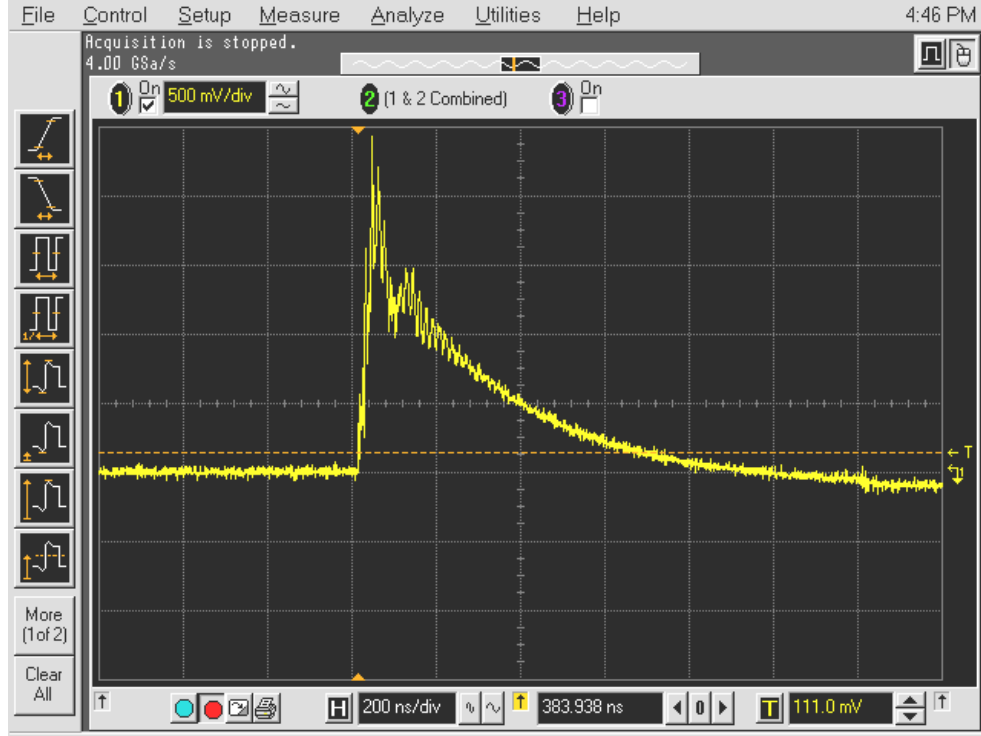
Şekil 4.7. Kalibrasyon darbesinin yüksek gerilim probu ile ölçülmüş şekli

4.5. Ölçme ve Görüntüleme Duyarlılığı

Tasarlanan ve gerçekleştirilen darbe gerilimi üreticinin çıkışı, dirençsel gerilim bölücü üzerinden alçak gerilim probu ile veya doğrudan yüksek gerilim çıkışından yüksek gerilim probu ile ölçülebilmektedir. Ölçmenin alınacağı çıkışlar özel yapılmıştır. Dirençsel bölücü kutunun ekranlama etkinliğini bozmayacak bağlaç ile dışarı ulaştırılmıştır. Kutuda alçak gerilim ölçmesi ile yüksek gerilim ölçmesi kutunun farklı iki tarafından alınmış, böylece devre içinde alçak gerilim – yüksek gerilim ayırımı yapılmıştır.

Ölçme ve görüntülemeye kullanılan dijital osiloskobun özellikleri daha önceki bölümlerde anlatılmıştır. Osiloskop 4 GSa/s örnekleme hızına çıkabilmektedir. Şekil

4.8, yüksek gerilim probu kullanarak osiloskobun 4 GSa/s örnekleme hızında ölçülen pozitif darbe gerilimini göstermektedir. Kaynaklar kısmında verilen çalışmaların hiçbirinde ve genel olarak yapılan literatür araştırmasında bu örnekleme hızında yapılan ölçmeye rastlanılmamıştır. Yüksek duyarlılıklı ölçme sayesinde darbe dalga şeklinin cephe-sırt süreleri belirgindir.



Şekil 4.8. Üretilen darbe geriliminin 4GSa/s örnekleme hızında görüntüsü

4.6. Değerlendirme

Hızlı darbe gerilimlerinin üretilmesi, bunların doğru ölçülememesi durumunda anlamlı şekilde kullanılamaz. Hızlı darbe gerilimlerini ölçme, kullanılacak ölçme sisteminin bazı gelişmiş yeteneklerinin bulunmasına gereksinim duyar. Yapılan literatür çalışmasında incelenen kaynaklarda yüksek darbe gerilimini ölçme konusunda ortak olarak karşılaşılan durum, ölçme işleminin gerilimi bölme yöntemi ile gerçekleştirilmesidir. Gerilim bölme devreleri genel olarak dirençsel, kapasitif veya her iki yöntemin beraber kullanıldığı karma (hibrit) yapıdadır. Bu tez çalışmasında dirençsel ve kapasitif gerilim bölücü devreler kullanılmış, dirençsel gerilim bölücü daha düzgün darbe görüntülemeye olanak verdiği için bu yöntem seçilmiştir.

Kullanılacak ölçme devresinin ölçmeye etki etmemesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada bozulmasız hızlı darbe geriliminin üretildiği, ancak kullanılan ölçme sistemine göre darbeyi görüntülemeye bozulmaların oluşabildiği izlenmiştir. Bu çalışmada ölçme amacıyla kullanılan yüksek gerilim probunun ölçmeye etkisini değerlendirmek için kalibrasyon deneyi yapılmış ve ölçmede yapılan hata miktarı gözlenmiştir. Elde edilen hızlı darbenin görüntülenmesi için hızlı osiloskopların kullanılması gerekir. Bu çalışmada üretilen darbenin hızına göre yeterli derecede hızlı bir osiloskop kullanılmıştır. Görüntülenen darbe şekli osiloskobun örnekleme hızı ve zaman bölmeleri değiştirilerek hassas olarak incelenebilmiştir.

Yüksek frekans çalışmalarında ölçülen sistemin ölçme sistemine etkide bulunması mümkündür. Bu nedenle ölçme aşamasında, darbe üretici yarı yansız ekranlı oda içine konulmuş, ölçme sistemi ise bu odanın kontrol odasına alınarak elektromanyetik etkilenmeden uzak ölçme sağlanmıştır.

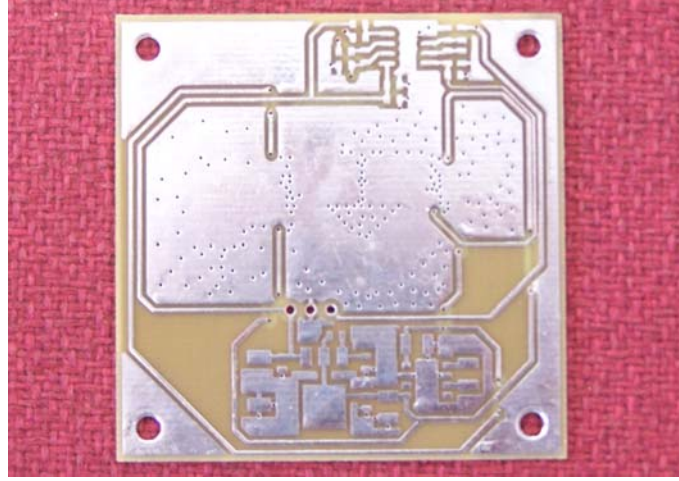
5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Giriş

Tez çalışmasında tasarlanmış ve gerçekleştirilmiş olan kısa süreli darbe gerilim üretici ile genliği 1 kV-10 kV arasında ayarlanabilen, yaklaşık 50 ns içinde tepe değerine erişen ve 200 ns'de sırtta tepe değerin yarısına düşen darbe gerilimleri elde edilmiştir. Tezde amaçlanan çalışma, zamanla hızlı değişen gerilimler karşısında elektriksel ve elektronik sistemlerin davranışlarını belirlemeye yardımcı olacak veriler elde etmektir.

Elektriksel ve elektronik cihazlar, devre kartlarından oluşur. Doğal ya da yapay yolla meydana gelebilecek bir elektromanyetik darbe (EMP: electromagnetic pulse), elektronik aygıtlar üzerinde istenmeyen gerilimler endükleyip, aygıt içinde istenmeyen akımların akmasına neden olabilir. Yapılan çalışmada, elektronik aygıtların elemanlarını üzerinde bulunduran devre kartlarında EMP veya benzeri başka bir olgu ile endüklenen gerilimler sonucu meydana gelebilecek boşalma olayları incelenmiştir. Hızlı değişen geçici işaretler elektronik kartlarda farklı etkilerde bulunabilir [40]. Doğrudan kartın zarar görmesinin yanında, üzerinde meydana gelen boşalmalarla devre elemanlarının yanması da mümkündür. Oluşabilecek hızlı değişen geçici yüksek gerilimin elektronik devre kartlarında yaratacağı etkiyi incelemek için örnek bir devre kartı hazırlanmıştır.

Bu kart hazırlanırken çeşitli alanlarda kullanılan çeşitli görevleri yerine getiren birçok elektronik devre kartı incelenmiş ve akım yolu örnekleri çıkarılmıştır (Şekil 5.1). Farklı amaçlar için kullanılan (RF, kontrol, alıcı-verici, işlemci, görüntüleme vb.) kartlarda en çok karşılaşılan geometriler örnek kart için seçilmiştir. Bu geometriler paralel hatlar, köşeli-sivri uçlu hatlar, açılı dönüşler, yay şeklinde dönüşlerden oluşmaktadır [41, 42]. Kullanılan devrelerde izlenen yollar, kartın büyüklüğüne bağlı olarak birbirleri arasında farklı mesafelere sahiptir. Kartın bir yüzeyi doğrudan referans toprak olabileceği gibi sadece ince bir iletken toprak hattı da bulundurabilir.



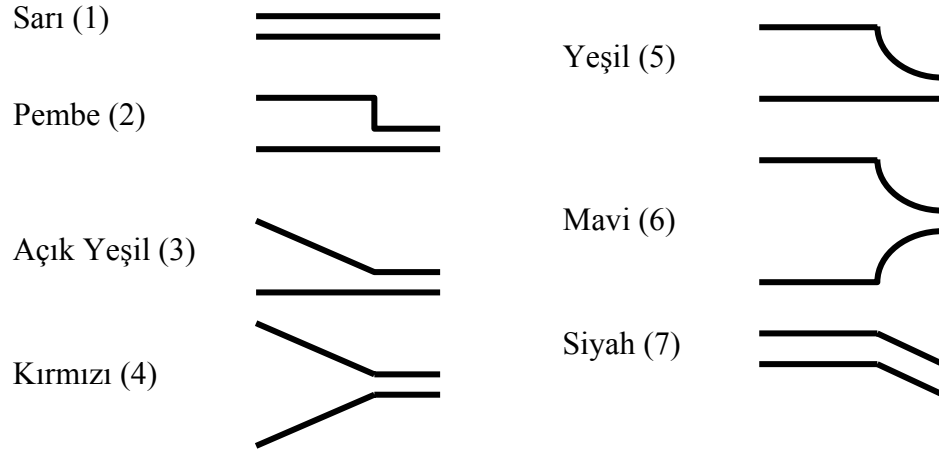
Şekil 5.1. Örnek bir elektronik devre kartı

Devre kartları çok çeşitli malzemelerden yapılabilir. En yaygın kullanılan kart malzemesi FR-4'tür. FR-4, cam yünü (fiberglas) takviyeli epoksi reçine kompozitidir. İnce yalıtkan tabaka şeklinde üretilen ve baskı devre yapımında yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. FR-4 bir kısaltma addır. F (Flame) ve R (Retardancy) harfleri malzemenin alev geciktirici özelliğini, 4 rakamı ise dört numaralı epoksi türünü belirtir. FR-4 genelde sarımsı renktedir. 130°C civarına kadar ısıya, kimyasal tepkimelere, neme ve mekanik zorlanmalara dayanıklı, esnek bir malzemedir. İyi bir yalıtkan olan FR-4'ün elektriksel özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir [43, 44, 45].

Tablo 5.1. FR-4'ün elektriksel özellikleri

Özellik	Değer
Dielektrik Sabiti	4,70 Max, 4,35 @ 500 MHz, 4,34 @ 1 GHz
Kayıp Faktörü	0,020 @ 1 MHz
Delinme Dayanımı	200 kV/cm
Yüzeysel Özdirenci	2×10^5 Mohm
Hacimsel Özdirenci	8×10^7 Mohm*cm

Deneysel çalışmada kullanılan örnek elektronik devre kartı, FR-4'ten yapılmıştır. Kullanılan kart 100 mm (en) x 150 mm (boy) x 1,5 mm (kalınlık) boyutlarındadır. Kartların üzerine, elektronik devrelerde sıkça görülen devre şekillerinden yedi farklı geometride akım yolu baskı-devre tekniği ile hazırlanmıştır (Şekil 5.2). Kullanılan akım yollarının iletkenleri 1 mm genişliğe ve 3,5 µm yüksekliğe sahiptir. Çizilen akım yolları küçük bir devreye benzeyecek şekilde, biri akımı taşıyan (canlı, faz, pozitif) iletken, diğeri dönüş iletkeni (toprak, negatif, nötr) olarak değerlendirilmiştir.

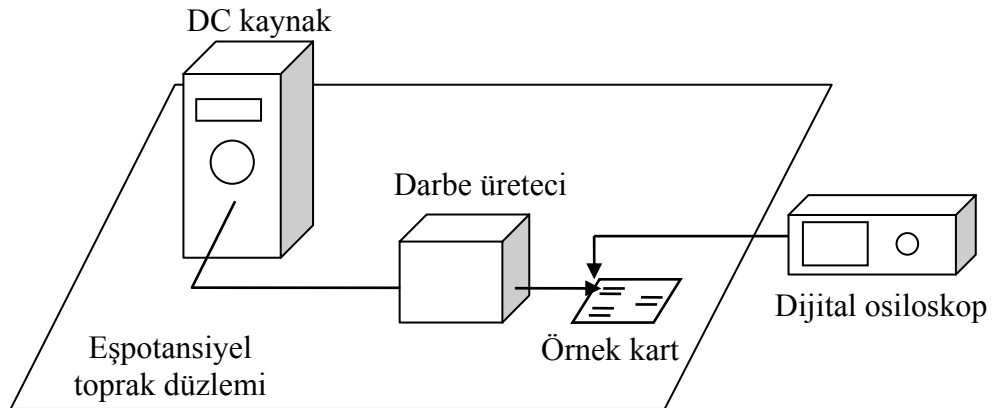


Şekil 5.2. Akım yolu örnekleri

5.2. Deney Düzeneği

Deney öncesinde, deneyin uygulanacağı kart, toz-kir bakımından eşit koşulları oluşturabilmek için saf alkol ile temizlenmiştir. Kart üzerine hazırlanan yedi farklı geometrideki akım yollarının hepsinin, pozitif ve negatif elektrot arasında 1 mm-2 mm-3 mm aralık bulunacak devreler yapılmış, böylece 21 adet deney numunesi elde edilmiştir. Her geometrinin üç farklı aralıklı modeli, boşalma olayları ile ilgili geometri bakımından karşılaştırma yaparak daha kesin sonuç verebileceği gibi, boşalmaların gerilim ile değişiminin de incelenmesi olanağını sağlayacaktır [46, 47].

Deney düzeneğinin tümü 150 cm x 200 cm'lik bakır toprak düzlemi üzerine kurulmuştur (Şekil 5.3). Bakır düzlem, topraklama sistemine 5 cm genişliğindeki esnek örgülü iletken ile bağlanmıştır. Topraklama sisteminin toprak geçiş direnci 0,18 Ω 'dur.



Şekil 5.3. Deney düzeneği

Hazırlanmış olan darbe gerilim üreticinin yüksek gerilim çıkışı, endüktif bozulmaları en az düzeyde tutmak için sac şerit şeklinde tasarlanmıştır. Çıkış ucu yaylı kısıkaç ile sonlandırılmış, böylece deneyden geçirilen kart üzerindeki her akım yolu örneğine daha kolay bağlantı olanağı sağlanmıştır. Üreteç, dış kasası 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 toprağa bağlanmıştır (Şekil 5.4) [48].



Şekil 5.4. Deneyde kullanılan elemanların fotoğrafı

5.3. Deney Yöntemi

Deney düzeneği kurulduktan sonra darbe üreteç devresindeki kat kürelerinin aralığı ayarlanmıştır. Küreler, bağlı oldukları vidalar üzerinde döndürülerek ileri-geri hareket ettirilebilmektedir. Bu yöntemle küçük hareketler yapılabilmesine rağmen küreler elle kontrol edildiği için birtakım sorunları beraberinde getirmektedir. Öncelikli olarak üreteç çıkışına 1 mm aralıklı akım yolları (elektrotlar) bağlanmıştır. Bunun için gerekli gerilim düzeyi, kat kürelerinin aralığı ayarlanarak elde edilmiştir. Başlangıç için elektrotlarda atlama olmayacak bir gerilim düzeyi seçilmiştir. Kaynak gerilimi yavaşça arttırılmış, kürelerde atlama meydana gelen dolayısıyla darbe geriliminin üretildiği düzeyde sabitlenmiştir. Üretilen darbe geriliminin tekrarlama hızı, uygulanan doğru gerilimin genliği ve girişte kullanılan öndirenç ve doldurma kondansatörünün büyüklüğü ile ilgilidir. Buna göre üreteç, üç-dört saniyede bir darbe

üretecek değerde sabit tutulmuştur. Üretecin çıkışına osiloskop bağlanmış, üretilen her darbe osiloskop ile ölçülmüş ve görüntülenmiştir [49].

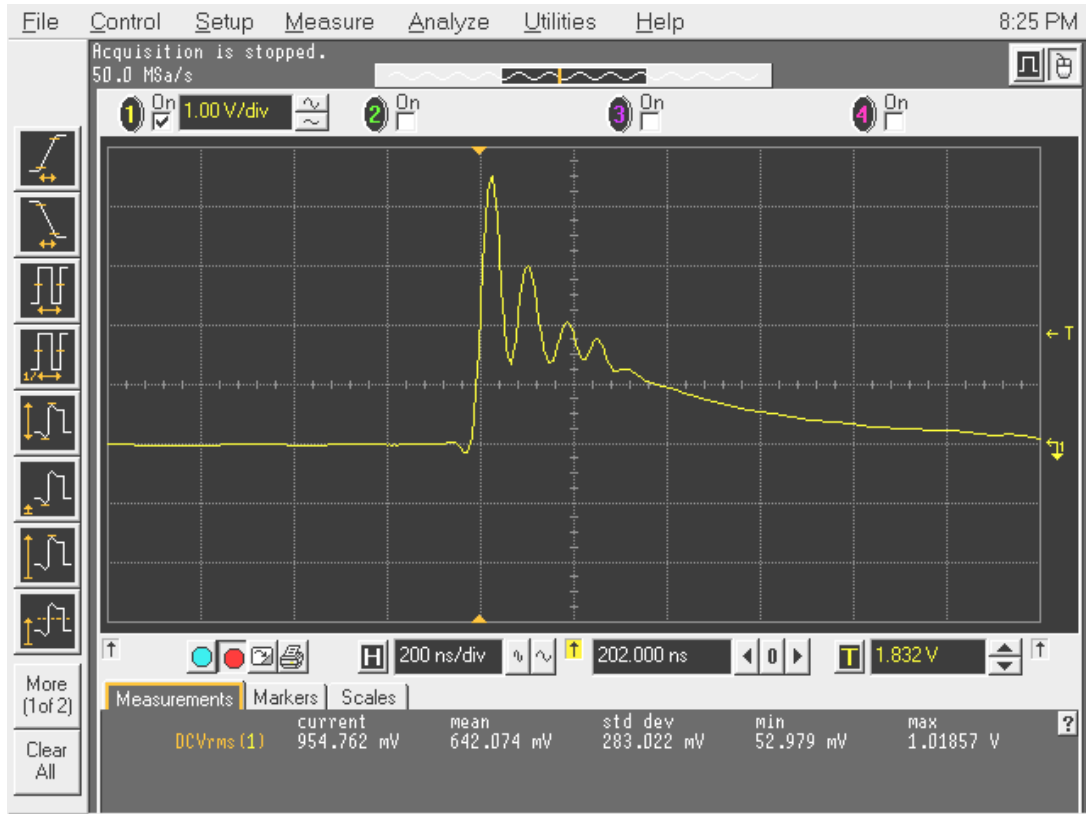
Ayarlanan gerilim değerde örnek elektroda 50 adet darbe uygulanmıştır. Bu değerde elektrotta herhangi bir boşalmanın (atlamının) meydana gelmediği doğrulanmıştır. Gerilim düzeyi sabit tutularak 1 mm aralıklı 2 numaralı elektrot üreteç çıkışına bağlanmış ve 50 adet darbe gerilimi uygulanmıştır. Gerilim düzeyi değiştirilmeden 1 mm aralıklı diğer elektrotlar da aynı deneye tabi tutulmuştur. Daha sonra küre aralıkları küçük bir miktar arttırılarak, üretilen darbenin genliği biraz yükseltilmiştir. 1 mm aralıklı yedi farklı elektroda, yeni gerilim düzeyinde 50 adet darbe uygulanmış, uygulanan darbelerden elektrotlarda boşalma (atlama) yaratanlar sayılmıştır ve tabloya not edilmiştir [50, 51, 52].

Darbe geriliminin üretildiği, kutu içindeki üreteç kat küresindeki atlamının oluşturduğu ses dinlenerek ve osiloskopta darbe şekli görülerek izlenmiştir. Elektrotlarda meydana gelen boşalma ise, kat küresinin sesine ek olarak gelen atlama sesi, boşalmanın oluşturduğu ışıklı arkın görüntüsü ve osiloskopta görüntülenen kesik darbe şekli ile izlenmiştir. Şekil 5.5 numuneye uygulanan örnek bir darbe gerilimini, Şekil 5.6 ise aynı darbenin, numunede boşalma meydana gelmesi nedeniyle kesik darbe görüntüsünü göstermektedir [40, 42].

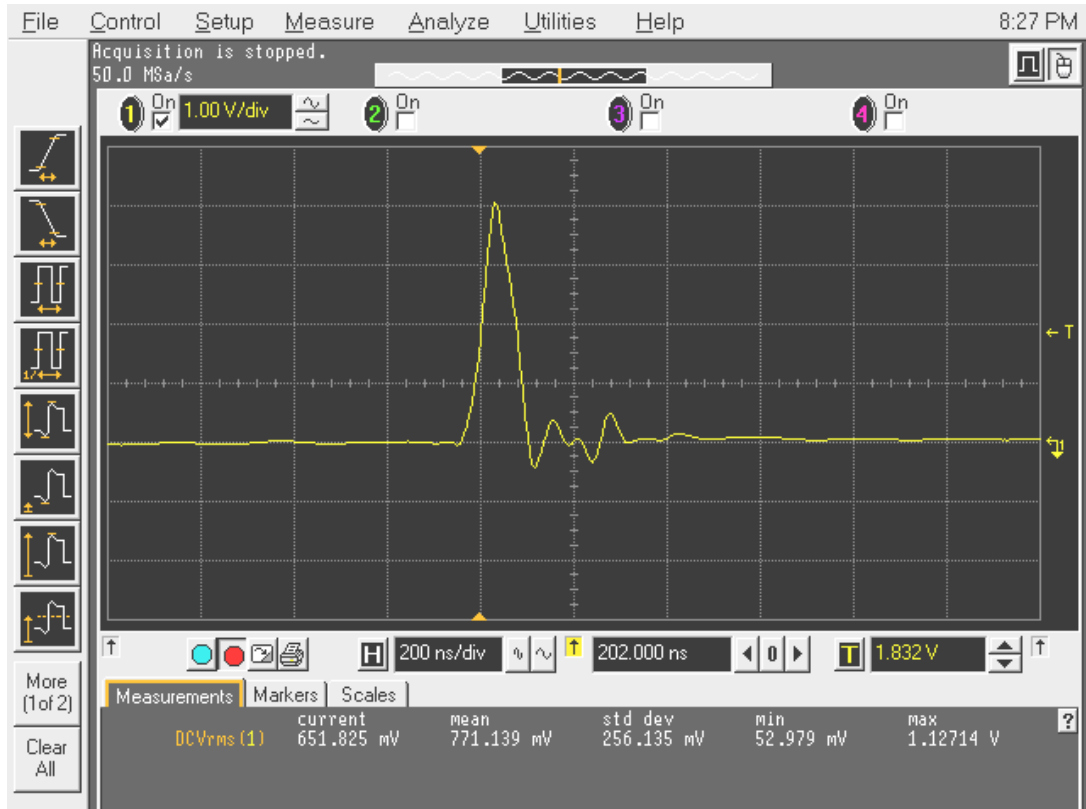
Ayarlanan gerilim düzeyinde 1 mm aralıklı elektrotların tümüne 50'şer darbe gerilimi uygulanıp meydana gelen boşalma sayısı sayılmıştır. Bu işlem üretecin küre aralığı arttırılıp gerilim düzeyi yükseltilerek tekrarlanmıştır. Elektrotların hepsinde, uygulanan 50 adet darbenin tamamında boşalma meydana getiren gerilim düzeyine ulaşıncaya deneyin birinci aşaması sona erdirilmiştir. Daha sonra aynı işlemler sırasıyla 2 mm ve 3 mm aralıklı elektrotlarla tekrar edilmiş ve elde edilen sonuçlar bir tabloya kaydedilmiştir.

Yapılan çalışmaların tamamı, negatif darbe gerilimi için de gerçekleştirilmiştir. Bunun için doğru gerilim kaynağının kutbiyeti değiştirilerek negatif yapılmış, bu durum karşısında elektrotlardaki boşalma olayları incelenmiştir.

Deneyisel çalışma laboratuvar ortamında ve koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın yapıldığı laboratuvar da toz, kir ve benzeri yabancı parçacık asgari düzeydedir. Gerçekleştirilen tüm deneyisel çalışmalarda sıcaklık $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ve nem $\%(53 \pm 2)$ değerde sabit tutulmuştur.



Şekil 5.5. Örnek devre kartına uygulanan bir darbe

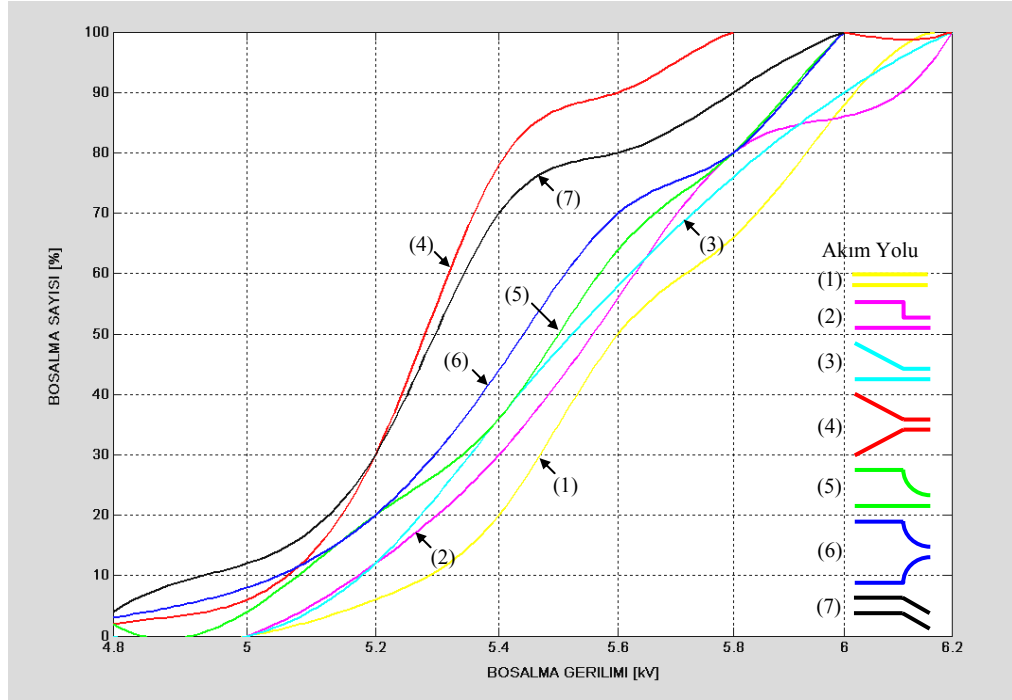


Şekil 5.6. Kartta boşalma meydana gelmesiyle oluşan kesik darbe

5.4. Deney Sonuçları

5.4.1. Boşalma Oluşturan Gerilim Düzeylerine Geometrinin Etkisi

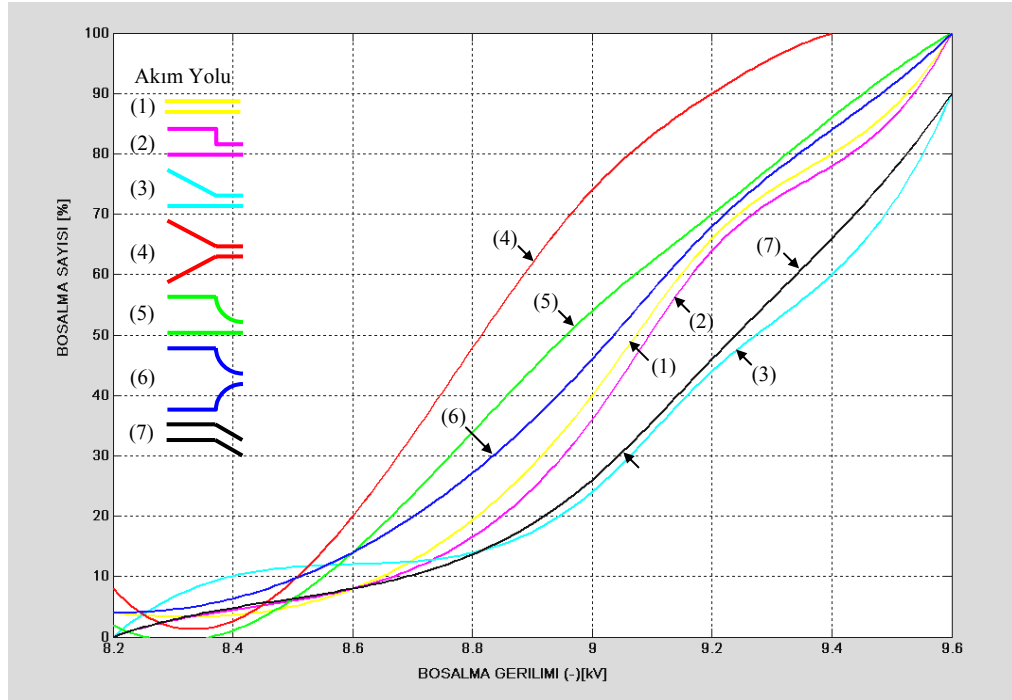
Elde edilen veriler kullanılarak atlama sayılarının gerilim düzeyine göre grafiği çizdirilmiştir. Grafikler MATLAB hazır paket programına veri girişi ile çizdirilmiştir. Elde edilen eğriler, "yüzde elli atlama (boşalma) eğrileri" olarak değerlendirilebilir (Şekil 5.7, Şekil 5.8).



Şekil 5.7. Pozitif darbe geriliminde 1 mm açıklıktaki örnek akım yollarının yüzde elli boşalma eğrileri

Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki eğriler, iletken geometrisine bağlı olarak boşalma (atlama) gerilim değerlerini göstermektedir. Eğriler incelendiğinde devre kartlarında kullanılan akım yollarının kolay atlama yapan ve daha dayanıklı olanları değerlendirilebilir. Pozitif darbeler uygulandığında 1 mm aralıklı elektrotlar en düşük 5 kV ve en yüksek 6 kV'ta, 2 mm aralıklı elektrotlar en düşük 5,8 kV ve en yüksek 6,8 kV'ta, 3 mm aralıklı elektrotlar ise en düşük 7 kV ve en yüksek 8,2 kV'ta sırasıyla %0 ve %100 boşalma göstermiştir. Eğriler uygulanan 50 adet darbe karşısında meydana gelen boşalmaların sayısına göre çizilmiştir. Bu nedenle farklı noktalarda eğimleri birbirinden farklıdır ve bazı noktalarda eğriler kesişmektedir. Eğrilere göre yorum yapmak için yüzde elli boşalma meydana getiren gerilim düzeylerine göre bir sıralama yapılabilir. Tablo 5.2 yüzde elli boşalma gerilim

düzeylerine göre sırasıyla düşükten yükseğe doğru elektrotların sıralamasını pozitif ve negatif darbe gerilimi için vermektedir.



Şekil 5.8. Negatif darbe geriliminde 3 mm açıklıktaki örnek akım yollarının yüzde elli boşalma eğrileri

Tablo 5.2. Yüzde elli boşalma gerilimlerine göre elektrotların sıralanması

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

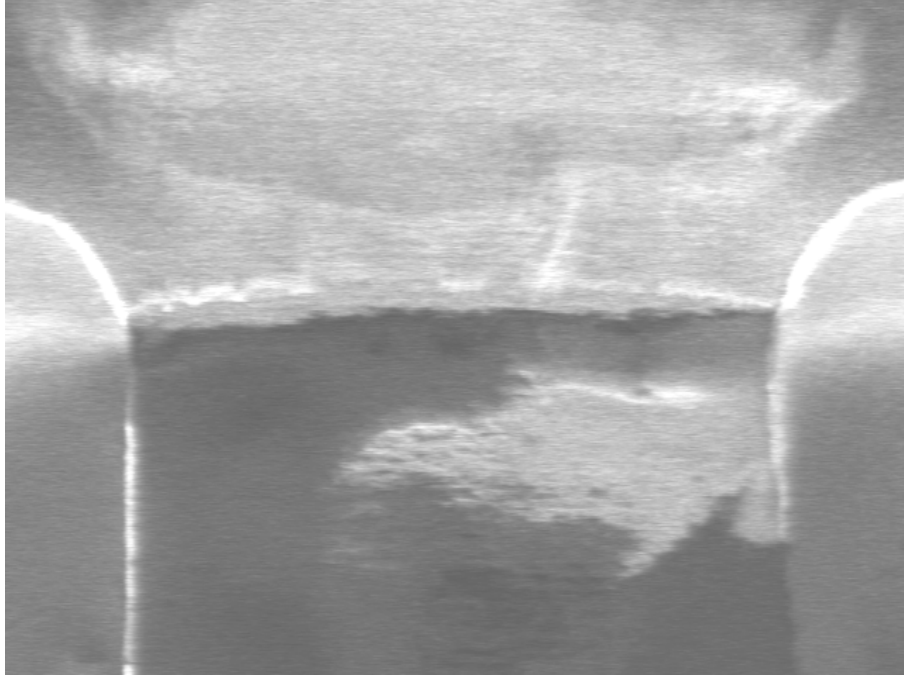
Buna göre Şekil 5.2’de verilen akım yollarından 4 numaralı (kırmızı) elektrot sistemi, en düşük yüzde elli boşalma gerilimine sahiptir. 1 numaralı (sarı) elektrot sistemi ise en yüksek pozitif yüzde elli boşalma gerilimine sahiptir. Bu tablodan çıkarılacak sonuç, yatayla 135° açı yapan akım yolunun hızlı değişen pozitif ve negatif darbe gerilimi karşısında elektronik devre kartının en zayıf noktası olduğudur. Devre üzerinde akım yolu hazırlanırken her iki iletkenin 135° açı yaptığı durum yerine bir iletkenin bu açığı yaptığı (3 numaralı elektrot sistemi) veya iletkenin birinin 90° açı yaptığı (2 numaralı elektrot sistemi) durumun tercih edilmesi daha uygun olacaktır. Pozitif ve negatif darbe gerilimleri karşısında elektrotların şekil ve geometrilerine göre sergiledikleri durum birbirine çok benzerdir.

Elektrotların birbirlerine göre açılı dönüşler yaptığı durumun, 1 numaralı elektrot sisteminde olduğu gibi elektrotların düz paralel olduğu duruma göre daha düşük gerilim düzeyinde boşalma gösterdikleri görülmektedir. Elektrotlardaki açılı dönüşler sivri uç oluşturduğundan bu elektrotlarda boşalma daha düşük gerilim düzeyinde meydana gelebilmektedir.

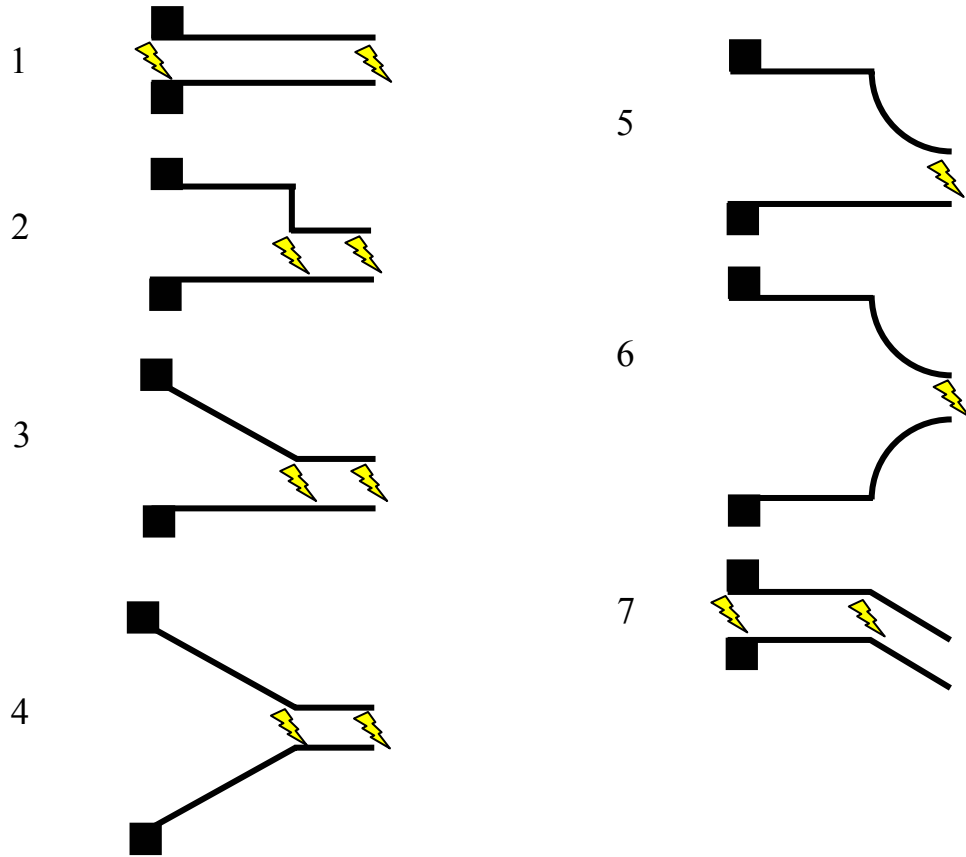
5.4.2. Farklı Geometrilerde Boşalmanın Meydana Geldiği Noktaların Saptanması

Yapılan çalışmada incelenen konulardan bir diğeri, geometriye bağlı olarak elektrotlarda atlamanın meydana geldiği noktaların saptanmasıdır. Bunun için darbe gerilimi uygulandığında meydana gelen boşalma olayı göz ile izlenmiştir. Aynı geometriye sahip 1 mm - 2 mm - 3 mm aralıklı numunelerin üçünde de atlama aynı noktalarda meydana gelmiştir. Atlamaların olduğu noktalar deney sırasında rahatça görülmüştür. Bunun yanında bu noktaların tam yerinin saptanması için numuneler elektron mikroskopuyla incelenmiştir [53]. Elektrotlarda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu ark, elektrotlar arasında ve kart malzemesinin yüzeyinde bir yol izlemektedir. Boşalmalar arttıkça izlenen ark yolu, kart yüzeyinde deformasyona neden olmaktadır. Bu nedenle mikroskop ile incelenen numunelerde ark yolu kolayca belirlenebilmektedir. Şekil 5.9, 6 numaralı elektrot sisteminin deneyden geçirildikten sonraki mikroskop görüntüsüdür. Boşalma olaylarının tamamı çeyrek çember şeklindeki karşılıklı yayların birbirlerine en yakın noktalarında, yani uç noktasında meydana gelmiştir. Şekil 5.9'da arkın izlediği yol, elektrot uçları arasında belirgin biçimde görülebilmektedir [40, 51]. Ayrıntılı inceleme yapılacak olursa, mikroskop görüntüsünden çıkarılacak bir takım sonuçlar vardır. Bunlardan birincisi, oluşan boşalma olayının kart üzerindeki yüzeyi bozduktan sonra, hep aynı yolu izlemiş olduğudur. İki iletkeni birbirine bağlayan bu yolun hemen altında, ikinci bir yol daha görünmektedir. Bu da bazı boşalmaların bu noktada meydana geldiğini, ancak boşalmaların büyük kısmını oluşturan üst yolun, bundan sonraki boşalmalar için de daha kolay bir yol oluşturduğudur.

Şekil 5.10, yedi farklı geometrideki elektrotlarda atlama gözlemlenen noktaları göstermektedir. Bazı geometrilerde atlamanın tamamı aynı noktada meydana gelirken bazılarında iki farklı noktada boşalma gözlenmiştir [54].



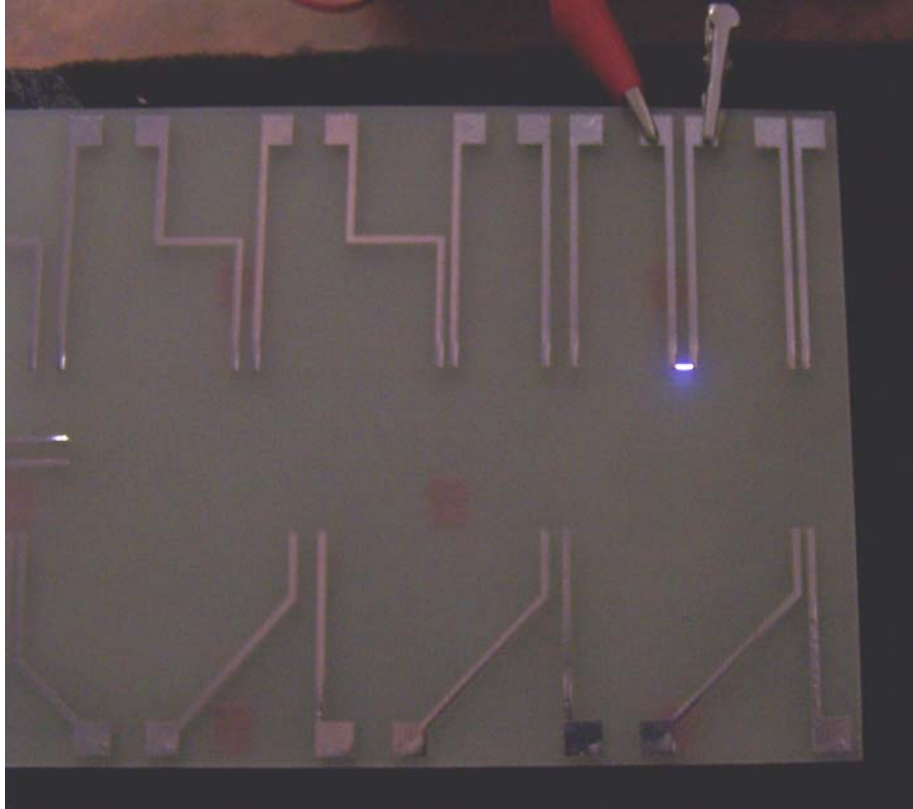
Şekil 5.9. 6 numaralı elektrot sisteminin atlama olayından sonra atlama bölgesinin mikroskop görüntüsü



Şekil 5.10. Elektrotlarda boşalmanın gözlemlendiği noktalar

Şekil 5.10 incelendiğinde, birbirine paralel giden gidiş ve dönüş iletkenlerinin maruz kalabilecekleri bir aşırı gerilim karşısında boşalma meydana getirdikleri noktaların geometriye bağlılığı görülmektedir. Buna göre düz bir hat boyunca paralel giden devre yolunda atlamalar uç noktalarda oluşmaktadır. İletkenlerden birinin düz, diğerinin ise açılı veya yay şeklinde olduğu devrelerde boşalma, paralel giden hattın açısı yaptığı noktada meydana gelmektedir. Bu sonuç, karşılıklı olarak paralel giden ve açısı yapan elektrotlarda da gözlenmiştir. İletkenlerin açısı 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 [55, 56].

Şekil 5.11, 2 mm açıklığa sahip 1 numaralı elektrot sisteminde meydana gelen boşalmanın fotoğrafını göstermektedir. Boşalma elektrot sisteminin uç noktasında oluşmuştur.



Şekil 5.11. 1 numaralı elektrot sisteminde boşalma

Deneyde kullanılan elemanların büyük bir bölümü, daha önce tanımlanmıştır. Bu kapsamda darbe gerilim üreticini besleyen doğru gerilim kaynağının özellikleri çıkarılmış, çıkışındaki gerilimin dalgalılığı ölçülmüş ve incelenmiştir. Üreteşte kullanılan direnç, kondansatör, atlama aralıklı küre çifti ve bağlantı elemanlarının

elektiriksel özellikleri değerlendirilmiştir. Hiçbir eleman uygulamada, ideal durumdaki özellikleri gösteremez. Bu nedenle üretici oluşturan elemanların hepsinin kapasite, direnç, endüktans değerleri, düşük ve yüksek frekansta, empedans analizörü yardımıyla ölçülmüştür. Bağlantı elemanlarının bir bölümü ile kürelerin göstereceği empedans ölçülemediğinden tahmini değerler devreye konulmuştur. Devre analizi, üretilen darbenin yükselme süresine göre yaklaşık 10 MHz frekansında elemanların gösterdikleri empedanslar hesaplanarak yapılmıştır.

Devreye yük olarak bağlanan elektrot geometrilerinin etkisini incelemek için, kart üzerindeki iletken akım yollarının da kapasite ve endüktans değerleri ölçülmüştür. Ölçme işlemi, daha önce yapıldığı gibi HP 4194A empedans analizörü ile yapılmıştır. Elektrotların kapasitesi, sağlıklı ölçüm sonucu veremeyecek kadar küçük çıktığından değerlendirmeye alınmamıştır.

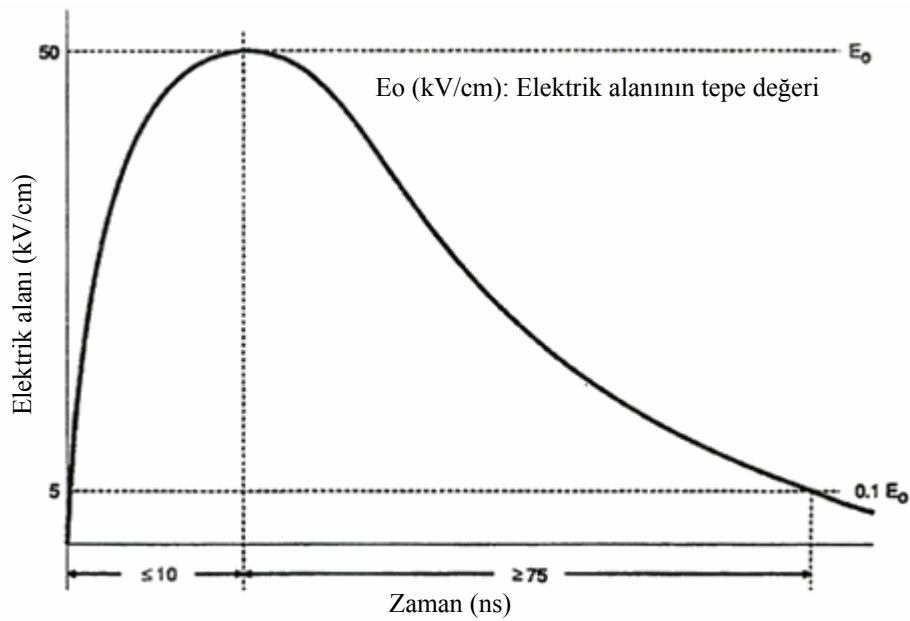
Elektrotların doğrudan bağlanmasıyla yapılan endüktans ölçümü de çok küçük sonuçlar vermiştir. Bu nedenle endüktans ölçümü için 20 Hz frekansta 1.90 μH 'lık endüktans gösteren çekirdek olarak hava kullanan bir tel referans bobin hazırlanmıştır. Bu bobin elektrotlara seri bağlanarak L_b bileşke endüktans ölçülmüş, sonra L_b bileşke endüktans ile L_r referans bobinin endüktansı arasındaki fark alınarak elektrot iletkeninin L_i endüktansı hesaplanmıştır. Tablo 5.3, farklı frekanslarda ölçülen endüktans değerlerini göstermektedir. Tablodan da görüleceği gibi elektrot iletkenlerinin endüktansı, ihmal edilebilecek kadar düşüktür.

Tablo 5.3. Elektrotların farklı frekanslardaki endüktansı

Elektrot Sistemi	Bileşke Endüktans ($L_b = L_r + L_i$) [μH]					Ortalama Bileşke Endüktans L_{ort} [μH]	İletkenin Endüktansı ($L_i = L_{ort} - L_r$) [μH]
	1 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz	40 MHz		
Referans bobin, L_r	1.92	1.89	1.84	1.81	1.83	1.858	0
1	1.98	1.94	1.88	1.86	1.88	1.908	0.050
2	1.98	1.92	1.87	1.84	1.83	1.888	0.030
3	1.94	1.90	1.85	1.82	1.84	1.870	0.012
4	1.97	1.92	1.87	1.84	1.84	1.888	0.030
5	1.98	1.92	1.87	1.84	1.87	1.896	0.038
6	1.98	1.93	1.88	1.85	1.87	1.902	0.044
7	1.98	1.92	1.87	1.84	1.87	1.896	0.038

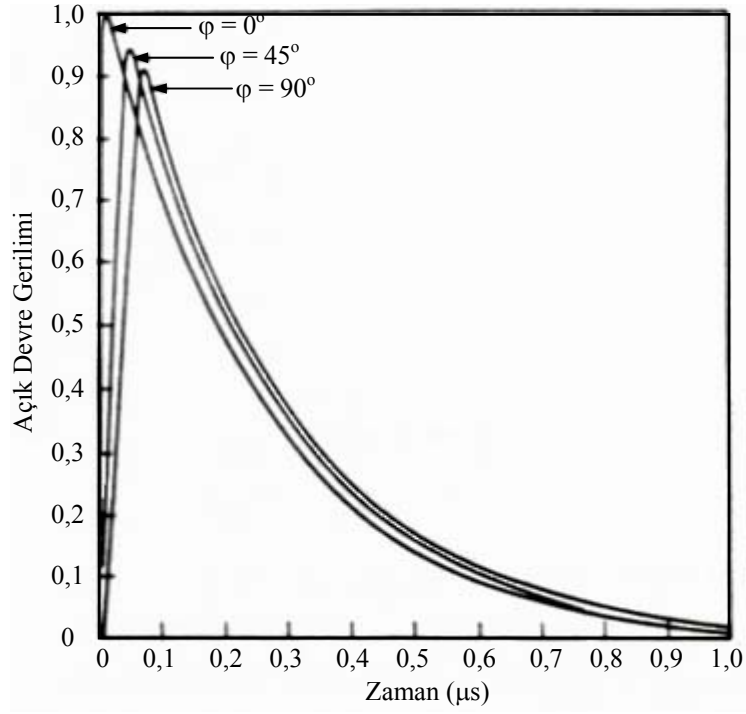
5.5. Değerlendirme

Bu bölümde hazırlanan elektronik devre kartı örneğine, üretilen hızlı darbe geriliminin uygulanması deneyi hakkında bilgiler verilmiştir. Literatürde EMP ve benzeri darbelerin devre elemanlarına, aygıtlara ve sistemlere etkisini inceleyen birçok çalışma vardır. Bu çalışmaların büyük kısmı, elektromanyetik darbe üretip, oluşan elektrik ve manyetik alanların deneyden geçirilen aygıtlara uygulanmasını konu almaktadır. Standartlar EMP şeklini farklı sürelerle tanımlamaktadır. Şekil 5.12 bu tanımlamalardan birini göstermektedir [57].



Şekil 5.12. Standart EMP dalga şekline bir örnek

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada oluşan bir EMP veya benzeri darbenin oluşturduğu alanın, sistem ve aygıt iletkenlerine bağlaşma olduktan sonraki etkisi incelenmektedir. Bu nedenle üretilen işaret doğrudan devre iletkenlerine uygulanmaktadır. İletkende endüklenen gerilimi belirleyen bir standart yoktur çünkü EMP farklı elemanlarda, aygıtlarda ve sistemlerde farklı gerilimler endükleyecektir. Ancak Bell laboratuvarlarında yapılan çalışmalarda kayıpsız bir iletim hattında endüklenen en büyük açık devre geriliminin Şekil 5.13'te gösterildiği gibi olduğu sonucuna varılmıştır [58]. Bu darbe şekli incelenecek olursa bu tez kapsamında üretilen hızlı darbenin karakteristik büyüklükleri ile yaklaşık aynı olduğu görülebilir. Kaynaklarda verilen hızlı darbelerin kullanıldığı deneysel çalışmalar incelenecek olursa genelde yalıtkan malzemelerin delinmesi, kablo yalıtkanlarının zorlanması ve



Şekil 5.13. Kayıpsız bir iletim hattında endüklenen en büyük açık devre gerilimi (φ , EMP'nin yayılma doğrultusunun yeryüzüne teğetinin yatayla yaptığı açısıdır)

sıvı ve gazlarda hızlı darbeler karşısında delinme konularında yapılmış çalışmalara rastlanır. Uygulanan darbe süreleri genelde mikrosaniye ve bazılarında nanosaniye mertebelerindedir.

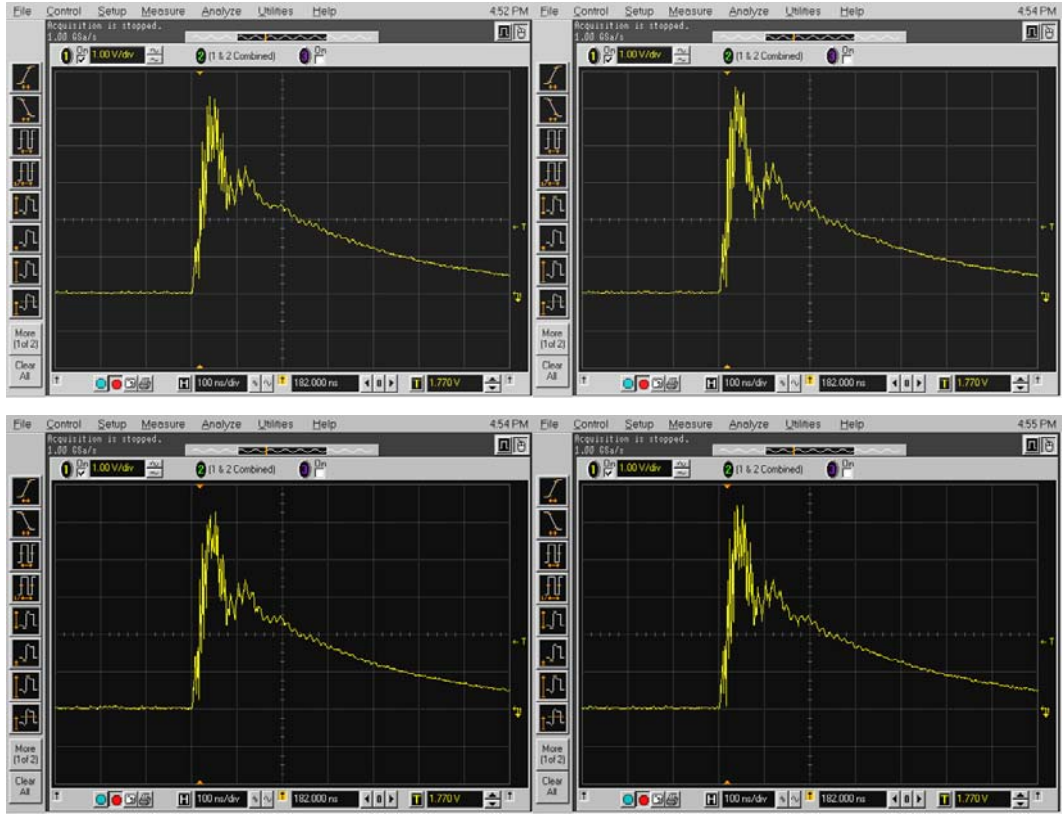
Bu bölümde yapılan deneysel çalışma sonucunda bir elektronik devre kartında bulunan akım yollarının şekline ve geometrisine göre hızlı değişen bir darbe gerilimi karşısında davranışı konusunda fikir sahibi olunmuştur. Hangi akım yolu şeklinin hızlı değişen darbe gerilimine daha dayanıklı olduğu deneyden geçirilen geometriler arasında karşılaştırma yapılarak belirlenebilir. Üzerinde fikir sahibi olunan bir başka konu ise farklı akım yolu şekillerinde meydana gelecek bir boşama olayının noktasal olarak yerinin saptanmasıdır. Gerçekleştirilen deneysel çalışma, sadece yedi adet farklı geometriye uygulanmasına ve deney koşullarının değişmesi durumunda deney sonuçlarında da değişme meydana gelme olasılığına rağmen genel bir fikir ortaya koyabilmektedir.

5.6 Uygulanan Ardışık Darbelerin Kararlılığı

Deney sırasında her bir numuneye, belirlenen her bir gerilim düzeyinde en az elli adet darbe gerilimi uygulanmıştır. Üç farklı aralıkta yedi farklı geometri, yirmibir numuneye karşılık gelir. En az beş gerilim düzeyinde ve pozitif-negatif olmak üzere

iki kutbiyette deney yapıldığı göz önüne alınırsa deney süresince yaklaşık onbin adet darbe üretildiği hesaplanabilir. Üretilen darbelerin şekilleri, deney süresince osiloskoptan gözle izlenmiştir. Ancak uygulanan ardışık darbelerin genlik ve süre bakımından kararlı yapıda olup olmadığını kesin belirleyebilmek için darbelerin ayrıntılı incelenmesi gerekir. Bu amaçla, farklı gerilim seviyelerinde onar saniye ara ile onar adet darbe üretilmiş ve her darbenin şekli osiloskop ile kaydedilmiştir. Kaydedilen şekiller, süre ve genlik bakımından ayrıntılı incelenmiştir.

Yapılan ölçmelere göre bir değerlendirme yapmak gerekirse; 5-5,5 kV mertebelerine kadar alınan örnek darbelerde yükselme-düşme ve toplam etki sürelerinde elde edilen en düşük ve en yüksek değerler arasında en fazla %5 içinde sapmalar gözlenmiş ve sonuç olarak kararlı darbeler elde edilmiştir. Yine aynı gerilim mertebelerinde elde edilen darbe genliği en fazla %12-13 oranında sapmalar göstermiştir. 8-9 kV mertebelerine kadar alınan örnek darbelerde ise sürede mevcut olanaklar ile sapma gözlenememiş, gerilim genliğinde ise en fazla %4 oranında sapma meydana gelmiştir. Şekil 5.14, belirli bir gerilim düzeyinde elde edilen ardışık darbelerin dalga şekillerini göstermektedir. Darbeler genlik ve zaman parametreleri bakımından birbirlerine çok benzemektedir.



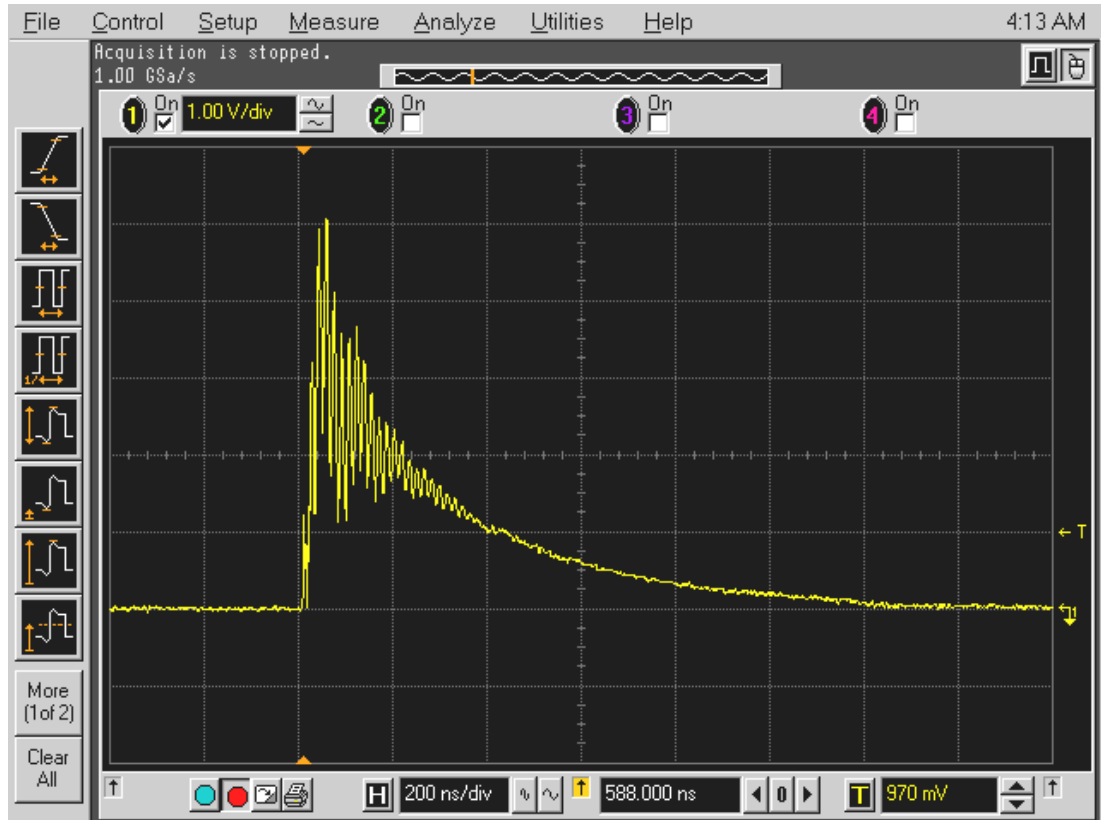
Şekil 5.14. Ardışık darbeler örnekler

Elde edilen sapma yüzdeleri değerlendirildiğinde, düşük gerilim değerlerinde sapma biraz daha fazla olmasına rağmen deney sonuçlarına etki edecek mertebelere ulaşmamıştır. Düşük gerilimlerde kürelerin gösterdiği atlama karakteristiğinin biraz daha bozuk olması, bu küçük sapmanın nedeni olarak değerlendirilmektedir. Deneyde uygulanan gerilimlerin büyük kısmı 6 kV'un üstünde olduğundan, deneyde kullanılan darbelerin kararlılığı tatminkardır.

5.7. Uygulanan Darbelerin Frekans Bölgesinde İncelenmesi

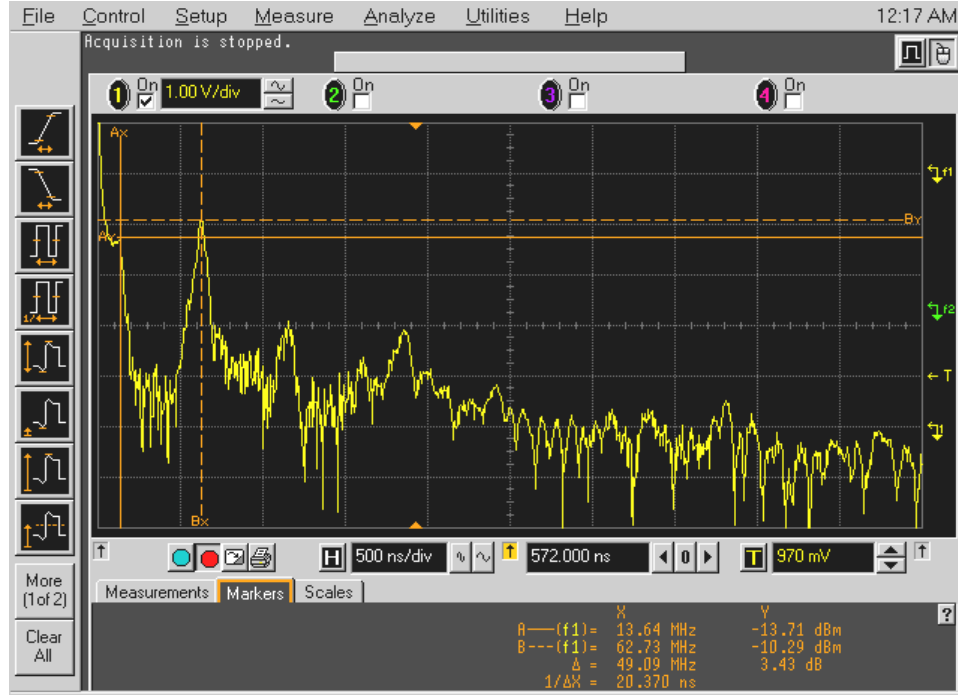
Zaman bölgesinde kısa süreye sahip işaretler, frekans bölgesinde geniş bantlı olarak izlenir. Bu nedenle mikrosaniye veya nanosaniye mertebelerindeki darbe gerilimleri frekans bölgesinde megahertz veya gigahertz mertebelerinde bir banda sahip olurlar.

Üretilen darbe geriliminin etkili olduğu frekans bandını öğrenmek için zaman bölgesindeki darbe verilerinin frekans bölgesine dönüştürülmesi gerekir. Bunun için Fourier dönüşümü yapılabilir. Üretilen darbe gerilimi dalga şekillerinden biri Şekil 5.15'te verilmiştir. Bu şekil, görüntülenen darbeye kullanılan örnekleme hızı, darbenin görüntülediği nokta prob temasına göre salınımlar içermektedir.

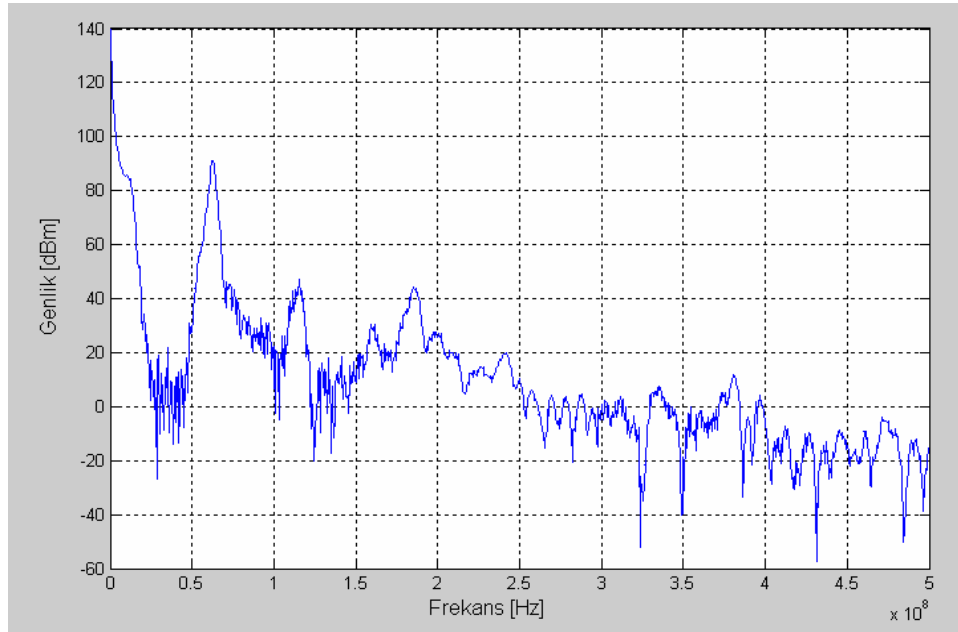


Şekil 5.15. 1 GSa/s örnekleme ile alınmış bir darbe gerilimi örneği

Zaman bölgesinde kaydedilen bu darbe şeklinin osiloskobun özelliği kullanılarak frekans spektrumundaki görüntüsü alınmıştır (Şekil 5.16). Şekil 5.17 ise, darbe geriliminin örnekleme hızı, süre ve genlik bilgilerini kullanarak MATLAB hazır programında Fourier dönüşümünün yaptırılması ve alınan verilerin çizdirilmesi ile elde edilen frekans yanıtını göstermektedir.



Şekil 5.16. Şekil 5.15'te verilen darbenin osiloskopta frekans bölgesi görüntüsü



Şekil 5.17. Şekil 5.15'te verilen darbenin MATLAB ile FFT alınmış hali

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 5.16 ve Şekil 5.17 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 μ s'dir. Bu süre beklendiği gibi frekans bölgesinde 1 MHz'lik temel frekans bileşenine karşılık gelir.

Darbe geriliminin en yüksek değerine ulaşır 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.

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.

5.8. Yapılan Deneysel Çalışmanın EMU Açısından İncelenmesi

5.8.1. EMU

Gelişen teknoloji, beraberinde kirliliği de getirmiştir. Elektronik aygıtların sayısının artması, özellikle elektromanyetik etkileşimlerin rahatsız edici boyutlara ulaşmasına neden olmuştur. Bir ortamdaki cihazların, birbirlerini rahatsız edici, doğru ve düzgün çalışmasını engelleyici yöndeki istenmeyen etkisine EMI (electromagnetic interference), elektromanyetik girişim denir. EMS (electromagnetic susceptibility), elektromanyetik alınganlık ise, aynı ortamdaki aygıtların birbirlerinden etkilenecek çalışamaz duruma gelmesi, veya performans kaybetmesi olarak tanımlanır. Bu doğrultuda elektromanyetik uyumluluğu tanımlamak gerekirse, bir elektronik aygıt ortamında, aygıtların yüksek alınganlık göstermeden ve yüksek girişime sebep

olmadan, kısaca güvenlik ve performans sınırları içinde birbirlerini elektromanyetik olarak etkilemeden ve birbirlerinden etkilenmeden doğru ve düzgün çalışması EMC (electromagnetic compatibility) elektromanyetik uyumluluk olarak adlandırılır.

Elektromanyetik etkileşim, iletkenlik veya ışıma yoluyla meydana gelebilir. 30 MHz'in üstündeki frekanslarda emisyonlar ışıma yoluyla oluşur. Elektromanyetik uyumluluğu sağlamak için bu etkileşimin ortadan kaldırılması gerekir. Etkileşimi azaltmak için alınacak önlemler girişime sebep olan ve alınganlık gösteren sistemler için farklıdır. Genel olarak EMU iyileştirme çalışmaları tasarım evresinde yapılırsa daha yüksek başarı elde edilir. İyileştirme amaçlı olarak ekranlama, topraklama, filtreleme ve bağlama yapılabilir.

5.8.2. Deneysel Çalışma

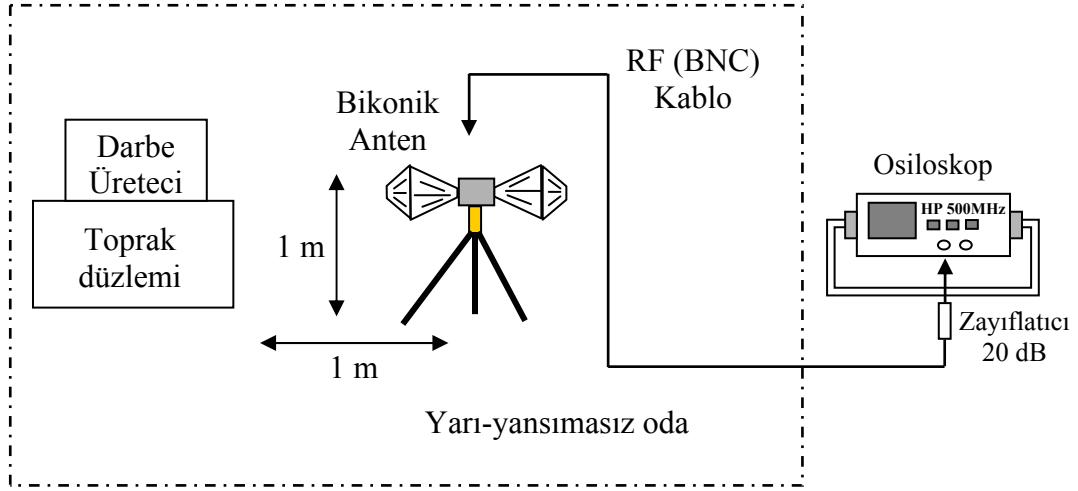
Tez için deneysel çalışma yaparken, gerek kat kürelerinden, gerek elektrotların oluşturduğu boşalma sonucu meydana gelen arkta kaynaklanan yüksek frekanslı elektromanyetik alan yayılmıştır. Deneysel çalışma sırasında oluşan elektromanyetik girişim ölçülmüştür. Ölçme yaparken amaç, standart içinde emisyon değerlendirme değil, üretcin elektromanyetik ortam etkisini izlemek, bir başka ifadeyle ortamda oluşturduğu kirliliğin düzeyini belirlemedir. Literatürde yüzeysel boşalmanın ışık spektrumu üzerine çalışmalar vardır [59, 60, 61]. Üreteç ve deney düzeneğinin oluşturduğu elektromanyetik spektrum bu çalışmalara katkı sağlayacaktır [62].

Elektromanyetik alan ölçmesi gerektiren deneyler, elektromanyetik açıdan dış ortamdan yalıtılmış deney odaları gerektirir [63]. Deney sırasında ortamı etkilememek ve ortamdan etkilenmemek amacıyla EMI ölçme çalışması yarı-yansız oda (semi-anechoic chamber) içinde gerçekleştirilmiştir. Ölçmede kullanılan cihazlar hakkında bilgi Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4. EMI ölçmesinde kullanılan cihazlar

Cihaz Adı	Marka	Model
Bikonik Anten	Schwarzbeck	VHBA 9123
Osiloskop	Agilent-Infiniium	1 GHz, 4 GSa/s
RF Zayıflatıcı	Huber-Suhner	20 dB
RF Kablo	Huber-Suhner	2 x 3 m
Polistren Köpük	—	—

Oda içerisinde üreteçten 1 m uzağa ve yerden 1 m yükseğe 300 MHz'e kadar verimli çalışan bikonik anten yerleştirilmiş, antenin çıkışı, Agilent Infinium dijital osiloskoba bağlanmıştır (Şekil 5.18). Yüksek gelebilecek işaretlere karşı anten ile osiloskop arasına 20 dB'lik zayıflatıcı konulmuştur. 20 dB'lik zayıflatıcı gerilimde kullanıldığında 10 kat zayıflatma sağlar.



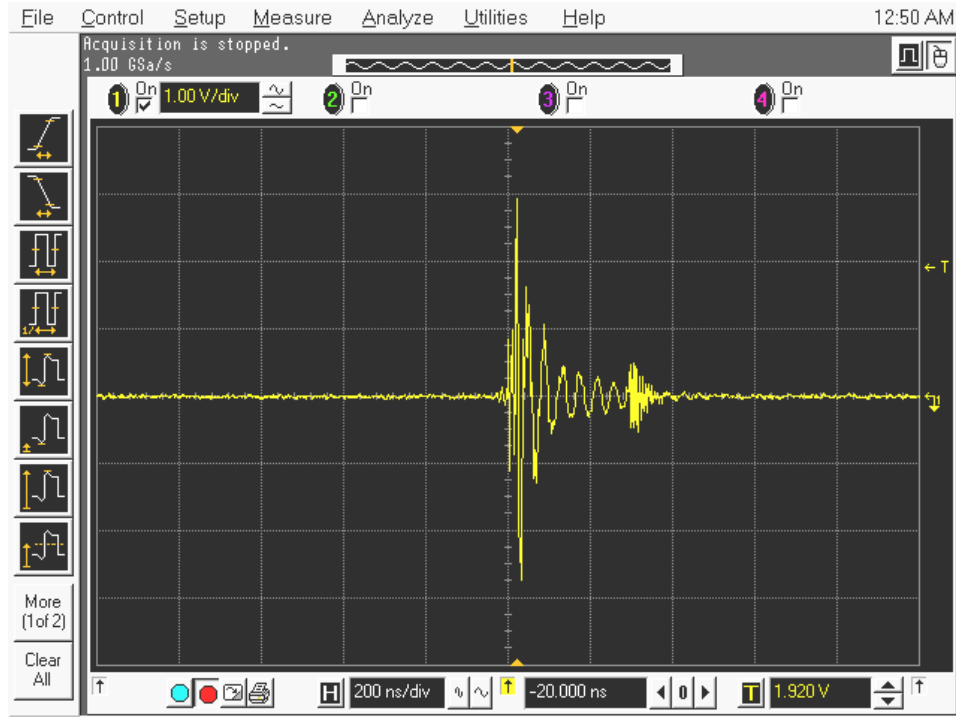
Şekil 5.18. Deney düzeneği

Deney üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Önce kat kürelerinin aralığı üreteç 10 kV mertebesinde gerilim üretecek şekilde ayarlanmıştır. Bu gerilimin seçilmesinin nedeni, numune akım yollarının 3 mm aralıklı olanlarının bu gerilim değerinde %100 boşalma göstermesidir.

Birinci aşamada üreteç kutusunun kapağı ekranlanmadan kapatılmış, deney numunesi üreteç çıkışına bağlanmıştır. Gerilim yavaşça yükseltilmiş ve kürelerin ayarlı olduğu düzeyde darbe üretilmiştir. Üretilen darbe gerilimi bağlı olduğu elektrot çiftinde boşalma yaratmıştır. Atlama sonucu meydana gelen elektromanyetik girişim ölçülmüş ve şekli görüntülenmiştir. Şekil 5.19'da bu ölçmeye bir örnek verilmiştir. Bu deneyde alınan sonuç, üretecin (büyük oranda kürelerin) ve numunede meydana gelen boşalmanın beraberce oluşturduğu etkiyi göstermektedir.

İkinci aşamada, üreteç kutusunun kapağı kapatılmış ve etkin şekilde ekranlanmıştır. Bunun için üreteç kutusu ile kutu kapağının birleşme yerlerinde oluşan boşluklar yapışkanlı alüminyum folyo ile kaplanmış ve üreteç içinden ölçmeyi etkileyecek herhangi bir alan ya da dalga oluşumu engellenmiştir. Deney numunesi üretece bağlanmış ve boşalmanın oluşturduğu girişim ölçülmüş ve görüntülenmiştir. Şekil 5.20 bu ölçmeye bir örnek olarak verilmiştir. Bu deneyde alınan sonuç, üreteç

elektromanyetik olarak ekranlandığından sadece numunedeki boşalmanın oluşturduğu etkiyi göstermektedir.

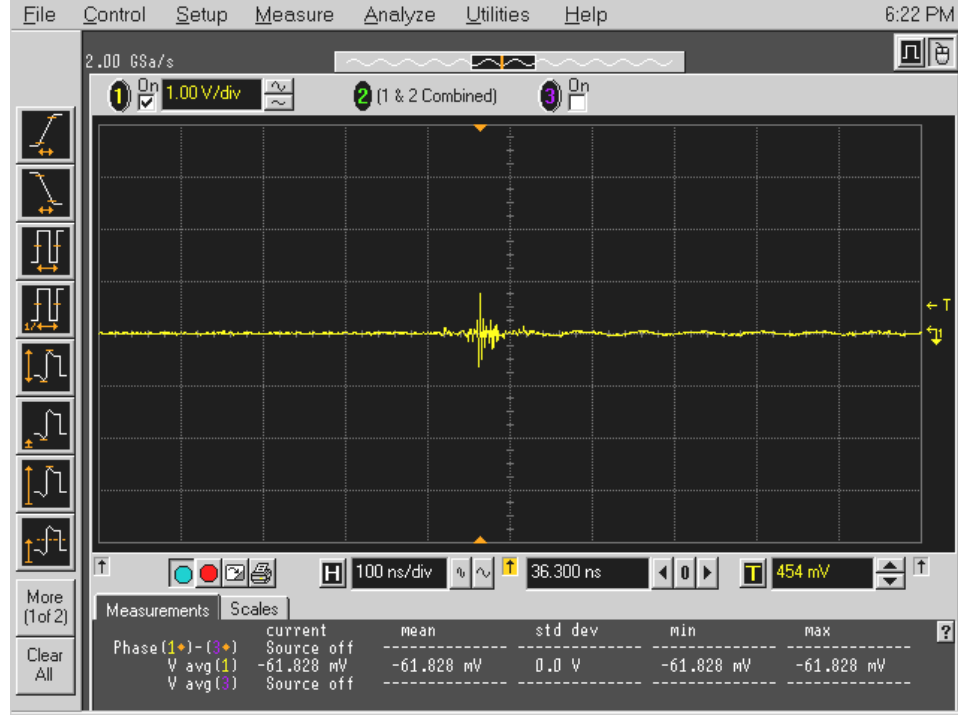


Şekil 5.19. 3 numaralı elektrot sistemi ve üretcin birlikte oluşturduğu girişim



Şekil 5.20. 3 numaralı elektrot sisteminin tek başına oluşturduğu girişim

Üçüncü aşamada üreteç kutusunun ekranı açılmış, numune üreteç çıkışına bağlanmamış ve bu şekilde darbe gerilimi üretilmiştir. Bu deneyde alınan sonuç sadece üreteçten (büyük oranda kürelerden) kaynaklanan girişim etkisini göstermektedir. Bu ölçmeye bir örnek Şekil 5.21’de verilmiştir.



Şekil 5.21. Üretecin tek başına oluşturduğu girişim

Yukarıda anlatılan deney yöntemi, 3 mm aralıklı yedi farklı geometrideki elektrotların tamamına uygulanmış ve her birinde alınan sonuçlar görüntülenerek kaydedilmiştir.

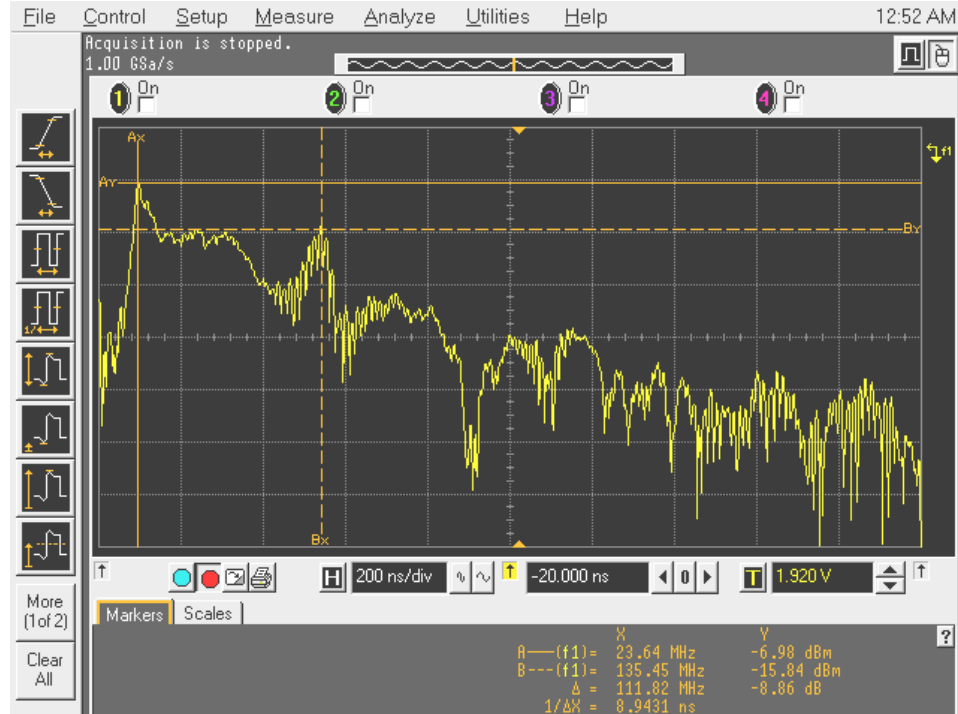
Yapılan elektromanyetik girişim deneyi sonucunda şu değerlendirmeler yapılabilir:

- Yukarıda verilen şekiller incelenirse, Şekil 5.19’da verilen dalga şeklinin, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’in birleşimi olduğu görülebilir. Kürelerin ve numunedeki boşalmanın oluşturduğu geçici alan etkisi, yaklaşık 200 ns öteleme farkına sahiptir. Bunun sebebi, boşalmanın oluşturduğu geçici alan antene doğrudan geliyorken, kürelerin oluşturduğu alanın kutu içinde yansımalarla uğrayarak antene daha geç ulaşmasıdır.
- Üretecin oluşturduğu elektromanyetik etkinin toplam süresi 50 ns, genliği 12,5 V/m’dir.
- 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 alanın genliği, diğerlerinden daha düşüktür. Bunun nedeni, bu geometrilerde elektrotların birbirlerine en yakın olduğu yerin bir nokta olması ve boşalmanın tamamının bu noktada meydana gelmesidir. Eşit mesafeli paralel yapıdaki elektrotlarda boşalma noktası sapabilmekte, zaman zaman aynı anda iki noktada boşalma meydana gelebilmektedir.
- Elde edilen alan genlikleri incelendiğinde, duyarlı elektronik aygıtlar için göz önüne alınması gereken bir konu olduğu anlaşılmaktadır.

Gerçekleştirilen elektromanyetik girişim deneyinde elde edilen sonuçların frekans bölgesinde de değerlendirilmesi gereklidir. Şekil 5.22, üreteç ve boşalmanın beraber olduğu durumun (Şekil 5.19) Fourier dönüşümü yapılmış halini göstermektedir. Şekle yerleştirilen işaretçilerden anlaşılabacağı üzere frekans bölgesinde iki büyük bileşen ön plana çıkmaktadır. Boşalma, 24 MHz’de belirgin bir etkiye sahiptir. Üreteç ise daha yüksek frekansta, 135 MHz’de etkilidir.



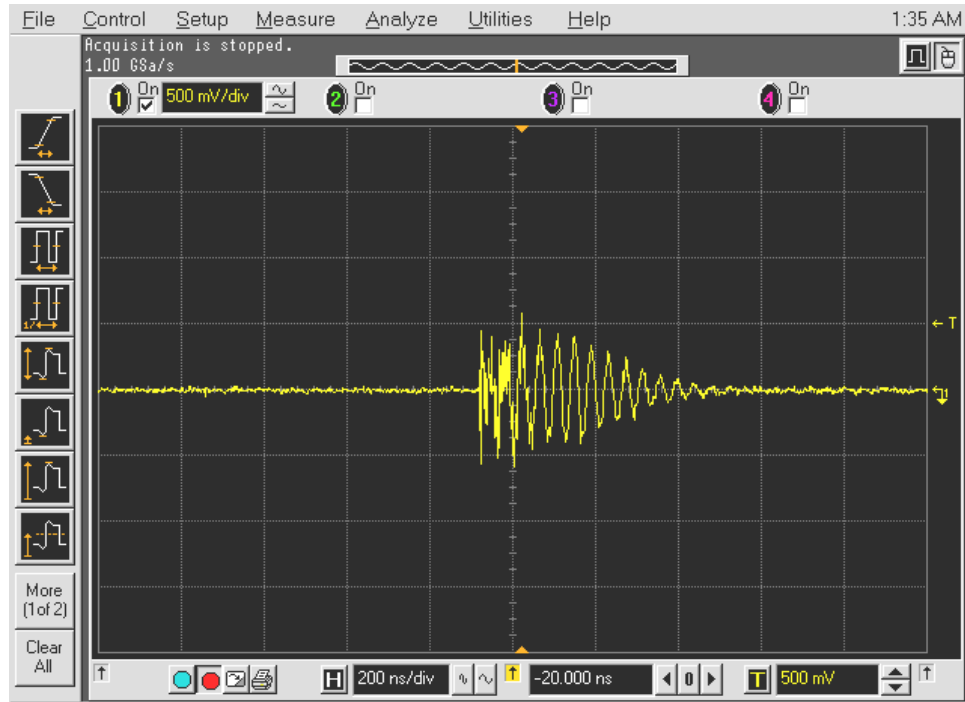
Şekil 5.22. Şekil 5.19’da verilen girişimin frekans bölgesindeki görüntüsü

Bu bölümde anlatılan çalışma, üretcin ve deneyde kullanılan numune devrede meydana gelen boşalma olayının çevrede oluşturduğu elektrik alanı belirlemiştir. Bu

Çalışma bir adım daha ileriye götürülmüş ve çevrede oluşan bu elektrik alanının bir iletim hattına (kabloya) ne derece kuple olduğu bulunmaya çalışılmıştır. Bu amaçla şekil 5.18'deki düzenek aynı şekilde kurulmuş, sadece alıcı görevi yapan bikonik anten yerine akım izleme probu takılmıştır. Kelepçe şeklindeki bu prob, 10 kHz – 150 MHz aralığında çalışmakta ve içinden geçirilen iletkenin üzerindeki işaretleri osiloskoba iletmektedir. Algılanacak işaretin düzeyinin düşük olması beklendiğinden 20 dB'lik zayıflatıcı kullanılmamıştır.

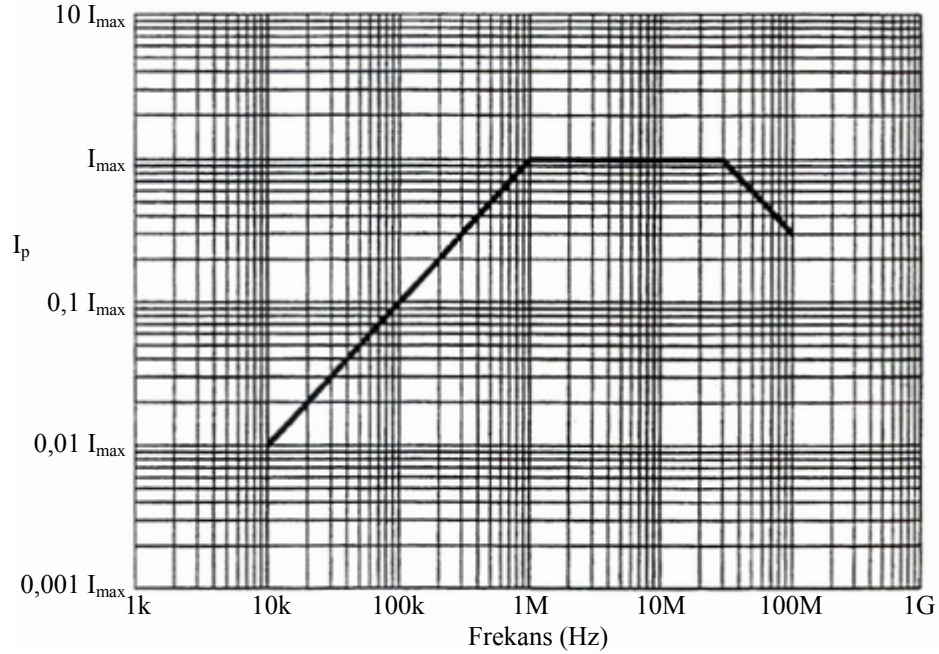
rete-rnek devre düzeneğinden 1 m uzağa, iletken toprak düzlemin üzerine konulan 5 cm yüksekliğindeki yalıtkan köpük üzerine 1 m uzunluğunda sıradan bir aygıt g kablo konulmuş, kablunun bir ucu şebekeyi yapay olarak benzeten LISN'a bağlanmıştır. Faz-nötr ve toprak iletkenlerinden oluşan g kablusunun diğer ucu ise sırasıyla 1 Ω , 50 Ω ve 1 k Ω ile sonlandırılmıştır. Bu dirençler sırasıyla kısa devre, standart devre ve açık devre durumlarına karşılık gelmektedir. Akım izleme probu g kablusunun dirençle sonlandırılan ucuna 5 cm uzaklığa konulmuştur.

Düzenek hazırlandıktan sonra üreteç çalıştırılmış, 10 kV'ta örnek devre kartında boşalma meydana gelmiş, bu sisteme 1 m uzaklıktaki sıradan bir g kablusunda endüklenen akım, prob ve osiloskop ile llp görüntülenmiştir. şekil 5.23 osiloskopta elde edilen bir görüntüyü göstermektedir.



şekil 5.23. Girişim işaretinin kabloya kuple olduğu durum

Kabloya ulaşan işaret, kablonun zayıflatıcı etkisi ile sönümlü bir salınım göstermektedir. 50 Ω 'luk sistemde alınan bu görüntü akıma çevrilecek olursa tepetepe değeri olan $1250 \text{ mV} / 50 \Omega = 25 \text{ mA}$ akıma karşılık gelir. Bulunan bu değer MIL-STD 461D dokümanındaki CS116 deney sınırlarının altındadır (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. MIL-STD 461D CS116 deney sınırı ($I_{\max}$ Kara ve Deniz Kuvvetleri aygıtlarında 10 A, Hava Kuvvetleri aygıtlarında 5 A alınır.)

Bu bakımdan böyle bir deneysel çalışmanın, CS116 deneyinden başarıyla geçmiş bir askeri aygıtın 1 m yakınında yapılması durumunda standartlar içinde olumsuz etkisi bulunmamalıdır. Buna rağmen 1 m uzaklıktaki iletkenlerde 25 mA akıtan sistem, birçok duyarlı aygıt için bozucu etki oluşturabilir ve göz önüne alınması gerekir [57].

Kabloya kuple olan işaretin frekans bölgesindeki görüntüsü Şekil 5.25'te verilmiştir. Burada spektrum incelenecek olursa kabloya kuple olan işaretlerin en önemlilerinin 23 MHz ve 135 MHz frekansa sahip oldukları görülebilir. Şekil 5.25, sistemden çevreye yayılan alanın spektrumunu gösteren Şekil 5.22 ile karşılaştırılacak olursa bu iki şekilde en yüksek genlikli işaretlerin aynı frekansa (23 MHz ve 135 MHz) sahip olduğu görülebilir. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü kabloya kuple olan işaret, sistemden ortama yayılan işarettir. İki şekil arasındaki fark genlikten kaynaklanmaktadır. Kuple olan işaretin, ortamdaki işarettten daha düşük genliğe sahip olması beklenen durumdur.



Şekil 5.25. Kabloya kuple olan işaretin frekans bölgesindeki görüntüsü

6. TEORİK ÇALIŞMA

Önceki bölümlerde verilen deneysel çalışma ile farklı elektrot sistemlerinde boşalma olayının gerilimin genliği ile değişimi incelenmiştir. Yapılan bir başka çalışma ise farklı elektrot sistemlerinde boşalmanın meydana geldiği noktaların saptanmasıdır. Bu saptama, boşalma sırasında göz ile izlenerek belirlenebildiği gibi, çok sayıda darbe uygulanan her bir numunenin boşalmalar sonucu yapısında meydana gelen fiziksel bozulmanın elektron mikroskobu ile incelenmesi ile de desteklenmiştir.

Bu bölümün amacı, yapılan deneysel çalışmayı teorik hesaplamalar ve açıklamalar ile desteklemektir. Bu amaçla önce, deneyde kullanılan yedi farklı akım yolunun geometrisine, boyutlarına ve 1 mm, 2 mm ve 3 mm elektrot açıklıklarının herbirine bağlı olarak, toplam 21 durum için, uygulanan darbe geriliminin tepe değerinde oluşturdukları elektrik alan dağılımı ve maksimum alanın mutlak genliği araştırılmıştır. Bir akım yolu (elektrotu) bir darbe üreticinin yüksek gerilim çıkış ucuna, diğer akım yolu (elektrotu) üreticinin topraklanmış çıkış ucuna bağlanmış karşılıklı iki akım yolu arasına (elektrot sistemine) uygulanan gerilim, elektrot sistemine bağlı olarak farklı noktalarda farklı değerlerde alan zorlanmalarına neden olacaktır. Bu zorlanmaların belirlenmesi için elektrotların, uygulanan gerilim sonucu yarattığı alan dağılımları incelenmelidir. Alan dağılımını bulmanın bilgisayarla hesaplamalı yolu, sayısal analiz yöntemlerinden birini kullanmaktır. Bu çalışmada sayısal yöntem olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır [64]. Alan dağılımı bulunacak ortamın küçük sonlu elemanlara ayrılarak, her eleman içinde alanın ayrı ayrı incelenmesi ilkesine dayanan bu yöntemde, sonlu elemanlar ne kadar küçükse ve eleman sayısı ne kadar fazlaysa, hesaplama sonucu o derece hassaslaşır [65]. Bu nedenle hesaplamada bilgisayar desteği almak, gerçeğe daha yakın sonuç almayı kolaylaştıracaktır [66].

Bu bölümün sonunda hem deneysel çalışmalarda hem de yapılan elektrik alan analizleri sonunda gözlenen ve elde edilen bilgileri değerlendirmek amacıyla boşalma olaylarının fiziksel açıklamaları ve değerlendirmeleri verilmiştir.

6.1. Problemin Kuramsal Temeli

Akım yollarından oluşan elektrot sisteminin elektrik alan incelemesinde problemin geometrisi kartezyen koordinatlarda incelemeye uygun olduğunu göstermektedir. Problemden akım yollarına uygulanan gücün, zamanla değişen gerilim bileşeni (dolayısıyla elektrik alan) çok yüksek, akım bileşeni (dolayısıyla manyetik alan) ise ihmal edilecek kadar küçüktür. Bu nedenle **E** elektrik alan şiddetini, **B** manyetik akı yoğunluğunu göstermek üzere elektromanyetik alan incelemelerinde göz önüne alınan Maxwell denklemlerinden biri olan

$$\text{rot}\mathbf{E} = \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6.1)$$

denklemini (Faraday Yasası), incelenen durum için

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0 \quad (6.2)$$

olarak yani elektrik alanının rotasyonelsiz bir alan olduğu şeklinde yazılabilir. Kapasitesi ihmal edilecek kadar küçük ve uçlarına çok hızlı değişen bir darbe gerilimi uygulanmış bir akım yolu çiftinde ρ yük yoğunluğu da sıfır ($\rho = 0$) kabul edilirse, bu tür durumlarda genel denklem olarak kullanılan Poisson denklemi

$$\nabla^2 V = -\rho/\epsilon \quad (6.3)$$

yerine

$$\nabla^2 V = 0 \quad (6.4)$$

Laplace denklemi kullanılabilir. Bu denklemlerde V elektriksel potansiyeli, ϵ ise ortamın dielektrik sabitini göstermektedir. Bu şekilde problemin Laplace denklemi ile incelenebileceği, bu iş için de Sonlu Elemanlar Yöntemi'nden yararlanılabileceği söylenebilir. Kartezyen koordinat sisteminde iki boyutlu Laplace denklemi,

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (6.5)$$

şeklinde yazılır. Böyle bir Laplace alanı için, kartezyen koordinat sisteminde göz önüne alınan bölgenin tüm S yüzeyi içinde depo edilen elektriksel potansiyel enerji

$$W = \iint_S \left\{ \frac{1}{2} \left[\epsilon_x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \epsilon_y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx \cdot dy \quad (6.6)$$

olur. Burada

$$\left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 = E_x^2 \quad \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 = E_y^2 \quad (6.7)$$

ve ϵ_x ve ϵ_y elektrik alanın yönüne bağlı olarak değer alan dielektrik katsayılarıdır. Dielektrik katsayıları elektrik alanın yönüne bağlı olarak değişmeyen (izotrop, eşyönlü) bir ortamda $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon$ olur. Bu durum için

$$W = \iint_S \frac{1}{2} \epsilon |\nabla V|^2 dx \cdot dy \quad (6.8)$$

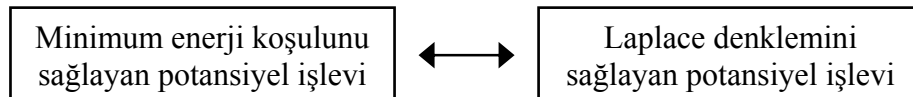
$$|\nabla V|^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} \right)^2 = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \quad (6.9)$$

olur. Yukarıdaki W (enerji) bağıntısında $\epsilon |\nabla V|^2 / 2$ terimi, $dS = dx \cdot dy$ alanındaki enerji yoğunluğunu göstermektedir.

Bir çözüm bölgesi içinde sınır koşullarını sağlayan birden fazla potansiyel işlevi elde etmek olasıdır, ancak bunlardan bir tanesi

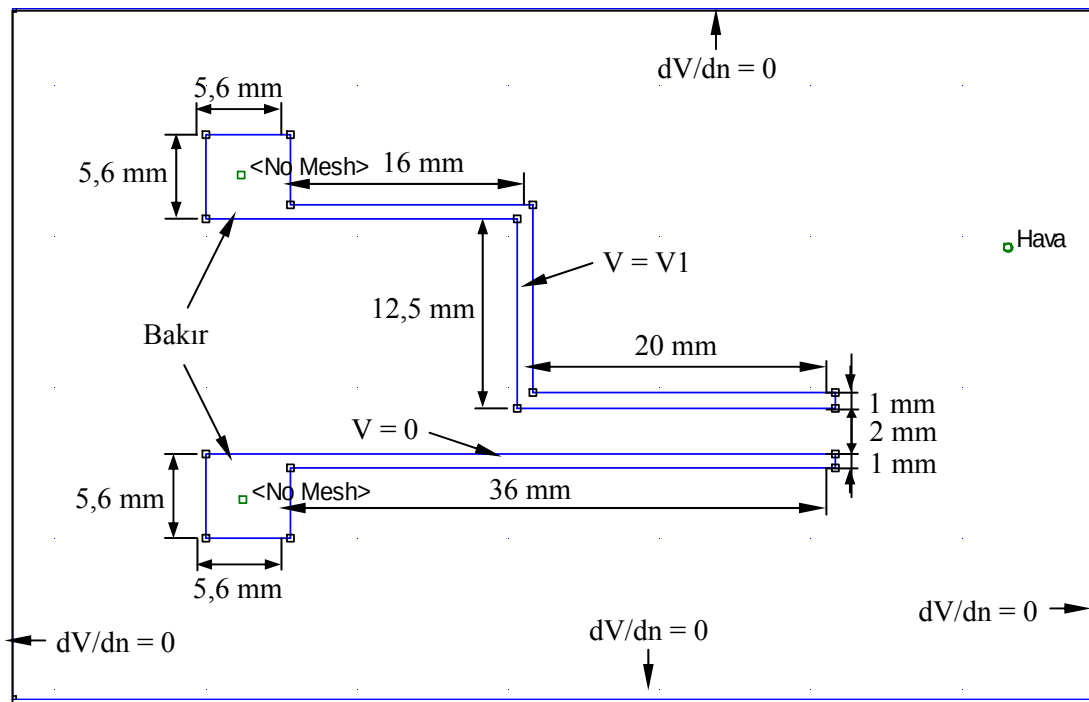
$$\nabla^2 V = \Delta V = 0 \quad (6.10)$$

Laplace denklemini sağlar ve bu işlev tektir. Laplace denklemini sağlayan bu çözüm aynı zamanda bölge içindeki potansiyel enerjiyi minimum yapan çözümdür. Bunun tersi de söylenebilir, yani, bölge içinde enerjiyi minimum yapan potansiyel çözümü, Laplace denklemini sağlayan potansiyel çözümdür. Bu kısaca

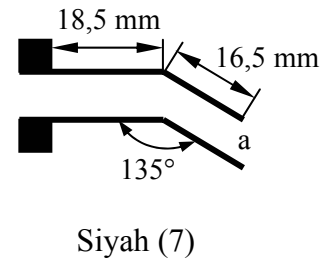
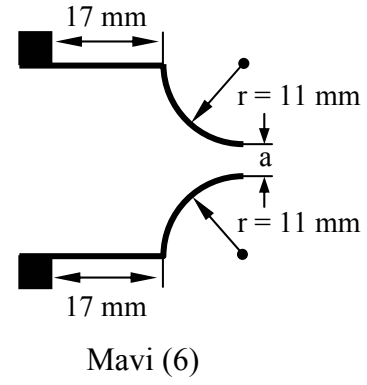
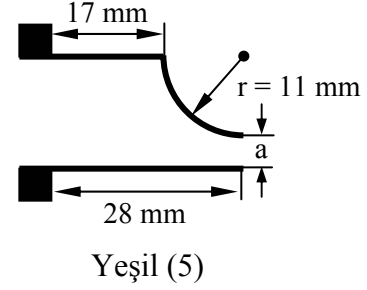
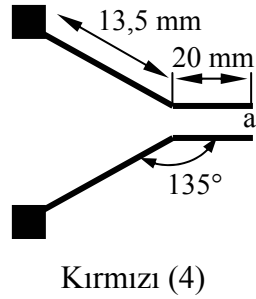
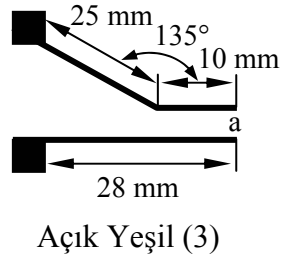
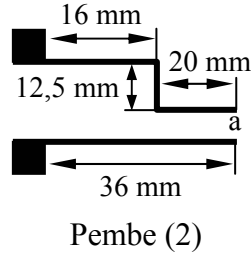
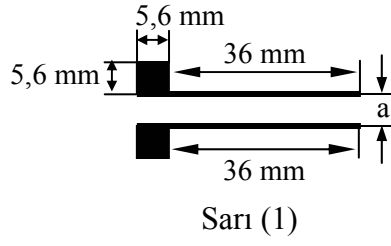


şeklinde gösterilebilir. Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde Laplace denklemini çözmek yerine, enerji denklemini minimum yapan bir potansiyel çözümünü bulmak yoluna gidilir.

Sayısal inceleme, ilkesi sonlu elemanlar yöntemine dayanan FEMM 4.0 [67] adlı hazır bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan program, verilen problemi, üçgen elemanlar kullanarak, sonlu elemanlar yöntemi ile çözmektedir. Programda öncelikle kullanılan iletkenlerin ve dielektrik kartın dielektrik malzeme özellikleri, geometrisi, boyutları ve sınır koşulları tanımlanmıştır. FR4 malzemesinin bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 4,7$ alınmıştır. Şekil 6.1’de örnek olarak tez kapsamındaki deneylerde kullanılan yedi farklı akım yolundan bir tanesinin, programda tanımlanan şekliyle geometrisi, boyutları, malzemesi ve sınır koşulları gösterilmiştir. Şekil 6.2’de ise deneyde kullanılan akım yollarının, programa girildiği şekliyle 1/1 ölçekli çizimleri gösterilmiştir [68].



Deneylerde, üzerinde akım yollarının yer aldığı, 100 mm (en) x 150 mm (boy) x 1,5 mm (kalınlık) boyutlarında bir devre kartı kullanılmıştır. Kart üzerine hazırlanan akım yollarının iletkenleri 1 mm genişliğe ve 3,5 μ m yüksekliğe sahiptir. Hesaplarda akım yolu yüksekliği, diğer boyutlar yanında çok küçük kaldığı için ihmal edilmiştir. Çizilen akım yolları küçük bir devreye benzeyecek şekilde, biri akımı taşıyan, gerilimin uygulandığı (canlı, faz, pozitif) iletken, diğeri dönüş iletkeni (toprak, negatif, nötr) olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.2. Akım yollarının boyutları.

Akım yolu genişliği = 1 mm

Akım yolu yüksekliği = 3,5 μ m

Akım yolu bağlantısı (tüm siyah kareler) = 5,6 mm x 5,6 mm

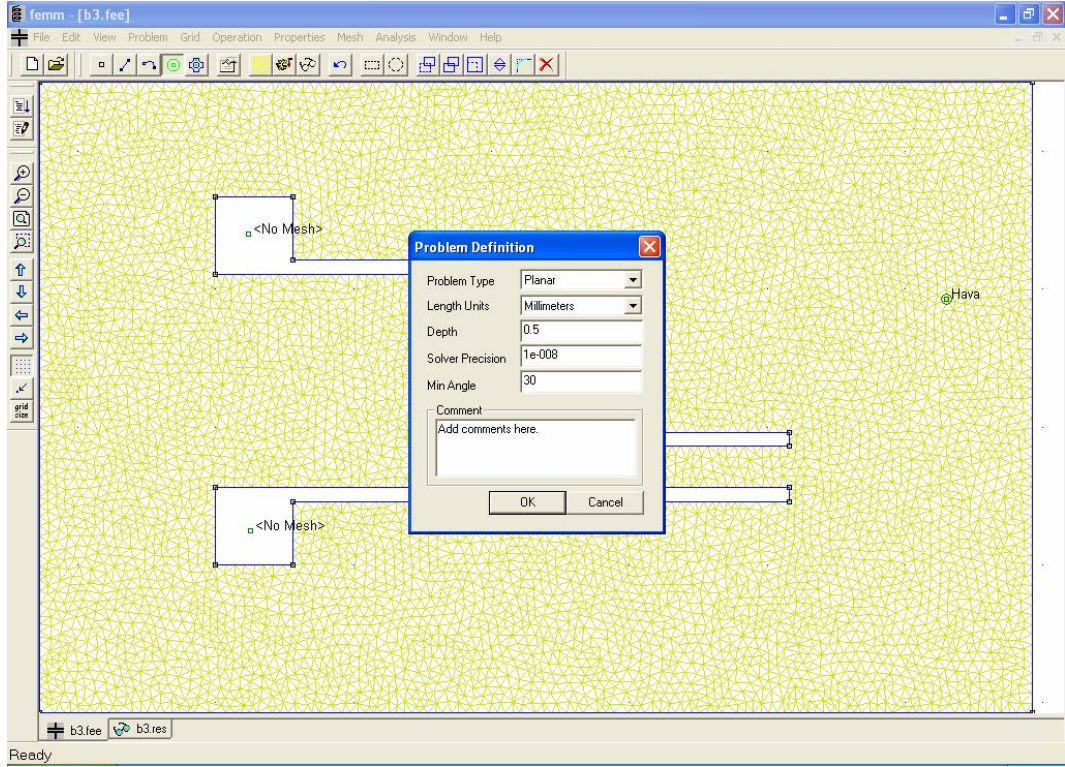
Akım yolları arasındaki minimum açıklık (elektrot açıklığı), a = 1 – 2 – 3 mm

Baskı devre kartının eni = 100 mm

Baskı devre kartının boyu = 150 mm

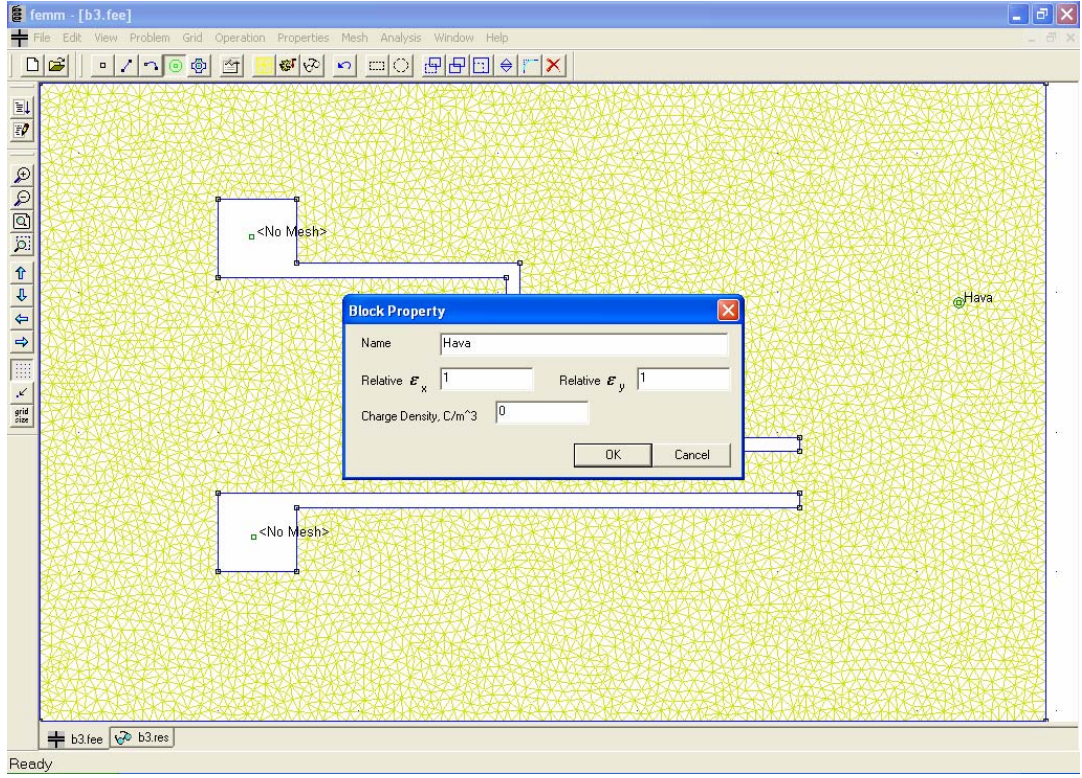
Baskı devre kartının kalınlığı = 1,4 mm

Problem kartezyen koordinatlarda incelenmiş, uzunluklar mm olarak girilmiştir. Program, çözümlemede elde edilen denklem takımını Eşlenik Eğim Yöntemi (Conjugate Gradient Yöntemi) ile çözmekte ve programda yakınsama doğruluğu (bağıl hatası) seçilebilmektedir. Çözümlemede FEMM programının varsayılan doğruluğu olan 10^{-8} alınmıştır (Şekil 6.3). Bu arada, ortam malzeme bilgisi olarak havanın bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 1$ olarak tanımlanmıştır (Şekil 6.4).

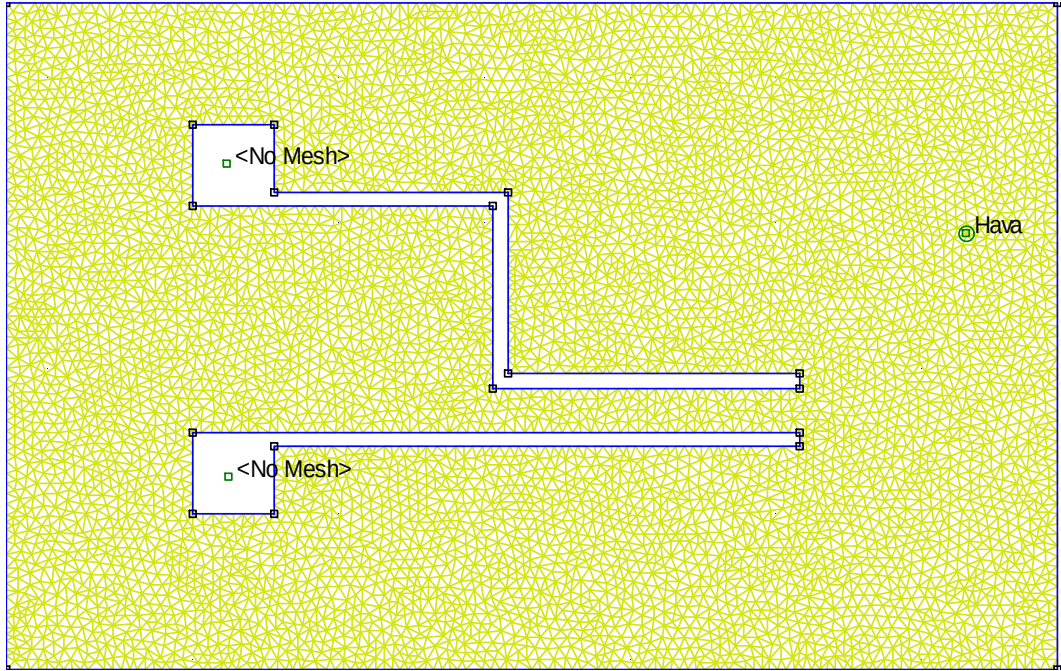


Şekil 6.3. Bir akım yolu problemi için sonlu elemanlar çözümü tanım bilgileri.

Programda bütün tanımlamalar yapıldıktan sonra programca çözüm bölgesi üçgen sonlu elemanlara bölünmüştür (Şekil 6.5). Çözümde kullanılan sonlu eleman sayısı, problem tanımı sırasında girilen en büyük eleman boyutuna bağlı olmaktadır. Bu değer ne kadar küçük alınırsa, kullanılan eleman sayısı o kadar fazla, çözümde elde edilen sonuç o kadar hassas olmaktadır. Ayrıca üçgen elemanların iç açıları için minimum değer olarak 30° seçilmiş, böylece sonlu elemanların problemin geometrisine uyumu ve tanımlanmamış bölge kalmaması sağlanmıştır. Üst görünüme göre yapılan alan hesaplarında, görülen yüzeyden içeri doğru 0,5 mm derinlik alınmıştır. Böylece akım yollarının yüzeye dik geometrisi dikkate alınmıştır. Alan dağılımı, iletkenler dışındaki ortamda gerçekleştiğinden, sadece bu ortam sonlu elemanlara bölünmüş, elektrotlar içinde ise potansiyel ve alan hesabı gerekmediğinden ağ oluşturulmamıştır.



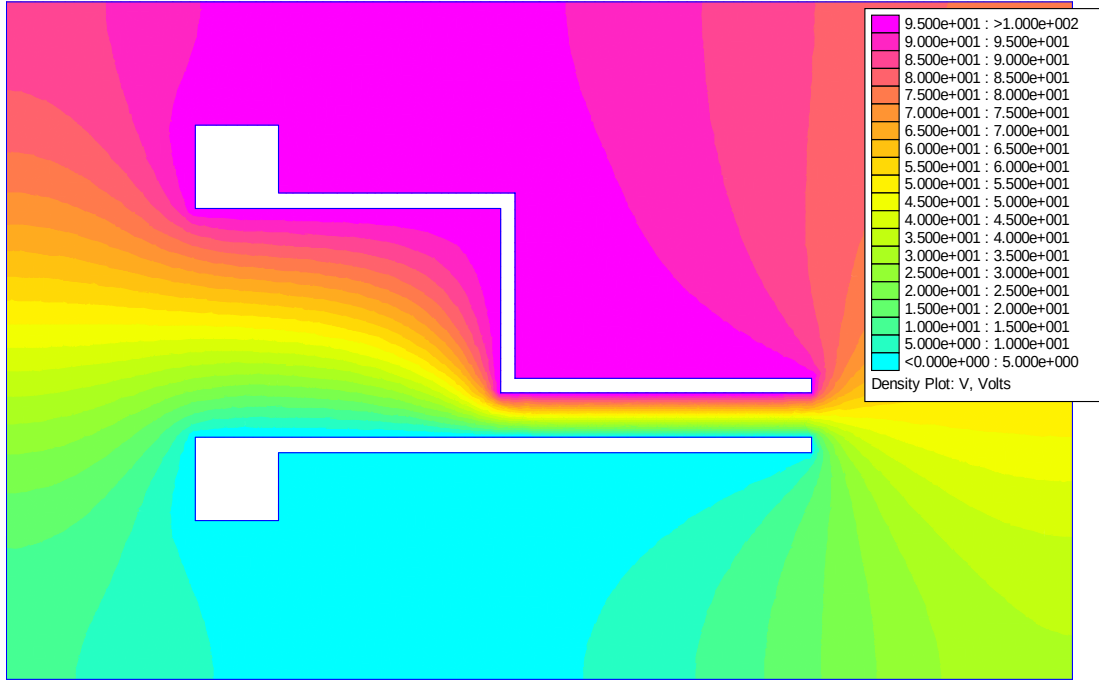
Şekil 6.4. Bir akım yolu problemi için sonlu elemanlar çözümünde ortamın tanımlanması.



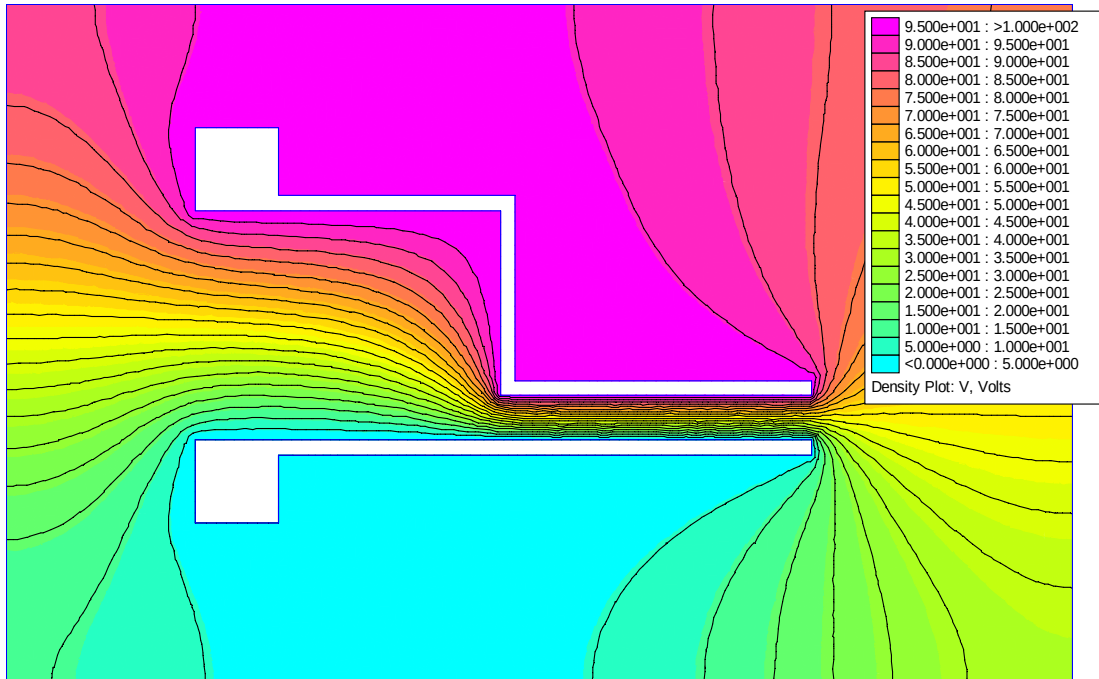
Şekil 6.5. Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar ağı.

Bundan sonraki aşamada problemin önce potansiyel dağılımı analizi yapılmıştır. Potansiyel dağılımını yüzde cinsinden değerlendirme kolaylığı vermesi açısından elektrotlar arasına 100 V uygulanması durumu için ortamdaki potansiyel dağılımı ve

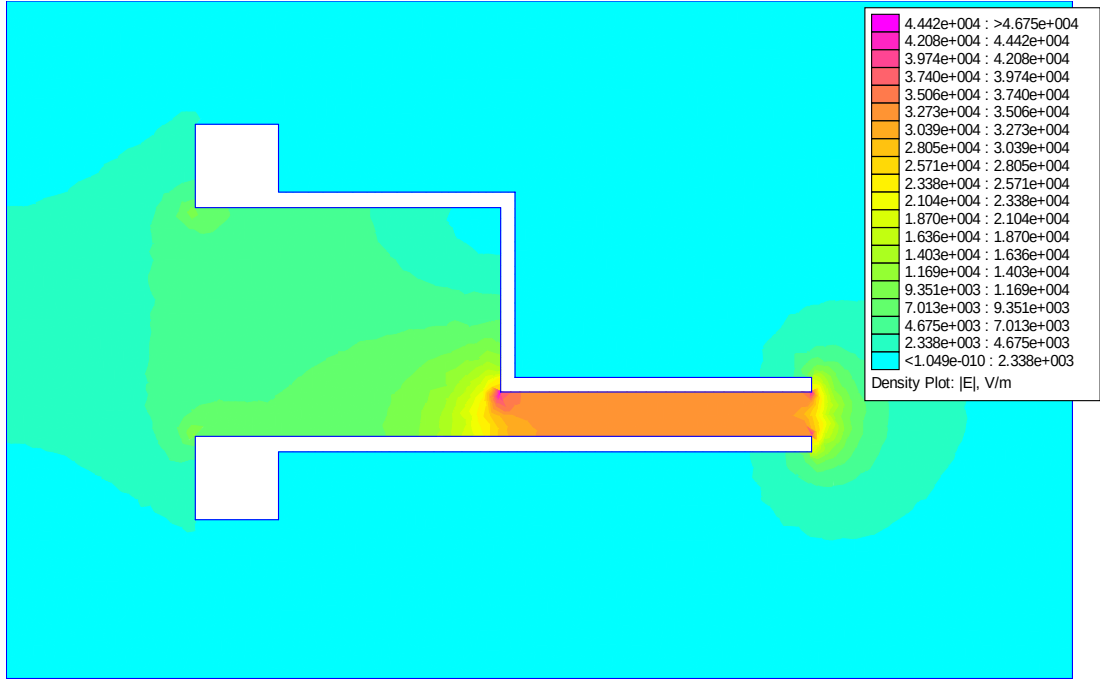
%5 potansiyel farkları ile eşpotansiyel çizgileri elde edilmiş ve sırasıyla Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Bu şekillerde potansiyel düzeyleri farklı renk tonları ile gösterilmektedir. Yine elektrotlar arasına 100 V uygulanmışken elde edilen elektrik alan dağılımı ise Şekil 6.8’de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.6. Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen potansiyel dağılımı.

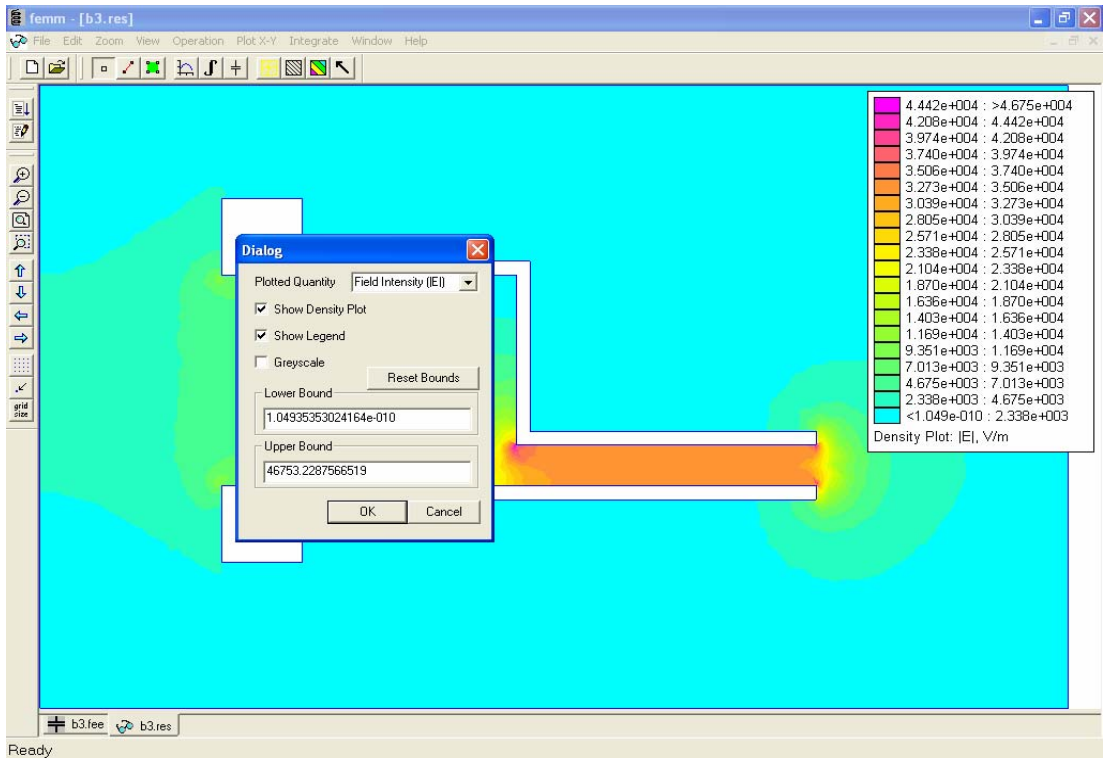


Şekil 6.7. Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen %5 potansiyel farkları ile eş potansiyel çizgiler.



Şekil 6.8. Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen elektrik alan dağılımı.

Elektrotlar arasında boşalma olayının meydana gelmesi, maksimum alan değeriyle ilgilidir. Şekil 6.9’da alan analizi sonunda V/m cinsinden bulunan maksimum (upper bound) ve minimum (lower bound) elektrik alan değerleri görülmektedir.



Şekil 6.9. Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan maksimum ve minimum elektrik alan değerleri.



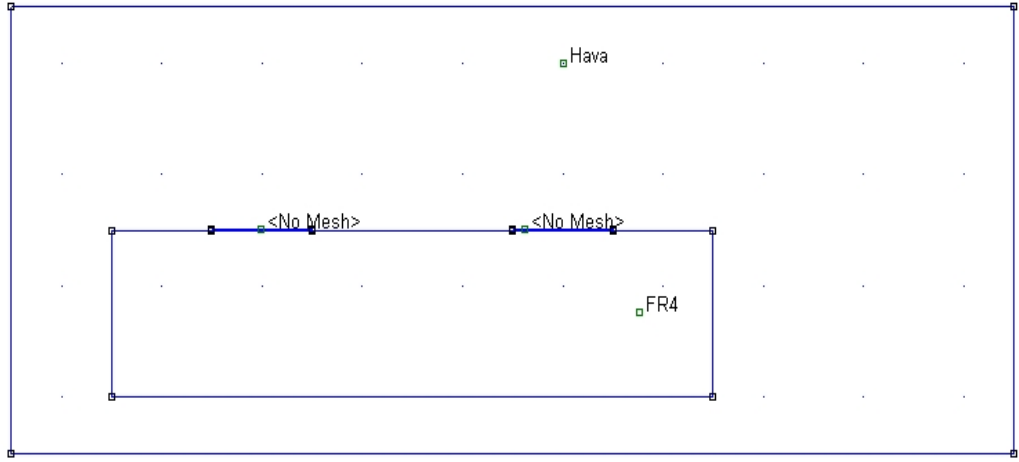
Şekil 6.10. Bir akım yolu şekli için sonlu elemanlar yöntemi ile çözümde kullanılan düğüm ve eleman sayısı.

Diğer akım yollarının (elektrot geometrilerinin) 2 mm elektrot açıklığı için bulunan potansiyel ve elektrik alan dağılımları Ek B’de verilmiştir.

6.3. Problemin Yan Görünüme Göre Çözümü

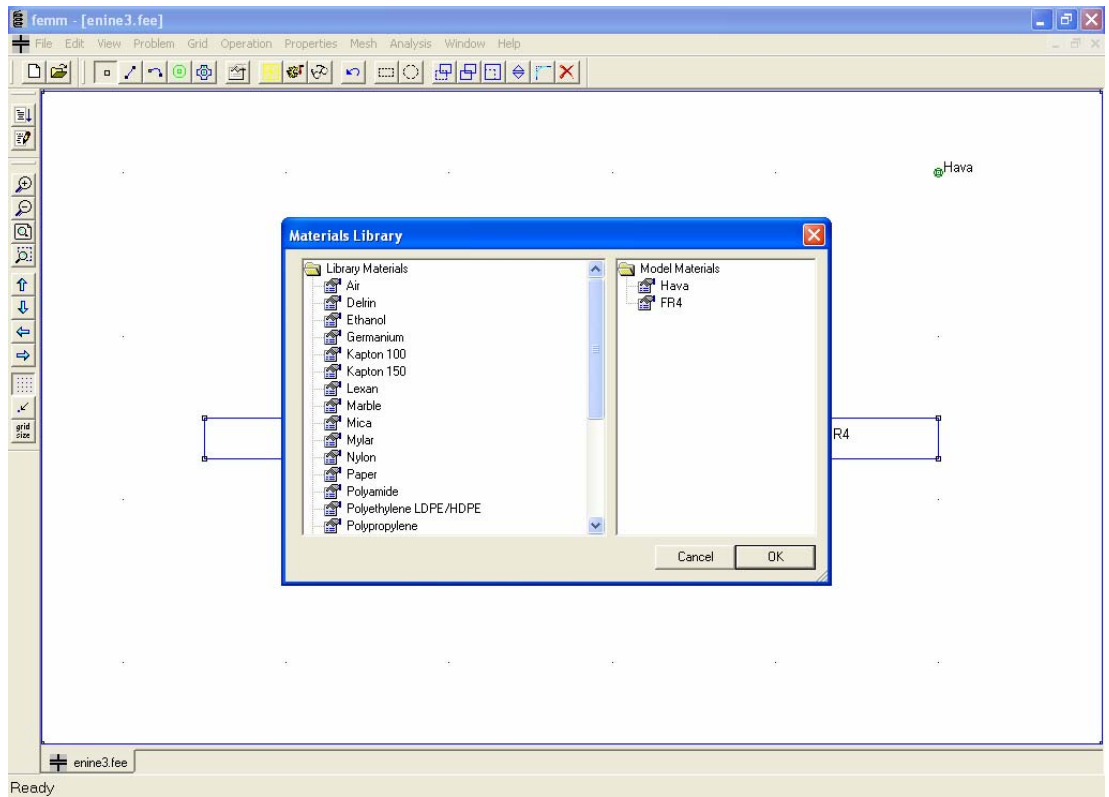
6.2 numaralı bölümde anlatılan çalışmada, elektrot sisteminin hava ortamında oluşturduğu potansiyel ve elektrik alan dağılımı incelenmiştir. Bu incelemelerde elektrot sisteminin üstten görüntüsü değerlendirilmiştir ve oluşturulan potansiyel dağılımları ve alan dağılımları, elektrot sisteminin sadece hava ortamındaki durumu hakkında fikir vermektedir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada elektrotlar FR4 dielektrik malzeme üzerinde bulunmaktadır ve deney hava ortamında yapılmaktadır. Bu durumda, elektrotlar, hava ve FR4 malzemesinin kesiştiği bölgede boşalma gerçekleştirmektedir. Kullanılan sayısal hesaplama programında çizimler ve veri girişleri iki boyut için yapılabilmektedir. Bu nedenle gerçekleştirilen üst görünüm hesaplamasına ek olarak yan görünüme göre de çözüm yapılmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak elektronik devre kartı ve üzerindeki elektrotlar, FEMM programında ölçekli olarak yan görünümleri ile çizilmiştir (Şekil 6.11). Bu çizimlerde, yüzeysel boşalma için arakesit ortamlarını oluşturan hava ve kart malzemesi, beraber tanımlanmıştır.

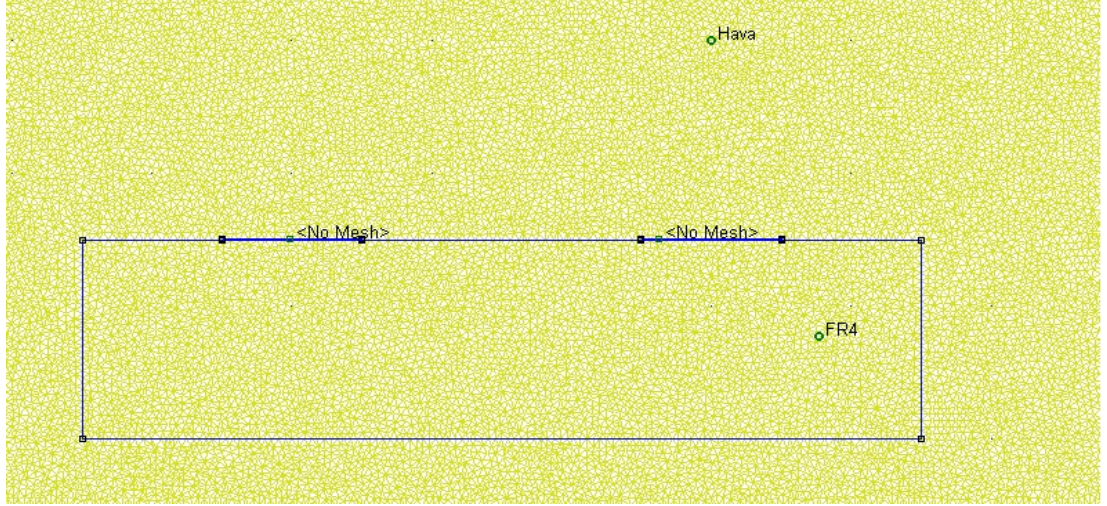


Şekil 6.11. Bir akım yolu şeklinin yandan görünümünün programda tanımlanması.

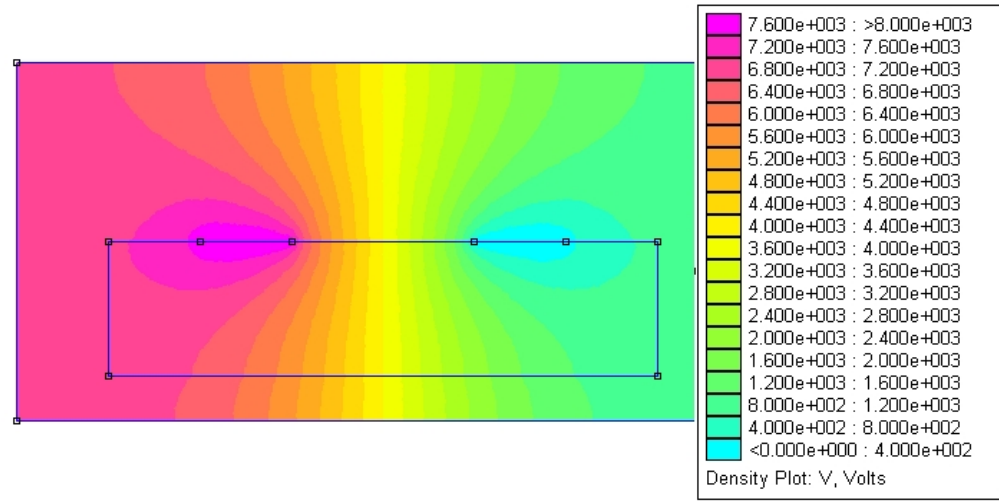
Ortam, hava içinde FR4 kart ve üzerindeki iletken akım yolları olarak tanımlanmıştır. FR4'ün bağıl dielektrik katsayısı $\epsilon_r = 4,7$ olarak alınmıştır (Şekil 6.12). Sonraki aşamada ortam sonlu elemanlara bölünmüş ve program çalıştırılmıştır. Hazırlanmış olan çizim kullanılarak programa önce potansiyel, daha sonra elektrik alan analizleri yaptırılmıştır.



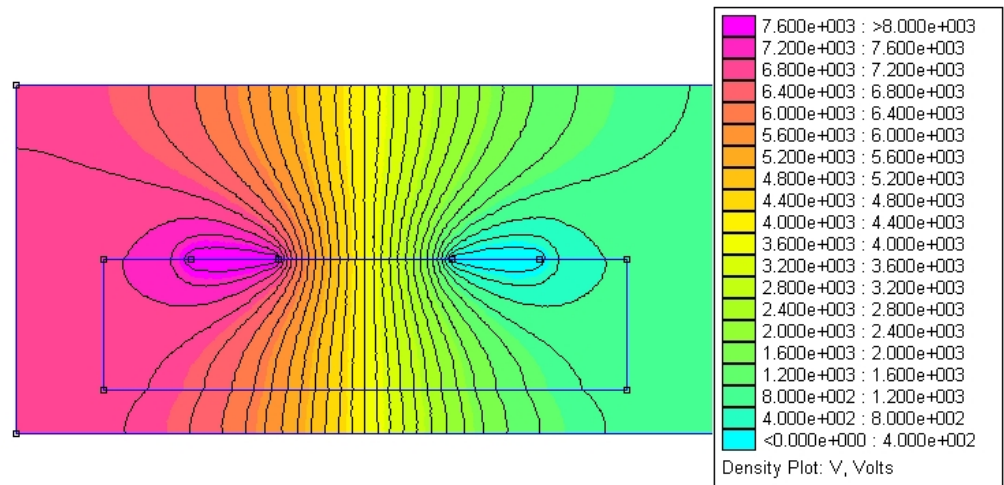
Şekil 6.12. Akım yolu şekli için sonlu elemanlar çözümünde ortamın tanımlanması.



Şekil 6.13. Şekil 6.11’de verilen ortamın sonlu elemanlar ağı.

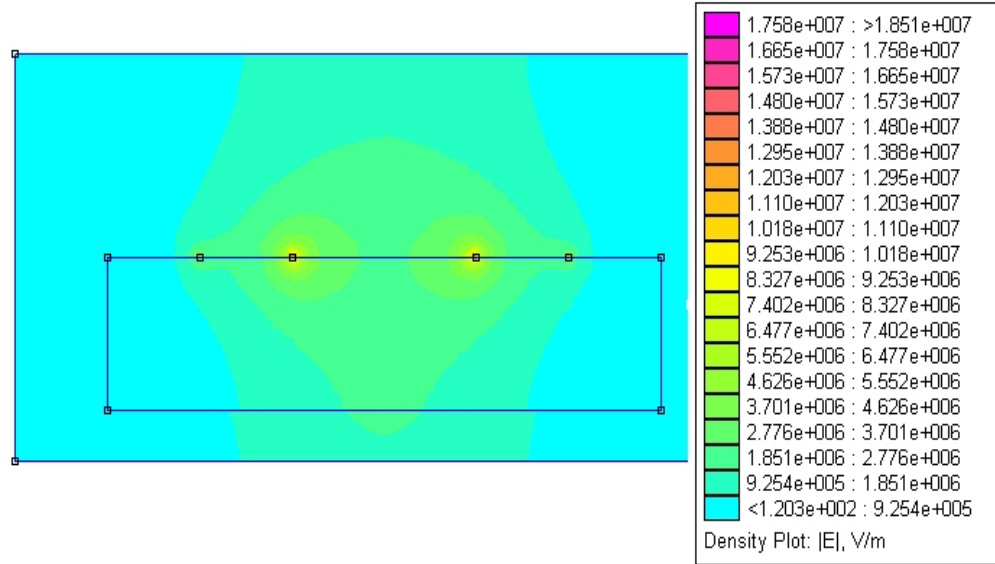


Şekil 6.14. Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen potansiyel dağılımı.

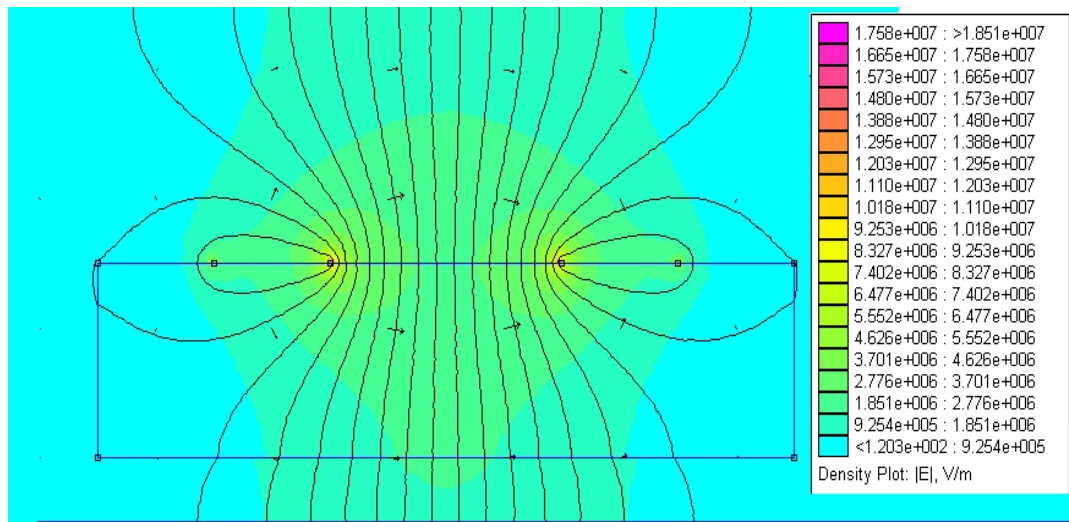


Şekil 6.15. Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eş potansiyel çizgileri.

Elde edilen potansiyel dağılımı ve alan dağılımları, elektrotların birbirlerine paralel ve aralarında 2 mm mesafe olduğu durum için hazırlanmıştır. Şekil 6.16 ve Şekil 6.17 alan dağılımını sırasıyla, yalın olarak ve eş potansiyel çizgileri ile alan vektörlerini birlikte göstermektedir.

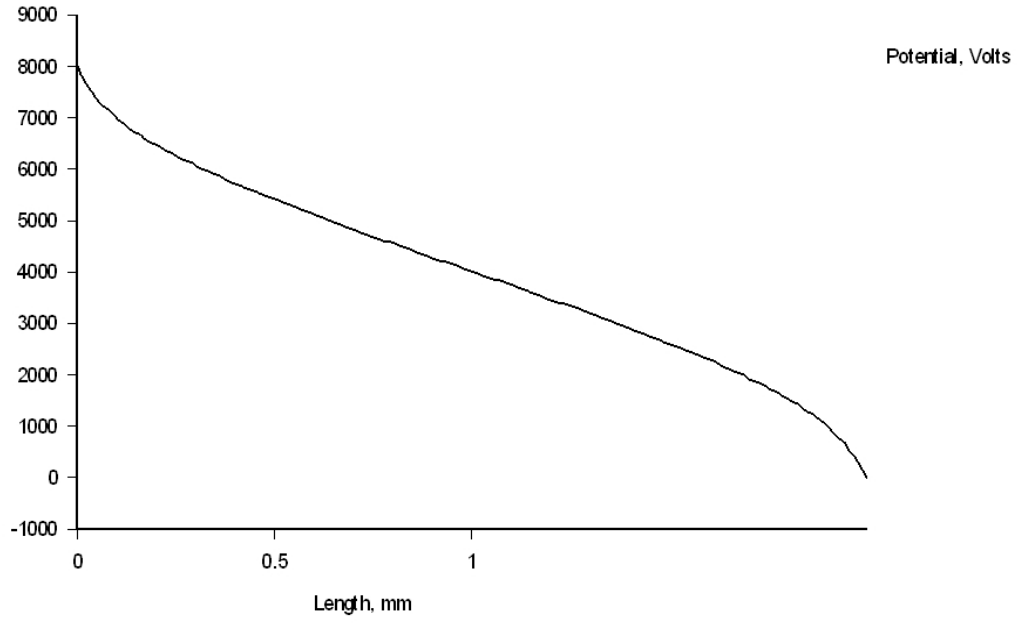


Şekil 6.16. Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen elektrik alan dağılımı.

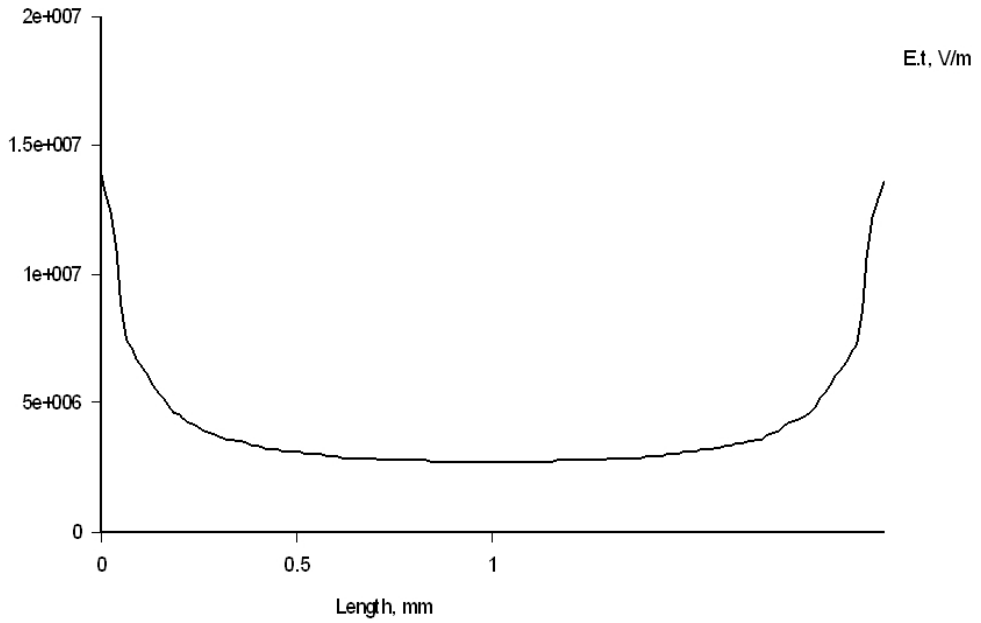


Şekil 6.17. Akım yolu şeklinin sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen eş potansiyel çizgileri ve elektrik alan vektörleri ile birlikte elektrik alan dağılımı.

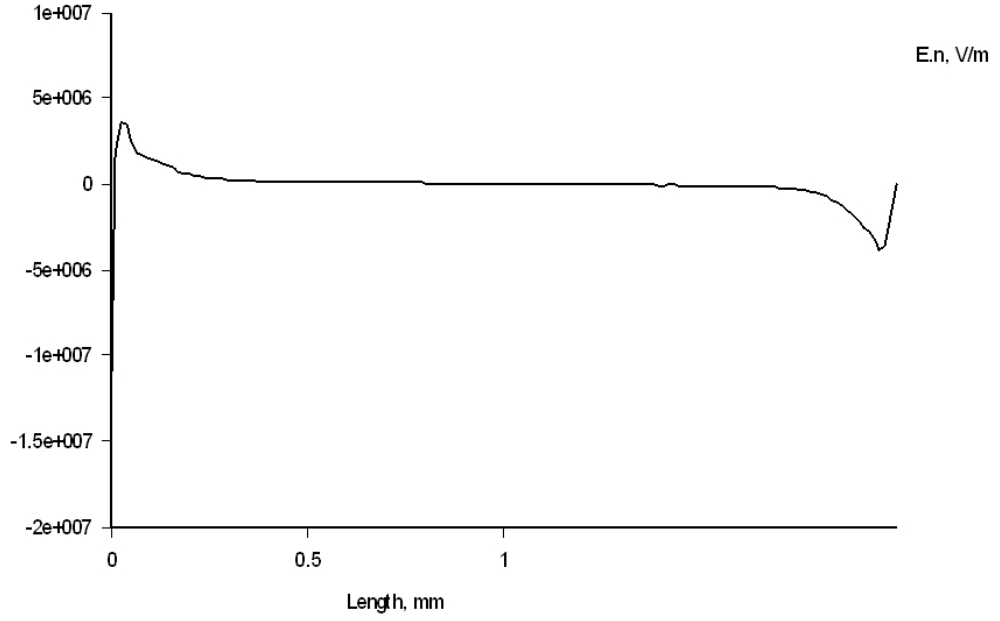
FEMM programı kullanılarak yapılan analizlerden biri de, incelenen sistemin alan ve potansiyel değerlerinin, elektrotlar arası mesafeye göre değişiminin belirlenmesidir. Alan için yapılan analizde, elektrik alanın teğetsel, dik (normal) ve bileşke değerleri için ayrı grafikler çizdirilmiştir (Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20, Şekil 6.21).



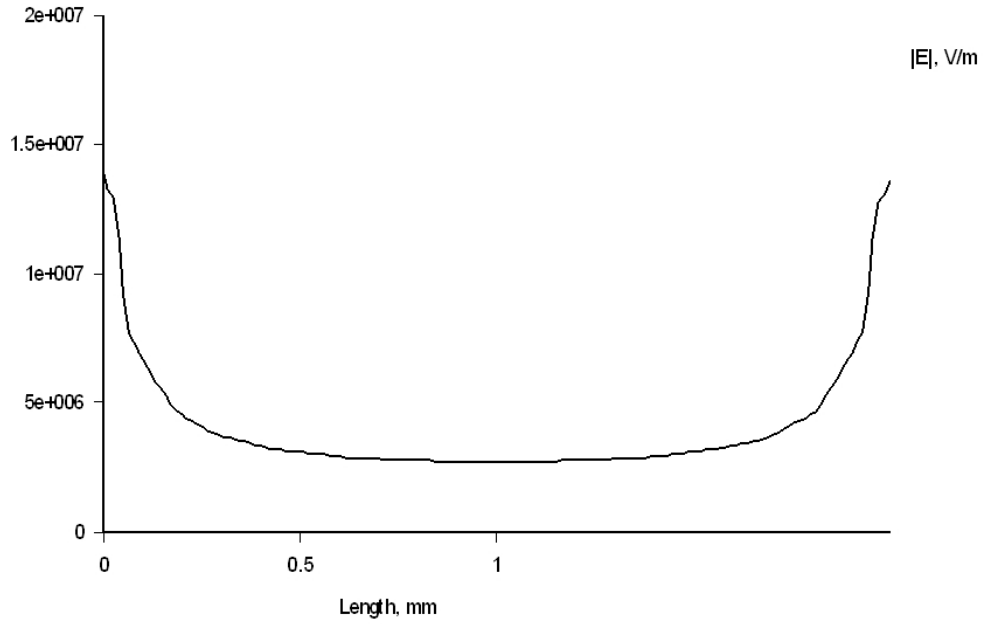
Şekil 6.18. Şekil 6.11’deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta potansiyelin uzaklıkla değişimi.



Şekil 6.19. Şekil 6.11’deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta teğetsel elektrik alan bileşeninin uzaklıkla değişimi.



Şekil 6.20. Şekil 6.11’deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta normal (dik) elektrik alan bileşeninin uzaklıkla değişimi.



Şekil 6.21. Şekil 6.11’deki sistemde akım yolları arasında birbirine en yakın aralıkta bileşke elektrik alan şiddetinin uzaklıkla değişimi.

Bu bölümde örnek bir akım yolu şekli için yapılan analizler, her bir elektrot çifti (akım yolu) için yapılmıştır. Buna göre eş potansiyel veya eş alan bölgeleri aynı renk ile gösterilmiştir. 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 noktalar görülmüştür. Bu bağlamda yapılan deneysel çalışma, teorik

hesaplama ile tam olarak uygunluk göstermiştir ve deneysel çalışmada boşalmalar, teorik çalışma ile saptanan en yüksek alan yoğunluğuna sahip noktalarda meydana gelmiştir.

Deneysel çalışma sırasında elektrotlara uygulanan gerilim programa girilmiş, boşalma meydana getiren gerilim düzeylerinde elektrotlar arasında oluşan potansiyel ve elektrik alan dağılımları incelenmiş, en büyük alan değeri saptanmıştır. Bu tezde verilen çözümlemelerde gerilimin tepe değeri olarak 8 kV değeri alınmıştır. Tablo 6.1, her bir akım yolunda, 8 kV gerilim uygulanmış halde, 1 mm, 2 mm ve 3 mm elektrot açıklıkları için ayrı ayrı elde edilen en büyük ve en küçük elektrik alan değerlerini göstermektedir.

Tablo 6.1. Elektrotların farklı elektrot açıklıklarında, 8 kV için en büyük ve en küçük alan değerleri

(a: Elektrot açıklığı (mm); E: Elektrik alan şiddeti (kV/m); AY: Akım Yolu)

a (mm)	E (kV/m)	1 no'lu AY	2 no'lu AY	3 no'lu AY	4 no'lu AY	5 no'lu AY	6 no'lu AY	7 no'lu AY
1 mm	Maks. E	8.036	9.287	8.697	8.981	8.792	8.538	10.413
	Min. E	0	0	0	0.755	0	0	0
2 mm	Maks. E	4.639	5.392	4.678	4.886	4.840	4.570	6.834
	Min. E	0	0	0	0.782	0	0	0
3 mm	Maks. E	4.167	3.954	3.632	4.280	3.540	3.422	5.657
	Min. E	0	0	0	0.600	0	0	0

Tablo 6.1'e bakarak maksimum elektrik alan şiddetinin artan elektrot açıklığı ile azaldığı, 7 numaralı akım yolunda her durumda diğer akım yollarındakinden daha yüksek alan ortaya çıktığı, bunun sonucu olarak boşalma olayları bakımından diğerleri arasında en olumsuz geometri olduğu görülmektedir. Yine aynı tablodan, en az zorlanan dolayısıyla boşalma olaylarının en geç başlayacağı yani diğerlerine göre daha güvenilir olan akım yolunun 1 numaralı akım yolu olduğu söylenebilir. En büyük alan şiddetleri bakımından akım yolları numaralarına göre en yüksekten en alçağa doğru sıralanırsa, 7 – 2 – 4 – 5 – 3 – 6 – 1 şeklinde sıralama söz konusudur. Bu sıralamaya, akım yollarında boşalma olayı ortaya çıkma önceliği sıralaması olarak bakılabilir.

Yapılan analizlerde, numuneye 8 kV tepe değerli darbe gerilimi uygulanması durumuna göre çözümler bulunmuş ve bu gerilim değeri için akım yollarının elektriksel dayanım (maksimum alan şiddetleri) bakımından sıralaması yapılmıştır. 8 kV tepe değeri yerine darbe geriliminin başka bir $t = t_1$ anındaki gerilim değeri

(örneğin gerilim 5 kV) için de çözümlemeler yapılabilir. Bu çözümlemeler sonunda da elektrotların potansiyel ve alan dağılımları şekil olarak değişmeyecek, maksimum alan genlikleri değişse de yerleri ve elektrotların buna göre sıralaması aynı kalacaktır.

Hesaplama elde edilen alan şiddetleri teorik olarak uygun, pratikte ise gerçeğe oldukça yakındır. Ek B’de verilen alan şiddetleri ve Tablo 6.1’deki en düşük ve en yüksek alan şiddetleri incelenecek olursa 35 kV/cm – 100 kV/cm aralığında alan şiddetleri görülebilir. Bu değerler uygulama açısından kabul edilebilir ve beklenen değerlerdir.

6.4. Boşalma Olaylarının Kuramsal Değerlendirilmesi

Yüzeysel boşalmalar, endüstriyel uygulamalar ve yüksek gerilime maruz kalabilecek sistemlerin güvenli çalışması için üzerinde durulması gereken konulardır. Katı yalıtkan malzeme üzerinde oluşabilecek bir yüzeysel boşalma, malzeme yüzeyine paralel bir teğetsel elektrik alan varlığında mümkündür. Katı-hal yarı-iletken anahtarlarda yüzeysel boşalmanın kullanılan malzemelerin delinme dayanımlarından çok daha küçük alan değerlerinde oluştuğu bilinmektedir. Örneğin silikonun delinme elektrik alan şiddeti (delinme dayanımı) 300 kV/cm ve vakumun delinme dayanımı 350 kV/cm olmasına rağmen genellikle silikon-vakum sisteminde yüzeysel boşalma 7-25 kV/cm elektrik alan şiddetinde gözlenmektedir [37].

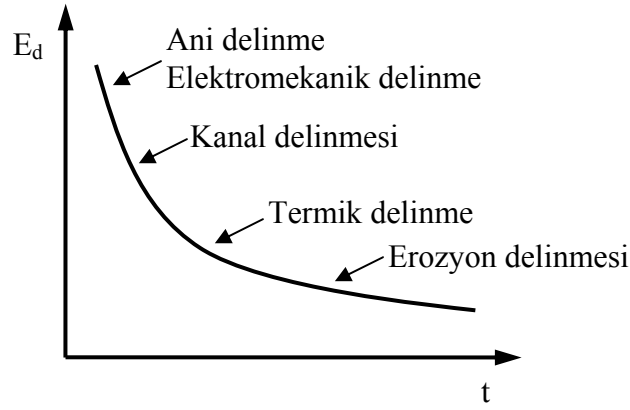
Bir malzemenin yüzeyinin delinme dayanımı, mevcut yüzeysel elektrik alan zorlamasını karşılayamazsa malzeme yüzeyi boyunca yüzeysel boşalma meydana gelir. Bunun sonucunda geçici veya kalıcı olarak malzemenin yalıtım özelliği kaybedilir. Yüzeysel boşalmanın oluşumu, yüzeyin yapısı ve çevre koşulları ile doğrudan ilgilidir. Bir katı malzemenin yüzey atomları, doymamış kimyasal bağların bulunması nedeniyle kısmen aktif yapıdadır. Böylece yüzey genel olarak bir veya birden çok saf olmayan katmanlar veya atmosfer atom ve molekülleriyle kaplıdır. Bu katmanlar yüzeysel boşalmada önemli rol oynar [40].

İletken elektrotlar arasında kalan bir katı yalıtkan gerilim uygulandığında, ortamdaki gaz ya da boşluğun dayanma gerilimi, katı yalıtkanın bulunmadığı duruma göre daha düşük olur. Elektrot, katı yalıtkan ve gaz üçlünün kesiştiği bölgenin, elektrik alanını arttırdığı ve bu alan artışının katot üçlü noktasında elektronları daha

kolay hareketlendirdiği bilinmektedir. Çıkan elektronların yönü değişkenlik gösterir. Elektron çıkışındaki açısal dağılımın, ışılan yüzeye dik bir eksenle yaklaşık olarak kosinüs kuralına uygun olduğu düşünülebilir. Işıma yönündeki bu dağılım nedeniyle, katot üçlü noktasından kopan bazı elektronlar, katı yalıtkan yüzeyini bombardıman edebilir. Bu bombardıman, yalıtkan yüzeyinden “ikincil elektron emisyonu” ile daha fazla elektronun kopmasına neden olur. Yalıtkan yüzeyinden kopan ikincil elektronlar, geride, yüzeyde pozitif yük bırakırlar. Böylece, katot çevresindeki yalıtkan yüzey, yeniden oluşan ikincil elektronların bombardımanının sonucu hızla artan pozitif yüklenme içerisine girer. Bu da büyüyen bir katot alanına neden olur. Genel olarak yüzeysel boşalmaların nedeni olarak, katottaki bu alan değerinin artışı sonucunda oluşan boşalmalar ve boşalmanın çığ olayı ile gelişmesi ve gazdaki iyonizasyon kabul edilir.

Bilindiği gibi, bir katı malzemenin yüzeyi, esas hacimsel yapısından oldukça farklıdır. Yüzeyde bozulmalar ve katışıklıklar daha fazladır ve bunlara genel olarak yüzey durumu denir. Böyle bir katı yalıtkan yüzeyi gerilim altında bırakıldığında, bu yüzey yakalayıcı kapan gibi elektrik alan etkisiyle hareket eden yük taşıyıcılarını yakalar. Böylece yüzeysel elektrik alanı bölgesel olarak bozulur ve yükler arada yığılır [69 - 74].

Katı yalıtkanlarda boşalma olayları, gerilimin uygulanma süresine çok bağlıdır. Delinme dayanımının değeri, nanosaniye ve mikrosaniye mertebesindeki kısa ve orta süreli gerilim uygulamalarında çok farklı olur. Şekil 6.22, delinme dayanımının gerilimin uygulanma süresine bağlı değişimini vermektedir. Burada görüldüğü gibi ani delinme ve elektromekanik delinme daha yüksek dayanım değeri karşısında meydana gelmektedir. Erozyon delinmesi ve termik delinme için daha uzun süreye gereksinim vardır. Malzemelerin darbe gerilimi karşısındaki dayanım değerlerinin alternatif veya doğru gerilime göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Ani delinme, çok kısa zaman diliminde (ns) meydana geldiği için elektroniktir. Ani delinme dayanımına, yalıtkan içindeki elektronların uygulanan alandan kazandıkları enerjinin elektronların birleşme değerinden iletim bandına geçmelerini önleyen engeli aşmalarına yeterli olması durumunda erişildiği kabul edilir. Ani delinmeye neden olan alan şiddetinin değerini tahmin etmek için birçok yaklaşımda bulunulmuştur [75].



Şekil 6.22. Delinme dayanımının gerilimin uygulanma süresine göre değişimi

Ani delinme olayı, nanosaniyelik darbeler için geçerlidir. Böyle bir zaman mertebesine sahip darbeler karşısında boşalmanın meydana gelebilmesi için gerekli şart, gerilimin yukarıda konu edildiği gibi boşalmayı tetikleyebilecek kadar uzun süre uygulanması veya uygulanan gerilim genliğinin ihtiyaç duyulan eşik değerin çok üstünde olmasıdır. Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada kullanılan darbeler nanosaniye süreli olduğundan uygulama süresinin gerekliliği ve dolayısıyla etkisi ikinci planda kalmıştır. Uygulanan gerilimin genliği, ani boşalma sağlayacak kadar büyüktür. Bu durum gözönüne alındığında, uygulanan darbe geriliminin tepe değeri ön plana çıkmaktadır. Sayısal hesaplama aşamasında, uygulanan darbenin herhangi bir “t” anındaki değeri göz önüne alınmıştır. Burada genel değerlendirmeler ve yorumlar, gerilimin tepe değerine ulaştığı “t” zamanı için yapılmıştır.

6.4.1. Yüzeysel Boşalmalar

Yüzeysel boşalmaların başlaması, teğetsel alan şiddeti, normal olarak komşu malzemelerin dayanımından daha düşük olan yüzeysel delinme dayanımına eriştiğinde olur. Elektrik alan şiddeti ve delinme dayanımı darbe, ac ve dc alanlarda farklıdır.

Darbe alanları yalnızca yalıtkan malzemelerin dielektrik sabitlerine bağlıdır. Bu yüzden Sonlu Elemanlar Yöntemi programları ile hesaplanabilirler ve saf kapasitif devrelerle gösterilebilirler. Alan şiddeti kısa elektrotların kenarlarında çok kuvvetlidir. Alternatif akım alanları da, yüzey dirençleri ihmal edilebilirse, darbe gibi tanımlanabilirler. Dikkate değer yüzey iletkenliği durumunda devreye dirençler

eklenebilir. Doğru akım alan dağılımları yüzeyssel ve hacimsel dirençler tarafından belirlenir. Yüzeyssel boşalmalar, elektrot kenarında maksimum teğetsel alan şiddeti yüzeyssel delinme dayanımına ulaştığında başlar.

Darbe ve ac gerilimler için akım temel olarak kapasiteler tarafından belirlenir. Öncü boşalmaların, biriktirilen $W_C = (1/2) C.U^2$ enerjiye eşit W_R akım kayıplarının W_{th} termoiyonizasyon sınırına ulaştığında başladığı kabul edilir.

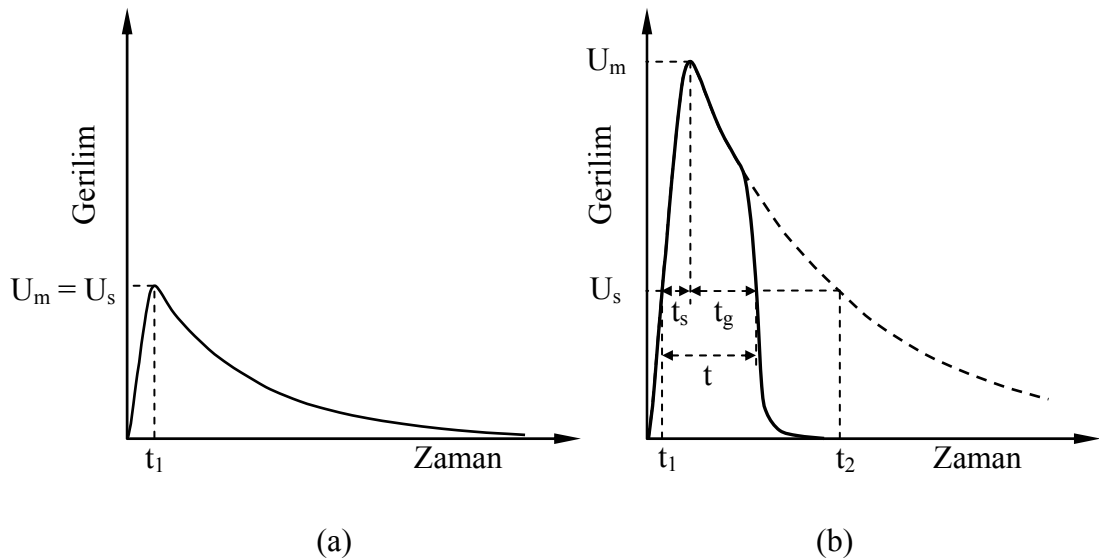
$$U_{leader} = \sqrt{\frac{2W_{th}}{C}} \quad (6.11)$$

Eğer gerilim U_{leader} geriliminden yüksekse enerji kaybı yaklaşık V^2 olur, öncü boşalmaların boyu atlamaya kadar artar [76].

Yüksek bağıl dielektrik sabitli malzemelerle alan düzenleme, darbe ve ac gerilimleri için mümkündür. Eğer yüzey boyunca ϵ_r azalırsa elektrot kenarındaki alan şiddeti azalır, fakat ϵ_r 'yi azaltarak düzenleme yapmak zordur.

6.4.2. Darbe Geriliminde Elektriksel Boşalma

Bir elektrot sistemine bir darbe gerilimi (bir tepe değere ulaşp daha sonra belli bir süre sonra sıfıra düşen bir gerilim) uygulandığında boşalmanın oluşumu, alternatif veya doğru gerilim uygulanması durumundakine göre daha karmaşıktır (Şekil 6.23).



Şekil 6.23. Darbe geriliminde delinme

U_s : Minimum statik delinme gerilimi; U_m : Gerilimin tepe değeri;

t_s : İstatistiksel delinme süresi; t_g : Gelişme süresi; t : Toplam boşalma süresi

Eğer elektrot sistemine statik delinme gerilimine eşit tepe değerli bir darbe gerilimi uygulanırsa $t = t_1$ noktası birinci koşulu sağlar fakat bu andan sonra gerilim azalmaya başladığından ikinci koşulu sağlanmamış olur ve bu yüzden delinme olmaz (Şekil 6.23(a)). Buna göre elektrot sisteminin darbe delinme gerilimi statik delinme geriliminden çok daha yüksek olursa delinme gerçekleşir.

Eğer Şekil 6.23(b)'deki gibi statik delinme geriliminden daha yüksek tepe değerli bir darbe gerilimi söz konusu olursa elektrot sisteminin delinme olasılığı vardır fakat kesin değildir. Bu durum, gerilimin statik delinme geriliminden daha yüksek kaldığı ($t_2 - t_1$) süresine bağlıdır. Eğer ($t_2 - t_1$) süresi, delinme için gereken süreden büyük veya eşitse delinme olur. Tepe değer U_s 'ye oranı arttıkça ($t_2 - t_1$) süresi de artar. Böylece darbe geriliminin tepe değerindeki artış ile delinme olasılığı artar.

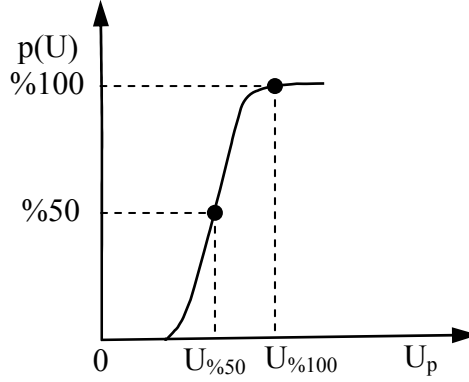
Sonuç olarak darbe geriliminde delinmenin olabilmesi için iki koşuldan söz edilir:

- a) Uygulanan gerilim (dolayısıyla elektrotlar arasındaki elektrik alan şiddeti) U_s statik delinme gerilimi değerini aşmalıdır.
- b) Uygulanan gerilim, boşalma gelişimi tamamlayana kadar U_s statik delinme gerilimi değerinin üzerinde kalmalıdır. Bu koşul, gerilimin t toplam süresinden daha uzun süre U_d statik delinme gerilimi değerinin üzerinde kalacak uzunlukta olması demektir. İstatistiksel delinme süresi ve boşalmanın gelişme süresi bir gerilim uygulamasından diğerine değiştiğinden, aynı gerilim dalga şeklinde sürenin uzunluğuna bağlı olarak elektrotlar arasında bir boşalma olabilir veya olmayabilir. Bunun sonucu, elektriksel delinme olasılığına bağlı bir olay olur.

Uygulanan gerilimin süresine veya şekline bağlı olarak, belli bir tepe değerli gerilim için, uygulanan gerilimin kritik değer üzerinde bulunduğu süre önemlidir. Hızlı darbe gerilimlerinde gerilim, daha kısa süreyle kritik değer üzerinde olur. Bu yüzden delinme gerilimi uygulanan gerilimin şekline bağlıdır. Hızlı darbe gerilimlerinde bir elektriksel boşalmanın oluşabilmesi için daha yüksek gerilimlere gereksinim vardır.

Sürenin istatistiksel özelliği nedeniyle elektrot sistemine U_s 'yi aşan aynı tepe değerli çok sayıda darbe gerilimi uygulandığında yalnızca belli sayıda darbeye delinme olur. Bu nedenle, bir darbe geriliminin uygulanan her bir tepe değeri için bir delinme olasılığı elde edilir. Olasılık, deneysel olarak çok sayıda aynı tepe değerli darbe gerilimi uygulayıp delinmeye yol açan darbe sayısını uygulanan toplam darbe

sayısına bölerek belirlenebilir. Şekil 6.24 tipik bir delinme olasılığı eğrisini göstermektedir. Burada, $U_{\%100}$, % 100 delinme gerilimini gösterir. Bu gerilim her uygulandığında delinmeye yol açan minimum darbe gerilimi tepe değeridir. $(t_2 - t_1)$ süresi daima delinme süresinden daha büyüktür. $U_{\%50}$, %50 delinme gerilimi, uygulanan çok sayıda darbenin yarısında delinmeye yol açan darbenin tepe değeridir.



Şekil 6.24. Darbe geriliminde delinme olasılığı

Bir elektrot sistemi delinme gerilimi değerini aşan bir elektrik alanı ile zorlandığında delinmez. Öncelikle elektrotlar arasında bir başlangıç elektronunun ortaya çıkması gerekir. Bir elektrot sistemine gerilimin delinme gerilimi değerini aştığı andan bir elektronun ortaya çıkmasına kadar geçen süreye istatistiksel süre denir ve t_s ile gösterilir. İkinci olarak Townsend teorisine göre başlangıç elektronu tarafından yaratılan pozitif yüklerin elektrotlar arasını geçerek karşı elektroda ulaşması ve ondan (katottan) boşalmayı devam ettirebilmek için en az bir elektron koparması gerekir. Bu süreç ek bir süre gerektirir. Bu süreye gelişme süresi denir ve t_g ile gösterilir. Bu şekilde bir elektrot sisteminde delinme, delinme gerilimini uygulama anından $(t_s + t_g)$ kadar süre sonra meydana gelir. Bu süreye de toplam delinme süresi denir. Townsend teorisine göre bu süre 10^{-5} saniye mertebesinde dir. Fakat deneysel olarak darbe gerilimi gibi kısa süreli bir gerilime maruz kalmış elektrot sisteminde delinmenin 10^{-8} saniye mertebesinde olduğu gözlenir. Buradan anlaşıldığı gibi Townsend teorisinin darbe geriliminde delinme olayını açıklayamadığı açıktır. Bunu gidermek için 1940'larda Rather ve Meek ile Loeb birbirlerinden bağımsız olarak kanal teorisini önermişlerdir [77-79].

Yukarıdaki açıklamalardan da anlaşılabacağı gibi nanosaniye süreli darbe gerilimlerindeki boşalma olaylarını Kanal Teorisi ile açıklamak uygun düşecektir. Nanosaniye süreli kanal boşalması aşağıdaki şekilde gerçekleşir. Yüksek gerilim

darbeleri ile düzgün olmayan elektrik alanlı elektrot sistemine gerilim uygulandıktan sonra, akım yolları kenarlarında iyonizasyon olur ve bir iyonizasyon dalgası şekillenir ve elektrotlar arasında yaklaşık 10^8 - 10^7 cm/s hızla hareket eder. Bu dalga, tanındığı adıyla kanalın başıdır. Bu dalga yayılımının sonucu olarak iyonize boşalma kanalı oluşur. İyonizasyon dalgası elektrotlar arasını gittiğinde ikincil kanal aşaması başlar. Uzay yüklerinin bir kısmı nötrleşir. Böylece elektrik alan dağılımı daha düzgün olur. Boşalma süreci yük nötralizasyonundan sonra durur. Korona boşalmasından atlama ve delinme aşamasına geçişi önlemek için, gerilim darbesinin yalnızca kanal aşamasında etkili olduğundan emin olmak gerekir [80-82].

Boşalma olaylarının incelemesi genelde deneysel ağırlıklı yapılmakla birlikte teorik yaklaşımlarda olayın karmaşıklığı nedeniyle sayısal yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Buna rağmen analitik yaklaşımlarla boşalma olaylarını açıklama çabaları sürmektedir [83].

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Darbe gerilimlerine duyulan gereksinim gelişen teknoloji ile birlikte ivme kazanmıştır. Önceleri sadece dayanım deneylerinde kullanılan darbe gerilimleri, yeni uygulamaların yaygınlaşmasıyla tıp, fizik, optik, endüstriyel ve askeri alanlarda çok farklı amaçlar için kullanılır hale gelmiştir. Yeni teknoloji uygulamalarında gereksinim duyulan darbe gerilimlerinin ortak özelliği, yüksek hızlı olmalarıdır. Lazer uygulamalarında, yapay olarak oluşturulmuş EMP uygulamalarında nanosaniye ve pikosaniye mertebelerinde cephe süresine sahip darbe gerilimleri kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında öncelikli olarak 50 ns cephe süresine sahip, toplamda 1 μ s'lik darbe genişliğinde, tepe değeri 10 kV'a kadar çıkabilen hızlı darbe gerilimi üreten bir üreteç tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu üreticinin tasarımında farklı yöntemler denenmiştir. Denenen yöntemlerden bir tanesi, tepe devresi kullanarak mikrosaniye mertebesindeki bir darbe şeklinin cephe süresini kısaltmaktır. Bu yöntem hızlı yüksek darbe gerilimi üretiminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bunun için Marx devresi ile üretilmiş olan mikrosaniye veya milisaniyelik bir darbenin, tepe değerine ulaşmasına yakın bir noktada ateşlenen anahtarlama elemanı ile cephesi kısaltılmaktadır. Bu yöntem bu tez çalışmasında denenmiş ancak başarılı olmamıştır. Yapılan çalışmadan çıkarılan sonuç, tepe devresi kullanmak için gerilimin belirli bir düzeyin üzerinde olması gerekliliğidir. Bu tez çalışmasında kullanılan 5 kV – 9 kV gerilim aralığı, tepe devresinin anahtarlama elemanında yeterli düzeyde hassas ayarlama yapılmasına izin vermemiştir. Tepe devresi kullanarak cephe süresini kısaltma yönteminin bir başka gereksinimi ise, anahtarlama elemanının mutlaka kontrollü ortamda bulunması ve atlama aralığını duyarlı ayarlamaya olanak veren bir yöntemle düzenlenmesidir.

Hızlı darbe üretiminde yaygın kullanılan bir başka yöntem, demet halindeki koaksiyel kabloların doldurulup hızlı anahtarlama ile boşaltıldığı yöntemdir. Tez çalışmasında bu yöntem de denenmiş, nanosaniyelik ve bozulmasız bir darbe elde edilmiştir. Ancak üretilen darbenin gerilimi kullanılan kablo yalıtkanına bağlı olarak

3,7 kV ile sınırlı kalmıştır. Daha yüksek dayanıma sahip kablo kullanımı ise, kablonun ağırlık ve hacminin büyük, esnekliğinin düşük olması nedeniyle mümkün olmamıştır. Bu çalışmada, enerji depolama elemanı olarak eş eksenli yapıdaki kablo kullanımı ile hızlı darbe gerilimi üretilebileceği sonucu görülmüştür.

Tez kapsamında tasarlanan ve gerçekleştirilen üreteç tek katlı Marx yapısındadır. Literatürdeki çalışmalar daha yüksek gerilim ihtiyacı duyduğundan çok katlı Marx devresi yapısındadır. Çok katlı Marx devresi ile yüksek hızlı ve bozulmasız darbe üretiminin zor olduğu değerlendirilmektedir. Kat sayısının artması, devre elemanlarının, bağlantı elemanlarının ve anahtarlama elemanlarının artması anlamına gelir ki bu durum çıkışta bozulmasız bir darbe almak için belirli bir cephe süresinin altına inmeye engel oluşturur. Bunun nedeni, eklenen her elemanın istem dışı, kaçak kapasitif ve endüktif özelliğinin çıkış darbe şekline olumsuz etkisidir. Bu nedenle literatürde karşılaşılan çalışmaların tamamına yakın kısmında çok katlı Marx devresi ile üretilen nispeten yavaş darbe gerilimi, tepe devresi veya benzeri devre ile cephe süresinin kısaltılması sonucu hızlandırılmıştır. Bu çalışmada göreceli olarak daha düşük gerilim ihtiyacı, hızlı ve bozulmasız darbe geriliminin tek katlı Marx üreteci ile yapılmasına olanak vermiştir. Hızlı darbe gerilimi üretiminde kullanılan elemanların özellikleri önemli derece etkilidir. Bu çalışmada denenmiş olan birkaç farklı kondansatör türünden sadece bir tanesi ile başarılı sonuç alınmıştır. Kullanılan elemanların ve yapılan bağlantıların, kaçak endüktans veya kapasite oluşturmayacak şekilde olması, topraklamanın ise mümkün mertebe yüksek verimli yapılması gerekliliği görülmüştür. Bu tez kapsamında yapılan çalışmadan yola çıkılarak, uygun değerlerde elemanlar ile daha yüksek gerilim düzeylerine çıkabilme çalışması yapılabilir. Bu çalışmanın geliştirilmesi için yapılabilecek başka bir çalışma ise, darbe hızını arttırma, bu derece bozulmasız bir darbenin pikosaniyeler mertebesinde cephe süresine düşürülmesi olabilir. Bu çalışmada darbe tekrarlama hızı (ardışık darbelerin frekansı) üzerine çalışma yapılmamış, tek darbeler üzerine çalışılmıştır. Darbe tekrarlama hızını arttırma üzerine çalışmalar yapılabilir.

Tez çalışmasında karşılaşılan bir konu, bilgisayar programı ile hesaplanan elemanlardan kurulmuş, amaçlanan sürelerde darbe gerilimi üretebilen devrenin gerçekleşmesi sonrasında, teorik hesaplama ile elde edilen sürelerle veya bozulmasız darbelere ulaşılamamasıdır. Bunun nedeni, devredeki fiziksel sorunlar olabilir. Ancak en önemli nedeninin teorik analizde kullanılan devre elemanlarının ideal

durumda olduğu varsayımı ve analizin DC (0 Hz) için yapıyor olmasıdır. Tez kapsamında yapılan çalışmada her bir devre elemanının yüksek frekansta farklı empedans özellikleri çıkarılmış ve devre bu yeni duruma göre analiz edilmiştir. Yeni durum analizinde alınan çıkış darbe şekli, gerçekleşen üretcin çıkışında alınan darbe şekli ile tam olarak benzerlik göstermektedir. Bu durum, teorik analiz yaparken gerçeğe en yakın sonucu almak için devre elemanlarının tamamının, kaçak değerleriyle birlikte hesaplamaya katılması, hesaplamanın çalışma frekansındaki değerlerle yapılması gerekliliğini göstermiştir.

Üretilen hızlı darbenin doğru olarak ölçülmesi önemli bir konudur. Bu tez çalışmasında ölçme için üç farklı yöntem denenmiştir. Öncelikli olarak üreteç çıkışına kapasitif gerilim bölücü kurulmuştur. Bu yöntem, çıkış darbe şeklini bozduğundan kullanılmamıştır. Devre çıkışına kurulan dirençsel gerilim bölücü ile darbe düzgün olarak ölçölüp görüntülenebilmiştir. Kullanılan bir başka yöntem ise yüksek gerilim probu ile darbenin doğrudan ölçülmesidir. Literatürde kullanılan yöntemler de bu yöntemlere benzerdir. Hızlı darbe gerilimini ölçmek ve ölçme hassasiyetini arttırmak için yeni yöntemler araştırılabilir.

Üretilen darbeyi görüntülemeye 4 GSa/s örnekleme hızına sahip bir dijital osiloskop kullanılmıştır. Hızlı darbeleri ölçme ve görüntüleme için bu osiloskop oldukça uygundur. Üretilmiş olan hızlı darbe gerilimi, yüksek örnekleme hızında ölçülmesine rağmen yeterli derece düzgün ve bozulmasız görüntü vermiştir. Kaynaklar kısmında listelenen çalışmalarda verilen darbe şekilleri, daha düşük örnekleme yeteneğine sahip aygıtlar ile görüntülenmiştir.

Ölçme ve görüntüleme işleminin doğru ve hassas yapılması için, ölçülen ve ölçen sistemlerin birbirini etkilememesi gerekir. Üreteçten çevreye yayılan yüksek frekanslı elektromanyetik ışıma, ölçme sistemine kuple olarak hatalı ölçmeye neden olabilir. Bu amaçla ölçme işlemi yarı yansız ekranlı oda kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışma için, FR4 malzemeden yapılmış bir elektronik devre kartı üzerine, yedi farklı geometriye sahip 1 mm, 2 mm ve 3 mm aralıklı akım yolları hazırlanmıştır. Tasarlanıp gerçekleşen darbe üretci ile bu akım yollarına darbe gerilimleri uygulanmış ve sonuçları incelenmiştir. Burada amaçlanan EMP ve benzeri hızlı değişen darbe gerilimlerinin elektronik devrelerin iletkenlerine kuple

olması durumunda meydana gelebilecek durumun değerlendirilmesidir. EMP etkileri üzerine yapılan çalışmalar, EMP'nin elektromanyetik olarak benzetimi yapılması ve deneyden geçirilen aygıt üzerine bu alanın uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada böyle bir işaretin iletkenlere kuple olduktan sonraki durumu değerlendirildiğinden işaret iletkenlere doğrudan uygulanmıştır. Yapılan deneyden çıkarılan birinci sonuç, şekil ve geometrilerine bağlı olarak devre kartlarındaki akım yollarının boşalma meydana getirdikleri gerilim düzeyine göre sıralamasıdır. Yapılan deneysel çalışmada elektrotlarda meydana gelen boşalma sayısına göre yüzde elli boşalma eğrileri çıkarılmıştır. Eğriler incelendiğinde karşılıklı olarak açılı yapan akım yollarında boşalmanın daha düşük gerilim düzeylerinde meydana geldiği görülmüştür. Aynı yönde, paralel olarak açılı yapan şekillerde daha yüksek ve herhangi bir açılı yapmadan düz paralel giden akım yolu şeklinde en yüksek dayanım elde edilmiştir. Yapılan deneyler sırasında incelenen bir başka konu, akım yollarının boşalma meydana getirdikleri noktaların saptanmasıdır. Darbe gerilimi uygulanan elektrotlarda boşalma, dönüş veya açılı yapan noktalarda, düz paralel elektrotlarda ise uç noktalarda meydana gelmektedir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma, bir çok yeni deneysel çalışmalar için yol gösterici olabilir. Bu tez kapsamında deneylerin tamamı aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Ortam koşullarının deney sonuçlarına etkileri, farklı sıcaklık, nem, basınç, kir vb. durumlarında deneyler yapılarak bulunabilir. Deney numunesi olarak kullanılan kart FR-4 katı dielektrik malzemedir. Farklı dielektrik malzemeler ve sıvı ve gaz ortamlarda deney sonuçlarının değişimi değerlendirilebilir. Kullanılan akım yolları şekil ve boyut bakımından sınırlı sayıdadır. Deneysel çalışma farklı şekiller için tekrar edilebilir.

Deneysel çalışmada kullanılan hızlı darbenin cephe süresi 50 ns'dir. Cephe süresinin boşalma olayına etkisini değerlendirmek için daha kısa veya daha uzun darbeler üretilerek numuneye uygulanabilir. Yapılan deneysel çalışma hazırlanan akım yollarına doğrudan darbe gerilimi uygulanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. İşletme halinde devreler üzerlerinde alternatif veya doğru gerilim bulundurmaktadır. Deneysel çalışma karma gerilimler ile, mevcut alternatif veya doğru gerilim üzerine uygulanan darbe gerilimleri ile farklı bir çalışma haline getirilebilir.

Yapılan deneysel çalışma, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak sayısal hesaplama ile desteklenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla FEMM hazır programı kullanılarak

bilgisayarda her bir elektrot sisteminin alan ve potansiyel dağılımı çizdirilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elektrotlar arasında en yüksek elektrik alan değerinin bulunduğu noktalar, deneysel çalışmada boşalmanın gözlemlendiği noktalardır. Bu bakımdan gerçekleştirilen deneysel çalışma ile sayısal hesaplama sonuçları tam olarak birbirini desteklemiştir. Hesaplamalı analiz için başka yöntem kullanılarak sonuçların değerlendirilmesi mümkündür. Kullanılan yöntemin sonuçlarını daha doğru alabilmek için hassasiyeti artırılabilir.

Üretilen darbelerin elektromanyetik ortamda etkisini inceleyebilmek için frekans bölgesinde çalışma yapmak gerekir. Bu nedenle darbelerin Fourier dönüşümü ile frekans bölgesindeki etkinliği incelenmiştir. Darbenin temel bileşeni 1 MHz'dedir. Yaklaşık 1 μ s süren darbenin 1 MHz'de tanımlanması beklenen durumdur. Diğer etkili frekans bölgesi 14 MHz - 18 MHz aralığıdır ki bu değerler darbenin yükselme süresine karşılık gelir. Böyle bir işaretin elektronik devrelere kuple olması halinde bu frekanslardaki işaretleri bozabilir veya tamamen bastırabilir.

Tez çalışmasında yapılan deneyler sırasında çevreye elektromanyetik ışıma olduğu açıktır. Bu ışıma diğer sistemlerle uyumsuzluk göstererek girişim meydana getirebilir. Bu girişimin miktarı, gerçekleştirilen deneysel çalışma ile ölçülmüştür. Yapılan deneylerden çıkarılan bir sonuç girişim kaynağının üreteç devresindeki kürelerde ve deneyden geçirilen devre kartında meydana gelen boşalmalar olduğudur. Oluşan elektrik alanın, kullanılan akım yolunun şekline bağlı olarak 55 V/m düzeyine kadar yükseldiği görülmüştür. Yay şeklinde dönüşler içeren akım yolu diğerlerine göre daha düşük girişim oluşturmıştır. Bunun nedeni bu geometrilerde elektrotlar arasındaki en yakın yerin bir nokta olması ve boşalmanın tek ve aynı noktada meydana gelmesidir. Oluşan girişimin frekans bölgesi incelemesi yapılmış ve etkili iki frekans görülmüştür. Elektrotlardaki boşalma 24 MHz'de, üreticinin küreleri ise 135 MHz'de etkili girişim göstermektedir.

Bu deneysel çalışmanın bir sonraki aşaması olarak deney düzeneğinden 1 m uzağa konulan güç kablosu üzerinde endüklenen akım görüntülenmiştir. Kablo üzerinde endüklenen sönümlü sinüs şeklindeki akımın tepe değeri 25 mA olarak ölçülmüştür. Bu değer askeri standartlarda verilen sınırların altındadır. Ancak ölçülen akım değeri birçok duyarlı aygıt için göz önüne alınması gereken büyüklüktedir. Endüklenen akımın frekans spektrumundaki görüntüsü, genlik değeri dışında, anten ile yapılan elektromanyetik girişim ölçümü ile aynıdır.

Bu çalışmada g kablosuna elektromanyetik bağlaşım değerlendirilmiştir. Oluşan bağlaşımın kapasitif veya endüktif yapıdaki iletkenlerde oluşturduğu etki sonraki çalışmalarda incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Akses, A.**, 2001. Darbe Gerilimleri, Yıldırım ve EMP Üreteçleri, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Akiyama, H.**, 1995. Pulsed power in Japan, *10th IEEE International Pulsed Power Conference*, New Mexico, Vol 1, 3-6 July 1995, pp.13-16
- [3] **Akses, A., Kalenderli, Ö., Yürekli, A. İ., Kumbasar, A. H.**, 2002. Design and construction of a 12 kV impulse generator, *Proceedings of EMC Europe 2002 Symposium*, Sorrento.
- [4] **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*, Vol. 33, No. 4, Part 1, Aug. 2005, pp.1240 – 1244
- [5] **Akses, A., Yazıcı, M., Kalenderli, Ö., Baran, E.**, 2002. Electromagnetic interference from a lightning impulse generator, *Proceedings of MedPower 2002*, Athens, 4-6 November, 2002
- [6] **Dymoke-Bradshaw, A. K. L., Hares, J. D., Kellett, P. A.**, 1995. Applications for high voltage pulse generators, *IEE Colloquium on Pulsed Power '96*, London, 13 March 1996, pp. 29/1 - 29/7.
- [7] **Bluhm, H., Bohme, R., Frey, W., Giese, H., Hoppe, P., Kessler, G., Muller, G., Neubert, N., Rusch, D., Schultheiss, C., Schumacher, G., Sohner, M., Strassner, H., Strauss, D., Vath, V., Zimmermann, F., Engelko, V., Dulson, A., Kurets, V. I.**, 1997. Industrial applications of high voltage pulsed power techniques: developments at Forschungszentrum Karlsruhe, *11th IEEE International Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers*, Baltimore, Vol. 1, 29 June-2 July 1997, pp. 1 – 12.
- [8] **Mizuno, A., Hori, Y.**, Destruction of living cells by pulsed high-voltage application, 1988. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 24, Issue 3, May-June 1988, pp. 387 – 394.
- [9] **Smith, P. W.**, 2002. Transient Electronics, Pulsed Circuit Technology, John Wiley & Sons, Great Britain
- [10] **Martin, J. C.**, 1992. Nanosecond pulse techniques, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 80, No. 6, June 1992, pp. 934 - 945.

- [11] 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., 2004. A fast and portable mega-volt source for pulsed power applications, *IEEE Conference Record The 31st IEEE International Conference on Plasma Science*, Baltimore, Maryland, 28 June-1 July 2004, pp.444
- [12] Shah, R. D., Cliffe, R. J., Smith, I. R., 2001. A simple high-voltage pulse generator for laboratory use, *IEE Symposium Pulsed Power 2001*, 1-2 May 2001, p. 17/1 - 17/4.
- [13] Novac, B. M., Smith, I. R., Goh, S. E., 2000. An economic compact high voltage pulse generator, *IEE Symposium Pulsed Power 2000*, London, 3-4 May 2000, pp. 6/1 - 6/3.
- [14] Rohwein, G. J., Babcock, S. R., 1994. A Compact High Voltage Pulse Generator, *Conference Record of the Twenty-First International Power Modulator Symposium*, June 27-30, 1994, pp. 60 – 62.
- [15] Gundersenk, M., Kuthi, A., Behrend, M., Vernier, T., 2004. Bipolar nanosecond pulse generation using transmission lines for cell electro-manipulation, *Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium*, San Francisco, 23-26 May 2004 pp.224 – 227
- [16] Pai, S. T. and Zhang, Qi, 2003. Introduction to High Power Pulse Technology, World Scientific Publishing Co., Singapore
- [17] Ibuka, S., Abe, K., Miyazawa, T., Ishii, A., Ishii, S., 1997. Fast high-voltage pulse generator with non-linear transmission line for high repetition rate operation, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 25, No. 2, April 1997, pp. 266 – 271.
- [18] MacGregor, S. J., Farish, O., Turnbull, S. M., Sellars, A. G., 1993. A Pulse Generator for The Generation of Fast High Voltage Transients in Gas Insulated Substations, Ninth IEEE International, *Pulsed Power Conference*, Digest of Technical Papers, Vol. 2, 21-23 Jun 1993, p. 1016.
- [19] Shpak, V. G., Shunailov, S. A., Oulmascoulov, M. R., Yalandin, M. I., 1997. Subnanosecond front, high-voltage generator based on a combined pulsed forming line, *11th IEEE International Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers*, Baltimore, Vol. 2, 29 June-2 July 1997, pp. 1581 – 1585.
- [20] Kuchinsky, G. S., Kozhevnikov, M. N., Shilin, O. V., Vekhoreva, L. T., Korovkin, N. V., Selina, E. E., Potienko, A. A., 1999. Nanosecond forming line based on compact power high-voltage pulse capacitors, *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, London, Vol. 5, 23-27 Aug. 1999, pp. 429 – 432.

- [21] **Rim, G. H., Pavlov, E. P., Kim, J. S.**, 2001. Nanosecond pulse generation with nonlinear capacitors and magnetic power compression, *Pulsed Power Plasma Science, Digest of Technical Papers*, Las Vegas, Vol. 2, 17-22 June 2001, pp. 1287 – 1289.
- [22] **Lehr, J. M., Baum, C. E., Prather, W. D., Torres, R. J.**, 1998. Fundamental physical considerations for ultrafast spark gap switching, *Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 4*, 14-19 June 1998, pp. 11 – 20.
- [23] **Kardo-Sysoev, A. F., Efanov, V. M., Chashnikov, I. G.**, 1995. Fast power switches from picosecond to nanosecond time scale and their application to pulsed power, *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, Albuquerque, Vol. 1, 3-6 July 1995, pp. 342 – 347.
- [24] **Mayes, J. R., Carey, W. J., Nunnally, W. C., Altgilbers, L.**, 2001. Sub nanosecond jitter operation of Marx generators, *IEEE Conference Record Pulsed Power Plasma Science*, Las Vegas, 17-22 June 2001, p. 461.
- [25] **Baker, R. J., Ward, S. T.**, 1994. Designing nanosecond high voltage pulse generators using power MOSFETs, *Electronics Letters*, Vol. 30, No. 20, 29 Sept. 1994, pp. 1634 – 1635.
- [26] **Efanov, V., Korenev, S.**, 2004. Nanosecond Marx pulsed generator with semiconductor switches, *Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium*, San Francisco, 23-26 May 2004, pp.520 – 521
- [27] **Hahn, U., Herrmann, M., Leipold, F., Schoenbach, K. H.**, 2001. Nanosecond, kilovolt pulse generators, *Pulsed Power Plasma Science, Digest of Technical Papers*, Vol. 2, 17-22 June 2001, pp. 1575 – 1578.
- [28] **Barnes, M. J., Wait, G. D.**, 1995. Design for a FET based 1 MHz, 10 kV pulse generator, *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, Digest of Technical Papers, Vol. 2, 3-6 July 1995, pp. 1335 – 1340.
- [29] **Carey, W. J., Nunnally, W. C.**, 1994. Generation Of Sub-nanosecond Pulses Using A Solid State Marx Circuit With Trapatt Diode Switches, *Conference Record of the Twenty-First International Power Modulator Symposium*, June 27-30, 1994, pp. 89 – 92.
- [30] **Wait, G. D., Barnes, M. J.**, 1995. Measurements on a FET based 1 MHz, 10 kV pulse generator, *Tenth IEEE International Pulsed Power Conference*, Digest of Technical Papers, Albuquerque, Vol. 2, 3-6 July 1995, pp. 1341 – 1346.
- [31] **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, *12th IEEE International Pulsed Power Conference*, Digest of Technical Papers, Monterey, California, Vol. 2, 27-30 June 1999, pp. 1437 – 1440.

- [32] Schilling, H., Schluter, J., Peters, M., Nielsen, K., Naff, J. T., Hammon, H. G., 1995. High voltage generator with fast rise time for EMP simulation, *Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers. Tenth IEEE International*, Albuquerque, Vol. 2, 3-6 July 1995, pp. 1359 – 1364.
- [33] Suehiro, J., Yamasaki, K., Matsuo, H., Hara, M., Gerhold, J., 1994. Pulsed electrical breakdown in liquid helium in the μ s range, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 3, June 1994, pp. 403 – 406.
- [34] Sundararajan, R., Nagabhushana, G.R., Kishore, N.K., Soundarajan, E., 2005. Influence of peaking capacitors in reducing rise times of high-voltage nanosecond pulses, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 3, May-June 2005, pp.690 – 697.
- [35] Tao Deng, Guangning Wu, Kai Zhou, Jiandong Wu, 2006. A Nanosecond High Voltage Pulse Generator for Measuring Space Charge Distribution, *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 11-14 June 2006, pp.444 – 447.
- [36] 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., 2004. A transmission line based compact repetitive and portable cascaded Blumlein pulser, *Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium*, San Francisco, 23-26 May 2004, pp.526 – 529.
- [37] Guan-Jun Zhang, Wen-Bin Zhao, Yan Sun, Zhang Yan, 2003. Surface discharge phenomena of silicon in atmospheric air, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2003, pp. 333 – 336.
- [38] Kando, M., 1998. A new testing method of an enameled wire with a developed nanosecond pulse generator, *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, Vasteras, 22-25 June 1998, pp. 485 – 488.
- [39] Kovalev, V. P., Diyankov, V. S., Kormilitsin, A. I., Lavrentjev, B. N., 1997. High-voltage many-pulses generator with inductive energy store and fuse, *11th IEEE International Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers*, Baltimore, Vol. 2, 29 June-2 July 1997, pp. 1213 – 1216.
- [40] Wen-Bin Zhao, Guan-Jun Zhang, Gui-Bo Qin, Kui Ma, Zhang Yan, 2005. Surface microcosmic phenomena induced by pulsed flashovers, *Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials*, Vol. 2, 5-9 June 2005, pp.324 – 327
- [41] Allen, N. L., Mikropoulos, P. N., 1999. Profile effect on surface flashover in a uniform field, *Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*, London, Vol. 3, 23-27 Aug. 1999, pp. 216 – 219.

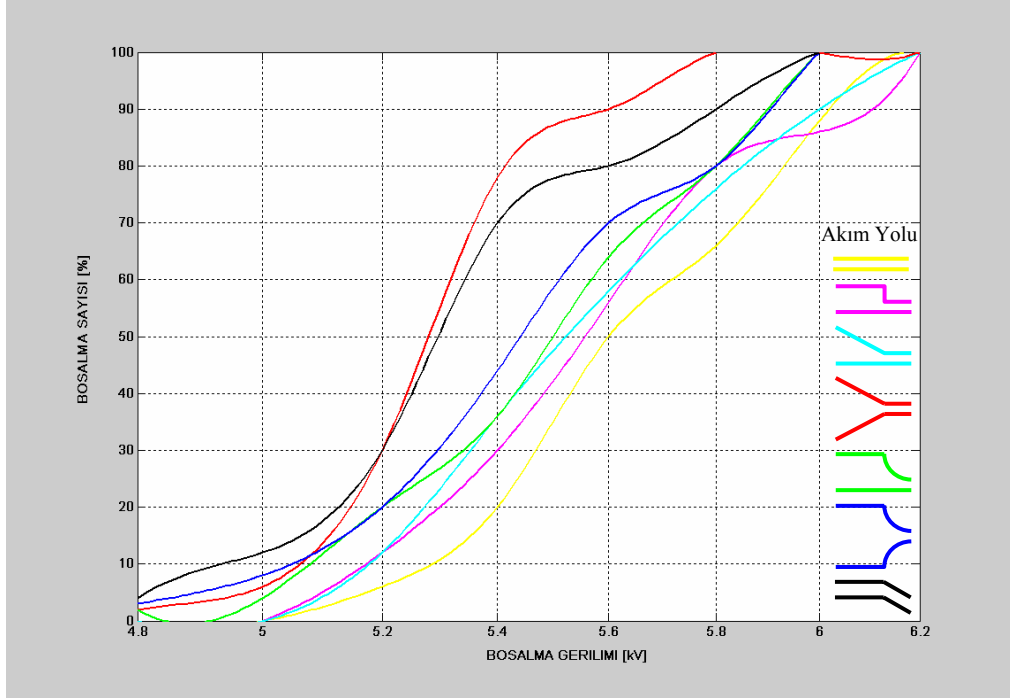
- [42] **Salas, T. M., Wiggins, C. M., Barnes, P. R.**, 1990. Steep front impulse flashover tests on a solid-state relay, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp. 1281 – 1287.
- [43] http://www.jjorly.com/g10_fr4_sheet_material_price.htm
- [44] <http://en.wikipedia.org/wiki/FR-4>
- [45] **Xu, A. Q., Nied, H. F.**, 2000. Finite element analysis of stress singularities in attached flip chip packages, *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 122, No. 4, pp. 301-305, December 2000.
- [46] **Miller, D. B., Lux, A. E., Grzybowski, S., Barnes, P. R.**, 1990. The effects of steep-front, short-duration impulses on power distribution components, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp. 708 – 715.
- [47] **Hatfield, L. L., Leiker, G. R., Kristiansen, M., Colmenares, C., Hofer, W. W., DiCapua, M. S.**, 1988. A treatment which improves surface withstand voltage in vacuum, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 23, No. 1, Feb 1988, pp. 57 – 61.
- [48] **Krile, J. T., Neuber, A. A., Dickens, J. C., Krompholz, H.G.**, 2005. DC and Pulsed Dielectric Surface Flashover at Atmospheric Pressure, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 33, No. 4, Part 1, Aug. 2005, pp. 1149 – 1154.
- [49] **Zhong, H. H., Karner, H. C., Gollor, M.**, 1992. Time characteristics of fast pulsed flashover in vacuum, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 27, No. 3, Jun 1992, pp. 496 – 503.
- [50] **Bryce, E., Fouracre, R. A., Given, M. J., MacGregor, S. J., Turnbull, S. M.**, 1997. An investigation into the characteristics of large scale surface discharges, *IEE Colloquium on Pulsed Power*, 19 March 1997, pp. 18/1 - 18/8.
- [51] **Wang, X., Han, M., Wang, M., Zeng, L. G., Chen, Y. Q.**, 2004. Experimental study on surface flashover behavior in vacuum, *Conference Record of the Twenty-Sixth International Power Modulator Symposium*, 23-26 May 2004, pp. 462 – 465.
- [52] **Grzybowski, S., Kappenman, J., Radasky, W.A.**, 2006. Electrical strength of distribution insulators under steep front, short duration pulse, *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2006
- [53] **Norberg, A.**, 1990. Current waveform and energy in surface discharges, *Conference Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Vol. 1, 7-12 Oct. 1990, pp. 853 – 858.

- [54] **Waldron, W., Greenway, W., Eylon, S., Henestroza, E., Yu, S.,** 2003. Electrical breakdown studies with Mycalex insulators, *Proceedings of the Particle Accelerator Conference*, Vol. 2, 12-16 May 2003, pp. 1171 – 1173.
- [55] **Grzybowski, S., Fan, J.,** 1997. Electrical breakdown characteristics of the XLPE cables under AC, DC and pulsating voltages, *Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Seoul, Vol. 1, 25-30 May 1997, pp. 389 – 393.
- [56] **Han, M., Lee, S., Yang, T.,** 1990. Experimental study on surface flashover of a coaxial cable under nanosecond impulse voltage, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 3, June 1990, pp. 583 – 586.
- [57] **MIL-STD 461D,** 1993. Requirements for the control of electromagnetic interference emissions and susceptibility, *Department of Defense*.
- [58] **Bell Laboratories,** EMP Engineering and Design Principles, Electrical Protection Department, Loop Transmission Division.
- [59] **Krile, J., Neuber, A., Dickens, J., Krompholz, H.,** 2003. Physics of dielectric surface flashover at atmospheric pressure, *14th IEEE International Pulsed Power Conference, Digest of Technical Papers*, Vol. 1, 15-18 June 2003, pp. 285 – 288.
- [60] **Li, C. R., Sundararaman, R., Sudarshan, T. S.,** 1993. Spectroscopic observations of surface flashover across an insulator in vacuum under pulsed excitation, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 21, No. 5, Oct. 1993, pp. 598 – 604.
- [61] **Muzukin, I.L., Barakhvostov, S.V.,** 2005. A nanosecond discharge over a dielectric surface as a method for generation of multicharged plasma, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 33, No. 5, Part 1, Oct. 2005 pp.1654 – 1657.
- [62] **Sarkar, P., Braidwood, S.W., Smith, I.R.,** 2005. Compact battery-powered 0.5 MV tesla transformer based fast pulse generator, *The IEE Pulsed Power Symposium*, 8 September 2005, pp.3/1-3/5.
- [63] **Cooray, V.,** 2003. The Lightning Flash, IEE Power & Energy Series, The Institution of Electrical Engineers, Vol. 34, 2003, London.
- [64] **Chari, M. V. K., Silvester, P. P.,** 1980. Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems, Wiley, 1980, New York.
- [65] **Kalenderli, Ö.,** 1996. Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders notları, İTÜ, İstanbul.
- [66] **Araneo, R., Celozzi, S.,** 2002., FE Analysis of a Low-Frequency Microstrip Antenna, *IEEE Transactions on Magnetics*, March 2002, Vol.38, No.2, pp.729-732.

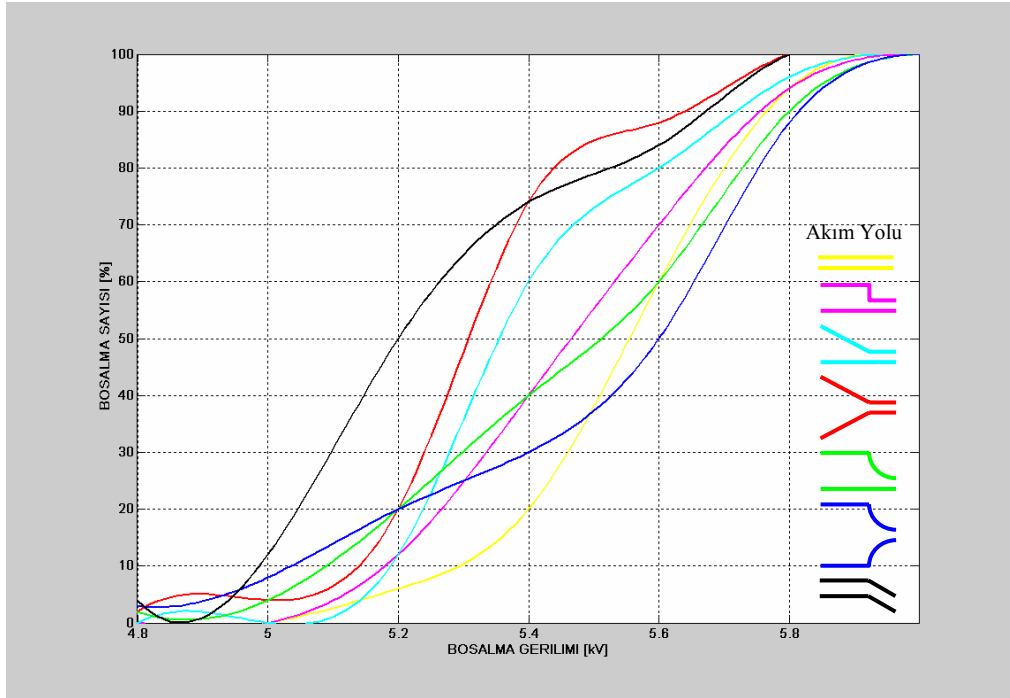
- [67] <http://femm.foster-miller.net/>
- [68] Finite Elements Method Magnetics (FEMM) Version 4.0, User's Manual, 2004.
- [69] **McAllister, I. W.**, 2002. Electric Fields and Electrical Insulation, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 5, pp. 672-696.
- [70] **O'Dwyer, J. J.**, 1973. The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Clarendon Press, Oxford.
- [71] **Raju, G. G.**, 2003. Dielectrics in Electric Fields, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [72] **Sudarshan, T. D., Dougal, R. A.**, 1986. Mechanism of surface flashover along solid dielectrics in compressed gases-A review, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 21, No. 5, pp. 727-746.
- [73] **Cooke, C. M.**, 1982. Charging of insulator surfaces by ionization and transport in gases, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 17, No. 2, pp. 172-178.
- [74] **Lee, Y. P., Kong, M. G.**, 2001. Surface Field Dynamics in dc Film Capacitors under an Impulse Voltage Perturbation, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 2, pp. 293-298.
- [75] **Özkaya, M.**, 2003. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [76] **Küchler, A.**, "Suppression of surface discharges and flashover on dielectric surfaces", Ninth Int. Symp. on High Voltage Engineering, Paper 8032, Graz, Austria, Aug. 28 – Sept. 1, 1995.
- [77] **Ray, S.**, 2004, An Introduction to High Voltage Engineering, Prentice-Hall of India, New Delhi.
- [78] **Naidu, M. S., Kamaraju, V.**, 2004. High Voltage Engineering, Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- [79] **Kuffel, E., Zaengl, W. S., Kuffel, J.**, 2000. High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, New Delhi.
- [80] **Abdel-Salam, M., Anis, H., El-Morshedy, A., Radwan, R.**, 2000. High-Voltage Engineering: Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc., New York.
- [81] **Saitoh, H., Morita, K., Kikkawa, T., Hayakawa, N., Okubo, H.**, 2002. Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in NJSF, Gas Mixtures, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 9, No. 4, pp. 544-550.

- [82] **Haddad, A., Warne D.**, 2004. Advances in High Voltage Engineering, The Institution of Electrical Engineers (IEE) Power and Energy Series 40, London
- [83] **Boggs, S.**, 2004. Analytical Approach to Breakdown under Impulse Conditions, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, No. 1, pp. 90-97.

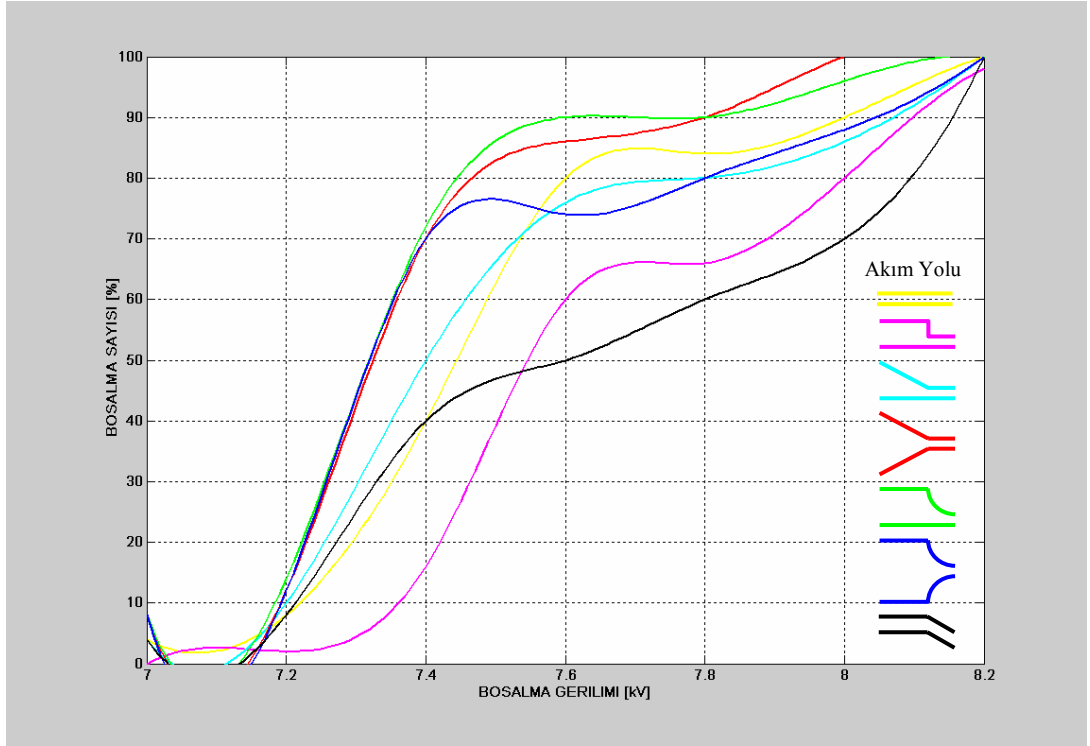
EK A. YÜZDE ELLİ BOŞALMA EĞRİLERİ



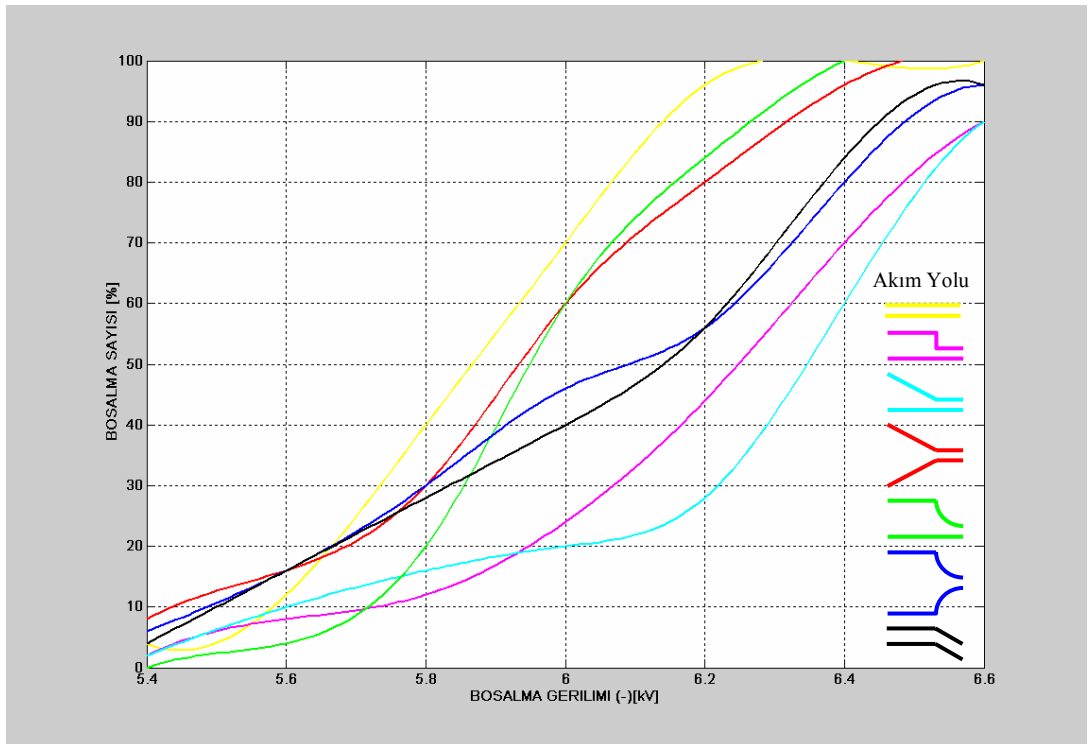
Şekil A.1. Pozitif darbe geriliminde 1 mm açıklığa sahip elektrotların boşalma eğrileri



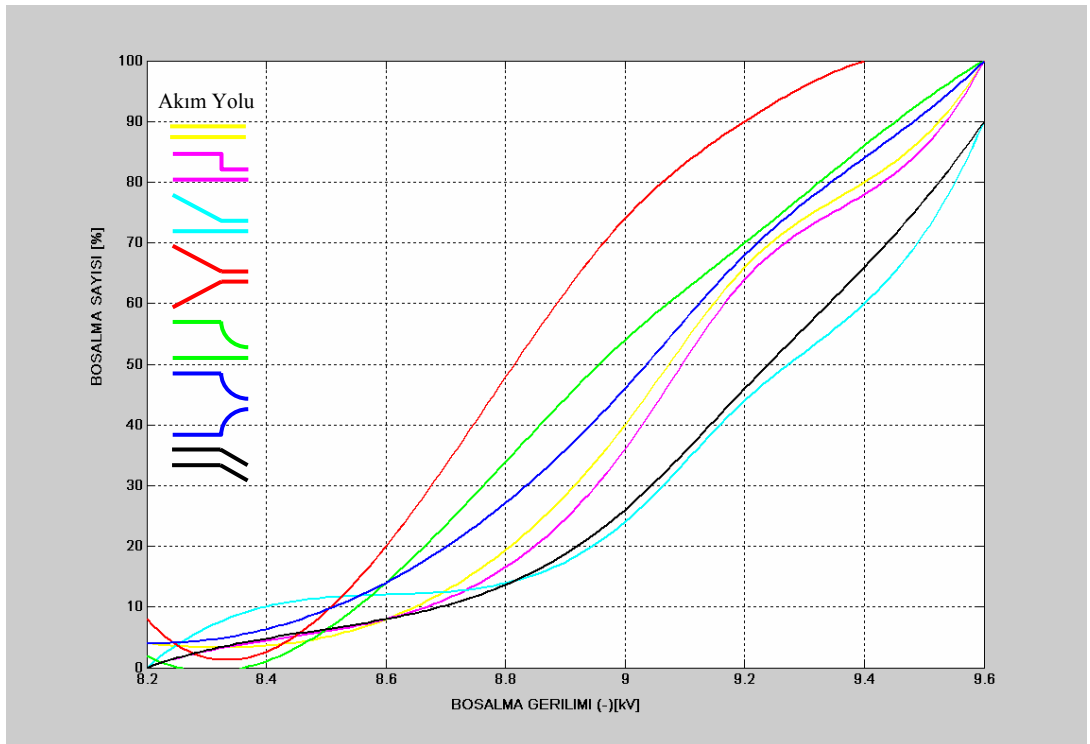
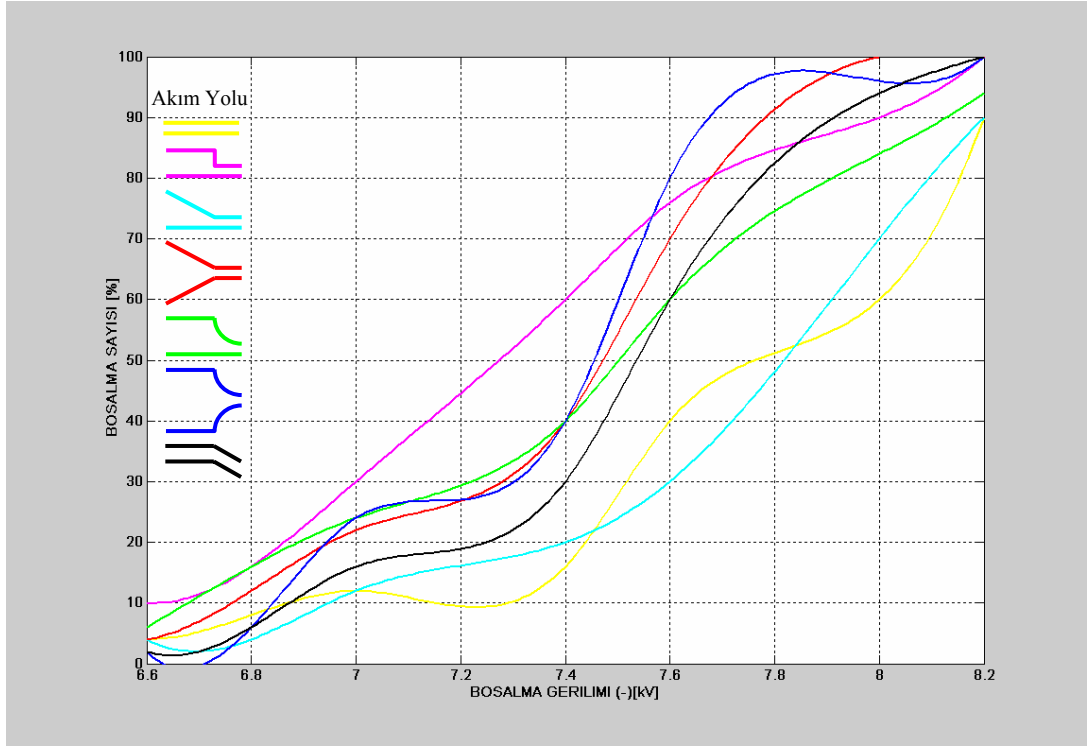
Şekil A.2. Pozitif darbe geriliminde 2 mm açıklığa sahip elektrotların boşalma eğrileri



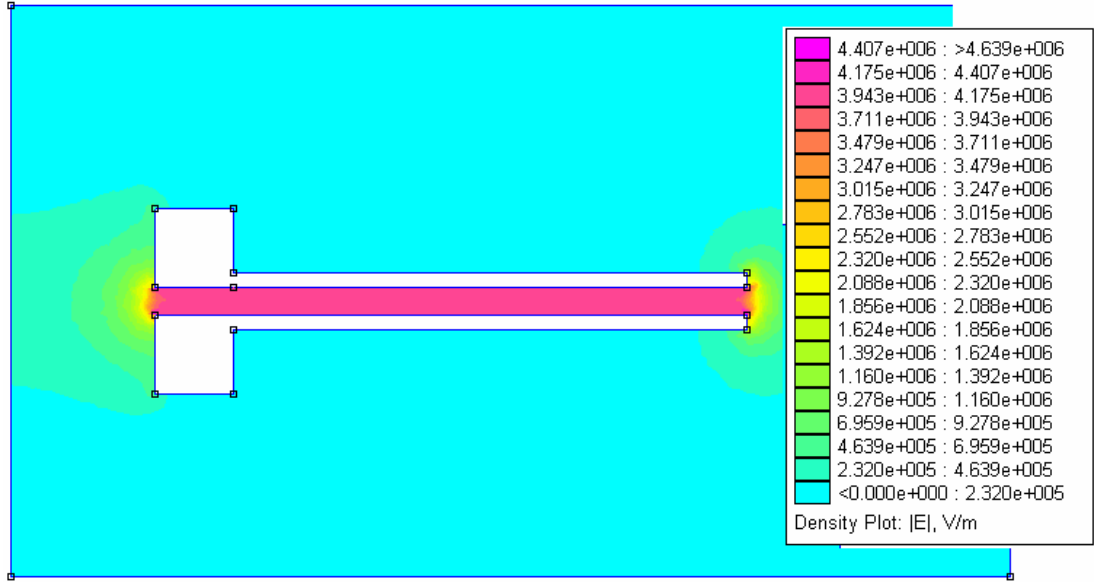
Şekil A.3. Pozitif darbe geriliminde 3 mm açıklığa sahip elektrotların boşalma eğrileri



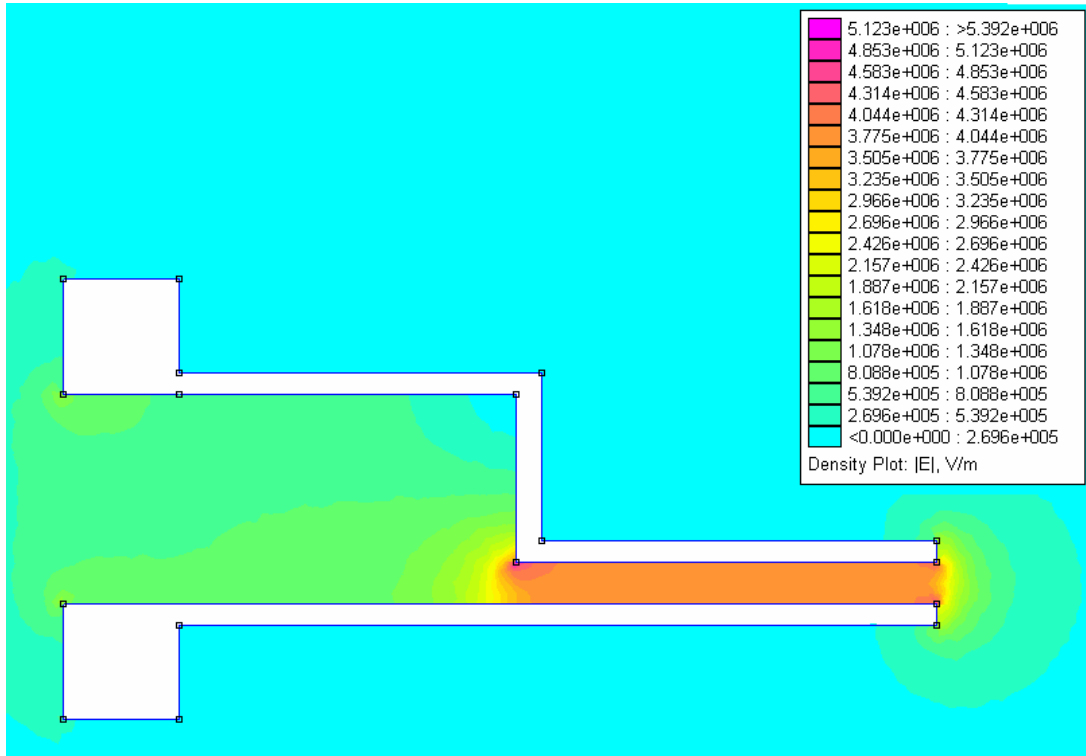
Şekil A.4. Negatif darbe geriliminde 1 mm açıklığa sahip elektrotların boşalma eğrileri



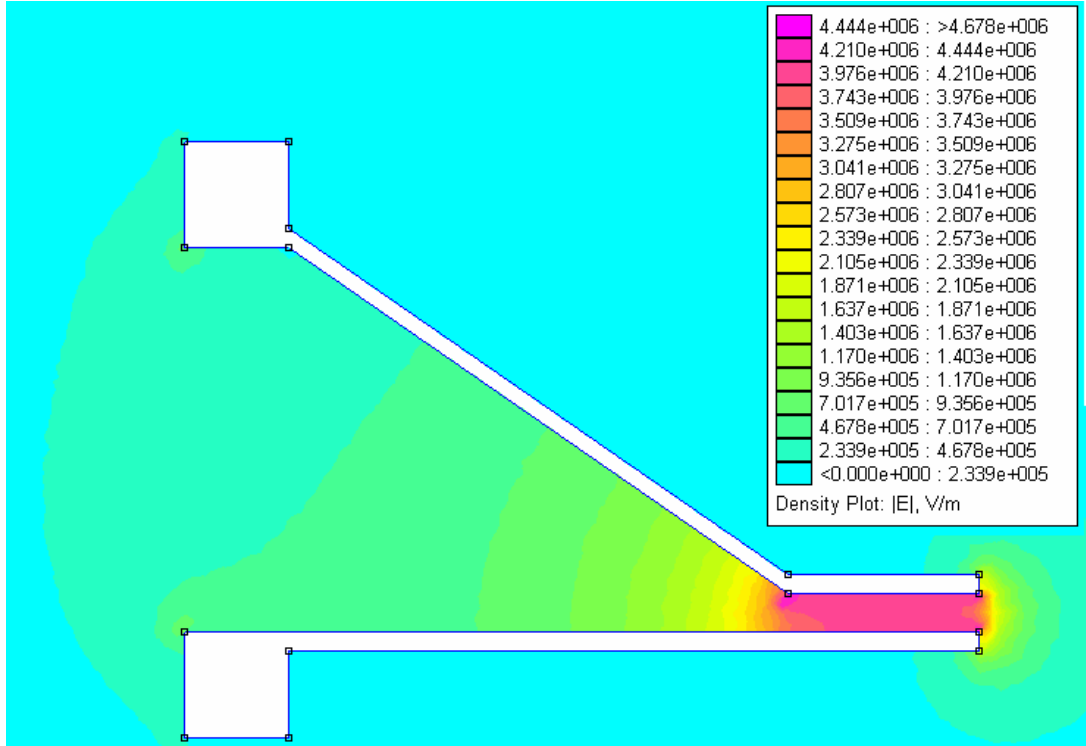
EK B. FEMM ANALİZİ İLE ALAN DAĞILIMLARI



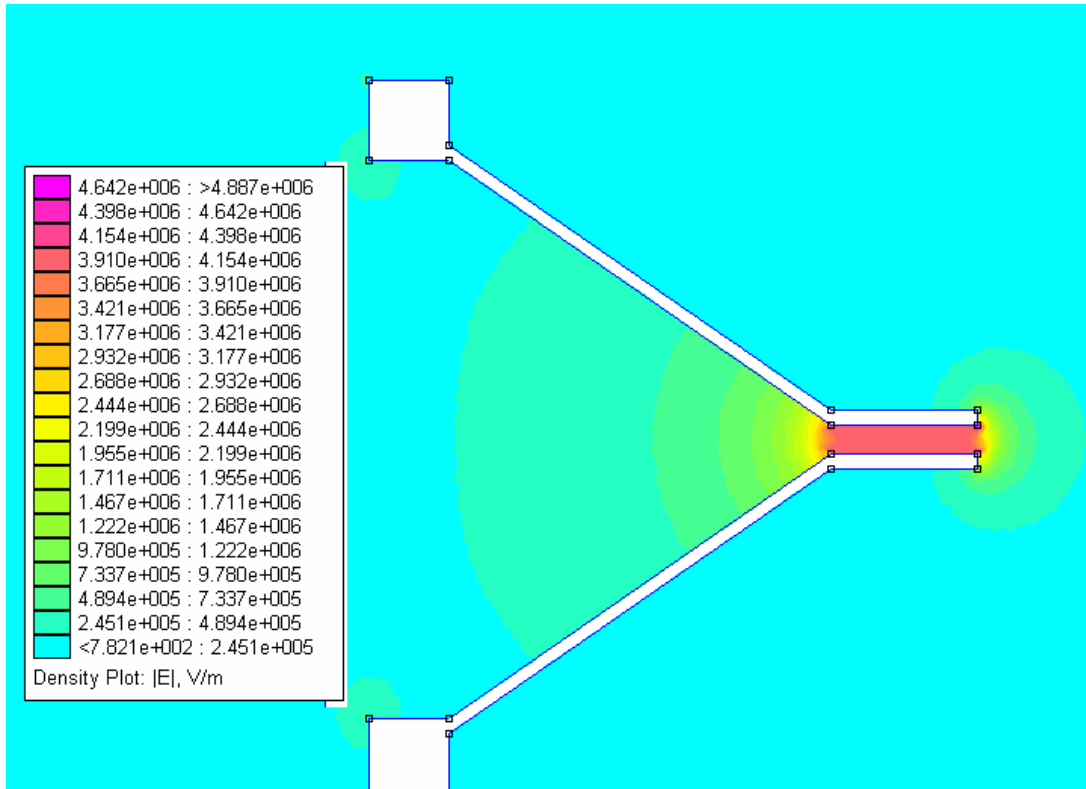
Şekil B.1. 1 numaralı akım yolunun FEMM analizi sonucundaki elektrik alan dağılımı (8 kV gerilimde, 2 mm açıklık için)



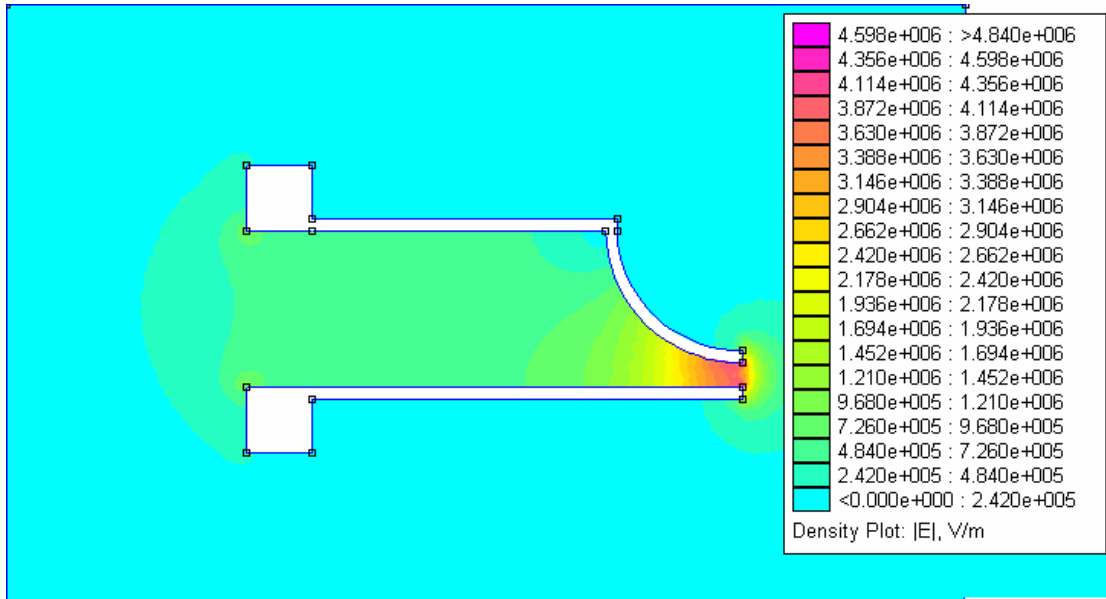
Şekil B.2. 2 numaralı akım yolunun FEMM analizi sonucundaki elektrik alan dağılımı (8 kV gerilimde, 2 mm açıklık için)



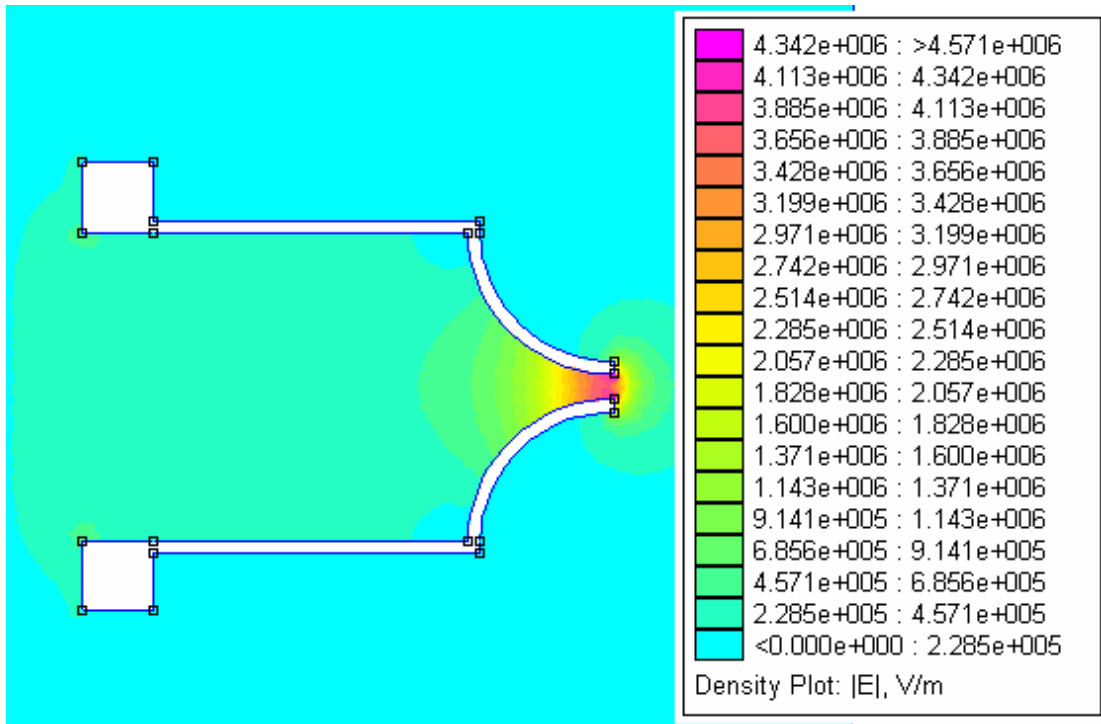
Şekil B.3. 3 numaralı akım yolunun FEMM analizi sonucundaki elektrik alan dağılımı (8 kV gerilimde, 2 mm açıklık için)



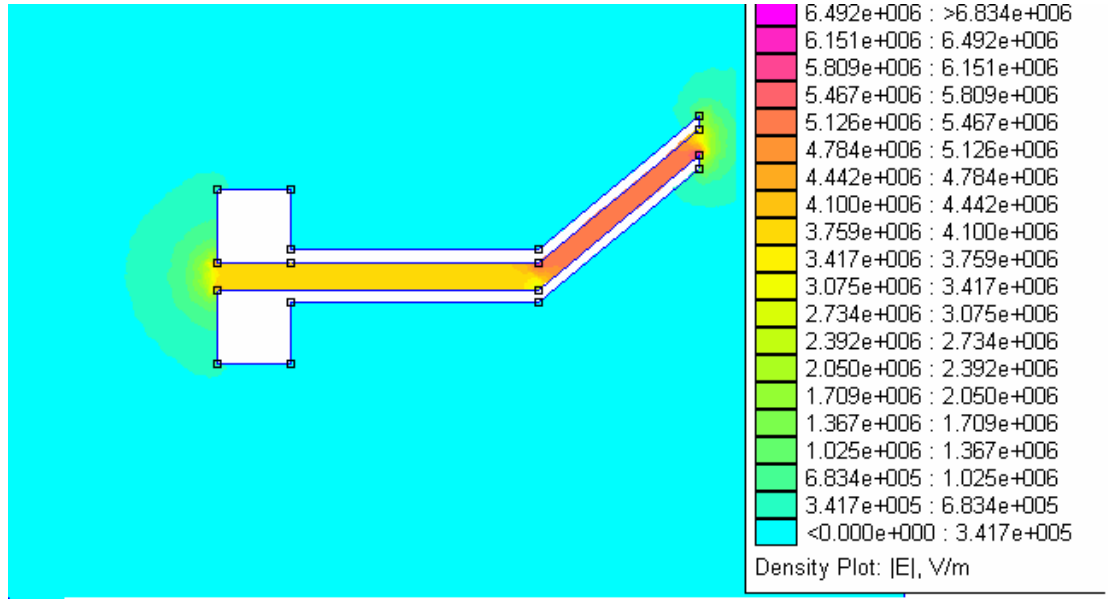
Şekil B.4. 4 numaralı akım yolunun FEMM analizi sonucundaki elektrik alan dağılımı (8 kV gerilimde, 2 mm açıklık için)



Şekil B.5. 5 numaralı akım yolunun FEMM analizi sonucundaki elektrik alan dağılımı (8 kV gerilimde, 2 mm açıklık için)

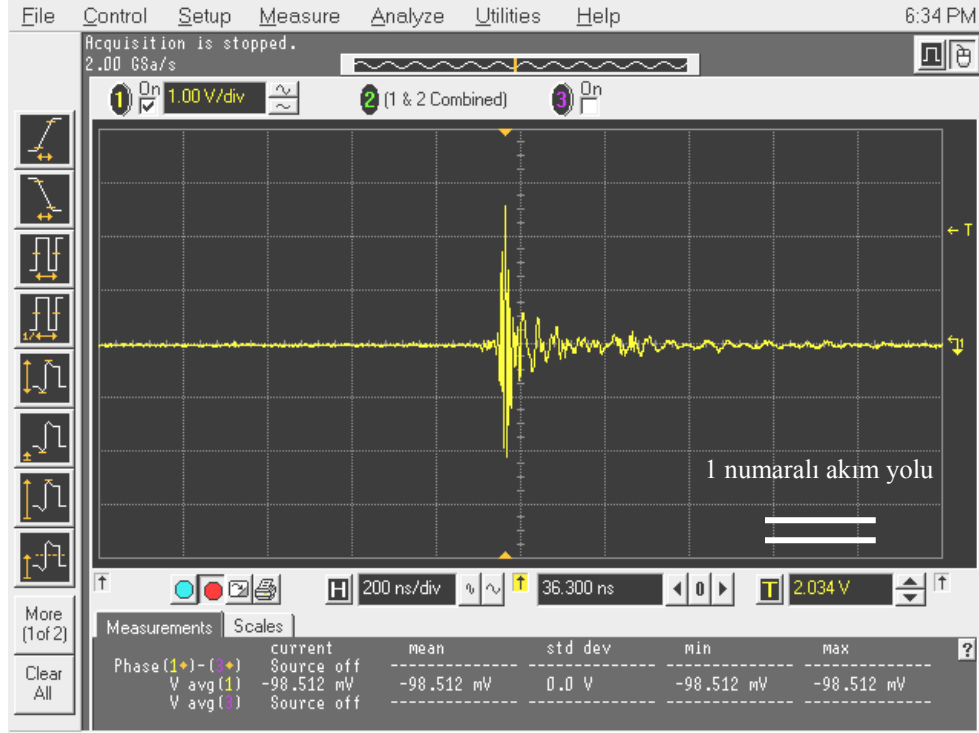


Şekil B.6. 6 numaralı akım yolunun FEMM analizi sonucundaki elektrik alan dağılımı (8 kV gerilimde, 2 mm açıklık için)

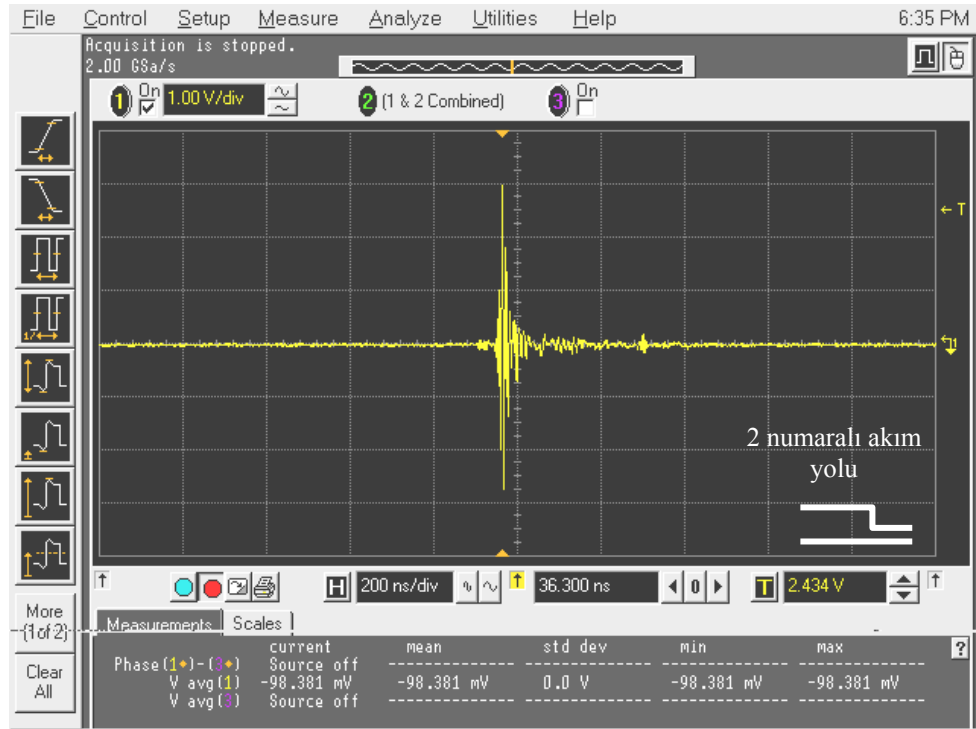


Şekil B.7. 7 numaralı akım yolunun FEMM analizi sonucundaki elektrik alan dağılımı (8 kV gerilimde, 2 mm açıklık için)

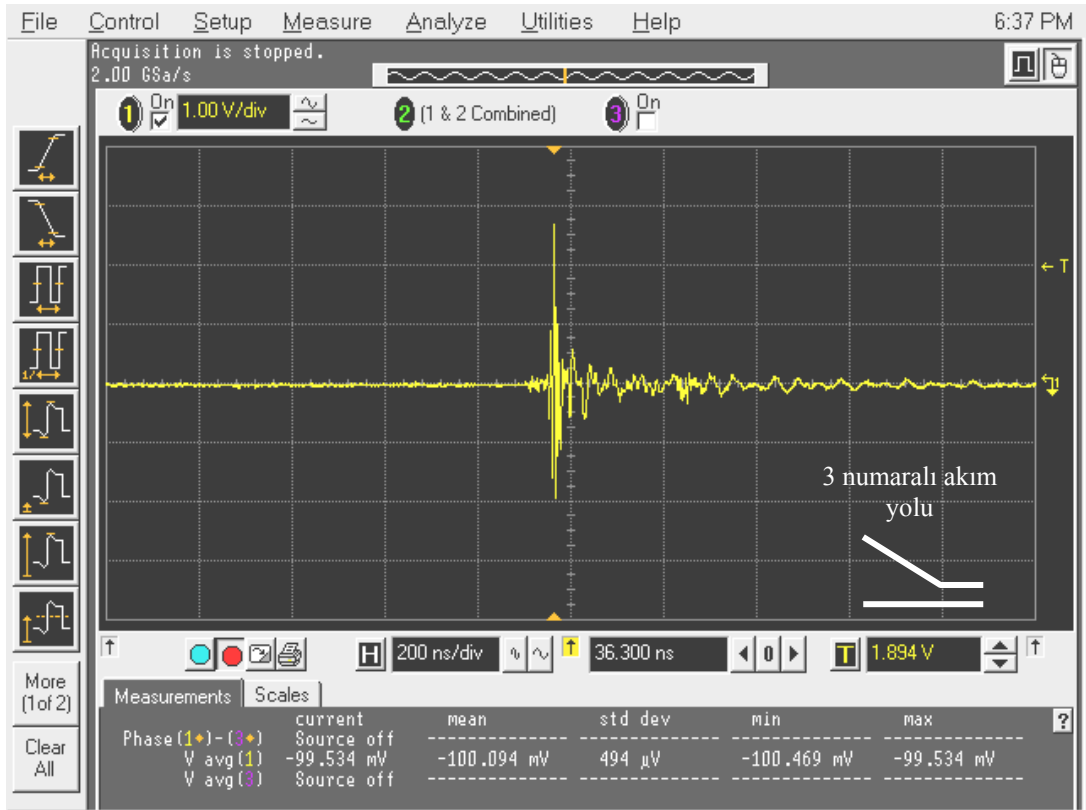
EK C. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM DÜZEYLERİ



Şekil C.1. 1 numaralı akım yolunda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu girişim



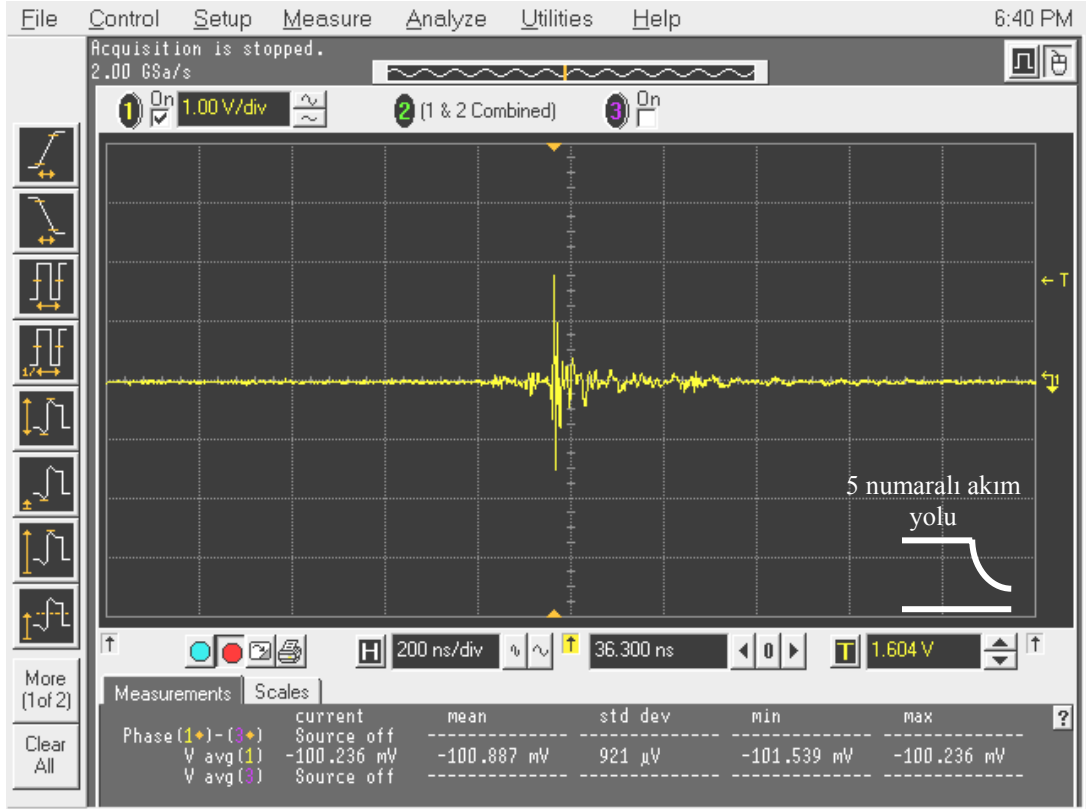
Şekil C.2. 2 numaralı akım yolunda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu girişim



Şekil C.3. 3 numaralı akım yolunda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu girişim



Şekil C.4. 4 numaralı akım yolunda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu girişim



Şekil C.5. 5 numaralı akım yolunda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu girişim



Şekil C.6. 6 numaralı akım yolunda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu girişim



Şekil C.7. 7 numaralı akım yolunda meydana gelen boşalmanın oluşturduğu girişim

ÖZGEÇMİŞ

Aysam AKSES, 1977 yılında İskenderun'da doğdu. Orta öğrenimini İskenderun İstiklal Makzume Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1995 yılında İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1999 yılı Haziran ayında bu bölümden mezun olarak 1999 yılı Eylül ayında İTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Yüksek Lisans çalışmasına, ardından 2001 yılı Eylül ayında aynı bölümde doktora çalışmasına başladı. Ayrıca 1999 yılı Eylül ayından bu yana TÜBİTAK Ulusal Elektronik ve Kriptoloji Araştırma Enstitüsü'nde Uzman Araştırmacı olarak görev yapmakta olan Aysam AKSES iyi düzeyde İngilizce, orta düzeyde Almanca ve başlangıç düzeyinde İtalyanca dillerini bilmektedir.