

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**MAKRO VE MİKRO ATMALI ELEKTRON DEMETLERİ İÇİN DEMET
POZİSYON ALGILAYICILARI TASARIMI**

Müge TURAL GÜNDOĞAN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

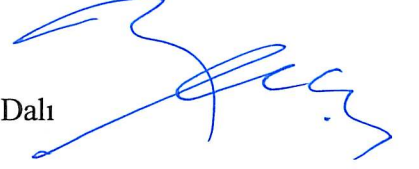
**ANKARA
2017**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

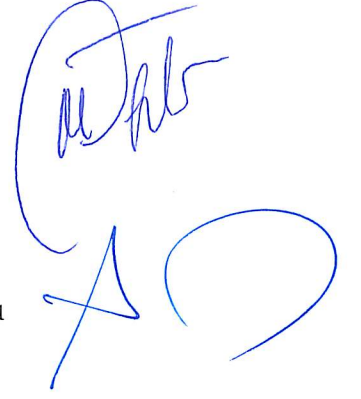
Müge TURAL GÜNDOĞAN tarafından hazırlanan “**Makro ve Mikro Atmalı Elektronik Demetleri İçin Demet Pozisyon Algılayıcıları Tasarımı**” adlı tez çalışması 19/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Ali Murat GÜLER
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Pervin ARIKAN
Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Tülay SERİN
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof.Dr.Atila YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

19.12.2017



Müge TURAL GÜNDOĞAN

ÖZET

Doktora Tezi

MAKRO VE MİKRO ATMALI ELEKTRON DEMETLERİ İÇİN DEMET POZİSYON ALGILAYICILARI TASARIMI

Müge TURAL GÜNDOĞAN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi kapsamında Ankara Üniversitesi Gölbaşı Kampüsünde kurulumu sürmekte olan Elektron Hızlandırıcısı ve Işınım Tesisi TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara) süperiletken elektron hızlandırıcısına dayalı serbest elektron lazeri ve frenleme (Bremsstrahlung) ışınımı tesisi olarak planlanmıştır.

Bu çalışmada ilk olarak TARLA tesisi elektron demetinin pozisyonunu, akımını, yükünü, demet profilini ölçmek için gerekli olan buton ve şerit tipi Demet Pozisyon Monitörlerinin (BPM) tasarımı yapılmıştır. Tasarım ve simülasyon sonuçlarına göre tesis için belirlenen buton tipi BPM' in yerli olanaklar kullanılarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi yapılan BPM' in testleri TARLA' da geliştirilen test düzeneğinde yapılmıştır.

Tez çalışmasında, TARLA tesisi için geliştirilen buton ve şerit tipi BPM'in tasarımı ile buton tipi BPM'in üretimi ve test çalışmalarının sonuçları beklentilere ve uluslararası literatüre uygunluk açısından tartışılmıştır.

Aralık 2017, 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Türk Hızlandırıcı Merkezi, TARLA, Serbest Elektron Lazeri (SEL), Demet pozisyon monitörü (BPM), RF algılayıcılar, Demet diyagnostiği.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

DESIGN OF BEAM POSITION MONITORS FOR MACRO AND MICRO PULSED ELECTRON BEAMS

Müge TURAL GÜNDOĞAN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara) facility is planned a superconducting electron accelerator based infrared free electron laser and bremsstrahlung facility in frame of Turkish Accelerator Center (TAC) project that is under construction in Gölbaşı Campus of Ankara University.

In this study, first of all, button and stripline type beam position monitors were designed to use in measurement of main beam parameters of TARLA facility like beam position, beam current, beam charge, beam profile. According to the design and simulation results, the button type BPM was produced with national resources. The bench tests of the produced BPM were carried out at the TARLA Facility.

December 2017, 75 pages

Key Words: Turkish Accelerator Center, TARLA, Free electron Laser (FEL), Beam position monitor (BPM), RF pick-up, Beam diagnostics.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmam sırasında; araştırmalarımın her aşamasında yaptığı öneriler ile hem bilimsel hem de kişisel yardımları ile bana büyük destekte bulunan danışmanın sayın hocam Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), bilimsel ve teknik konularda yardımlarından dolayı Fizik Yüksek Mühendisi Çağlar KAYA'ya, Yrd. Doç. Dr. Avni AKSOY'a, Dr. Bora KETENOĞLU'na, Dr. Özlem KARSLI'ya, Dr. Ayhan AYDIN'a ve M.T.A Genel Müdürlüğü Deniz Araştırmaları Dairesi çalışma arkadaşlarıma, her türlü sabrı gösteren ve desteği esirgemeyen aileme, sevgili eşim Ali'ye ve biricik kızım İpek'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması, DPT2006K-120470 kodlu “Elektron Hızlandırıcısı ve Işınım Tesisi (TARLA)” konulu Kalkınma Bakanlığı projesi tarafından desteklenmiştir.

Müge TURAL GÜNDOĞAN

Ankara, Aralık 2017

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1 Giriş	3
2.2 Demet Diyagnostiği	3
2.3 Yüklü Parçacığın Oluşturduğu Elektromanyetik Alan.....	4
2.4 Demet Pozisyon Algılayıcıları	6
2.4.1 Demet pozisyon ölçümünün temelleri	6
2.4.2 Demet spektrumu	10
2.4.3 Demet pozisyon algılayıcılarının ölçüm karakteristikleri	12
2.4.4 Demet pozisyon algılayıcılarında sinyal işleme	13
2.4.4.1 Genel formülizasyon	13
2.4.4.2 Demet pozisyon algılayıcıları ile pozisyon ölçme.....	16
2.5 Demet Pozisyon Algılayıcılarının Çeşitleri	17
2.5.1 Buton tipi demet pozisyon algılayıcıları.....	18
2.5.2 Şerit tipi demet pozisyon algılayıcıları	19
2.5.3 Kavite tipi demet pozisyon algılayıcıları.....	22
2.5.4 Demet pozisyon algılayıcılarının karşılaştırılması	25
2.6 Demet Pozisyon Algılayıcılarında Sinyal İşleme Elektronikleri.....	27
2.6.1 Toplam-fark yöntemi ile sinyal işleme	28
2.6.2 Logaritmik oransal yöntemi ile sinyal işleme	28
2.6.3 Genlik- faz dönüşüm yöntemi ile sinyal işleme	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1 Materyal	31
3.2 Yöntem	31
4. BULGULAR.....	33
4.1 TARLA Tesisi ve Tesisin BPM İhtiyacı	33
4.2 Buton Tipi BPM Çalışmaları	38
4.2.1 Buton tipi BPM tasarım çalışmaları.....	38
4.2.2 Buton tipi BPM üretim çalışmaları	47
4.2.2 Buton tipi BPM masa üstü testleri.....	52
4.3 Şerit Tipi BPM Tasarım Çalışmaları	59
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	68
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ.....	75

KISALTMALAR DİZİNİ

AC	Alternative current (Alternatif Akım)
BPM	Beam Position Monitor (Demet Pozisyon Algılayıcısı)
CERN	European Organisation for Nuclear Research (Avrupa Nükleer Araştırmalar Merkezi)
CST	Computer Simulation Technology (Üç Boyutlu Elektromanyetik Alan Simülasyonu Paketi)
CW	Continuous Wave (Sürekli Dalga)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
ELBE	Electron Linac for beams with high Brilliance and low Emittance (Yüksek Parlaklık ve Düşük Yayınımlı Demetler için Doğrusal Elektron Hızlandırıcısı)
HFSS	High Frequency Structure Simulator (Üç Boyutlu Tam Dalga Elektromanyetik Alan Simülasyonu Paketi)
KEK	High Energy Accelerator Research Organization- Japan (Japonya Yüksek Enerji Hızlandırıcı Araştırma Organizasyonu)
Linak	Doğrusal Hızlandırıcı
LHC	Large Hadron Collider (Büyük Hadron Çarpıştırıcısı)
RF	Radyo Frekans
SEL	Serbest Elektron Lazeri
TAC (THM)	Turkish Accelerator Center (Türk Hızlandırıcı Merkezi)
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara (Elektron Hızlandırıcı ve Işınım Laboratuvarı)
TESLA	TeV Energy Superconducting Linear Accelerator (TeV Enerjili Süperiletken Doğrusal Hızlandırıcı)
TDR	Technical Design Report (Teknik Tasarım Raporu)
YUUP	Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslararası Proje

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Durgun yüklü parçacığın oluşturduğu elektrik alanı	5
Şekil 2.2	Hareketli parçacığın oluşturduğu elektromanyetik alan.....	5
Şekil 2.3	a. Demet hattında ilerleyen demetin oluşturduğu yük dağılımı b.Demet hattından sapmış demetin oluşturduğu yük dağılımı.....	7
Şekil 2.4	Görüntü yükünün oluşturduğu akım (Forck 2011)	8
Şekil 2.5	Demet hattında oluşan elektromanyetik alanlar (McGinnis 1994).	9
Şekil 2.6	Silindir merkezinden sapmış ince bir demet. Koyu renkler, demet pozisyon algılayıcılarında kullanılan karşılıklı elektrotları göstermektedir (McGinnis 1994)	10
Şekil 2.7	Kare ve gaussiyen atma için zaman ve frekans bağımlılığı	12
Şekil 2.8	Demet pozisyon algılayıcı sistemi	13
Şekil 2.9	a. Demet pozisyon algılayıcı elektrotu, b. Eşdeğer elektrik devresi (Forck 2011).....	15
Şekil 2.10	Demet pozisyon algılayıcısının düşey düzlemi.....	17
Şekil 2.11	Buton tipi demet pozisyon algılayıcısından elde edilen yük ve akım grafikleri.....	19
Şekil 2.12	Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısı	20
Şekil 2.13	Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısının elektrik devresi	21
Şekil 2.14	Bir kavite BPM geometrisi	23
Şekil 2.15	Kavitedeki elektron demeti uayrılmaları a. TM010 modu için, b. TM110 modu için (Forno 2011)	24
Şekil 2.16	Dipol (TM110) ve monopol (TM010) için elektrik alan dağılımı (Jolly 2004)	25
Şekil 2.17	Kavite tipi BPM' in şematik frekans spektrumu.....	26
Şekil 2.18	Logaritmik oransal yöntemi ile sinyal işleme	30
Şekil 2.19	Genlik – faz dönüşümü yöntemi ile sinyal işleme	31
Şekil 4.1	TARLA Tesisinin şematik gösterimi (TARLA TDR V2, 2015).	34
Şekil 4.2	TARLA enjektör alanı BPM yerleşim planı	37
Şekil 4.3	TARLA'da linak-1 ve linak-2 arası demet hattı BPM yerleşim planı.....	37
Şekil 4.4	TARLA'da linak-2 sonrası demet hattı BPM yerleşim planı	38
Şekil 4.5	TARLA'da salındırıcı magnetler öncesi BPM yerleşim planı.....	38
Şekil 4.6	TARLA'da salındırıcı magnetler sonrası BPM yerleşim planı.....	39
Şekil 4.7	BPM'e uygulanan sinyal ($q=1$ pC, $\sigma=3$ mm, $\beta=0.9999$)	40
Şekil 4.8	Anten yarıçapına göre BPM çıkış sinyalleri	41
Şekil 4.9	Buton antenlerin CST ile gösterimi	42
Şekil 4.10	Farklı paketçik yüklerine göre karşı BPM çıkış sinyalleri.....	43
Şekil 4.11	Butonlara uygulanan 1 V potansiyelin dağılımı.....	45
Şekil 4.12	CST EM Studio ile elektrik alan enerjisi ekran görüntüsü	46
Şekil 4.13	Transfer empedansının frekansa göre davranışı (Eşitlik 2.14).....	47
Şekil 4.14	Demetin pozisyon değiştirmesine karşı $\Delta U/\Sigma U$ oranı.....	48
Şekil 4.15	BPM gövde ve anteninin üç boyutlu çizimi.....	49
Şekil 4.16	BPM' in önden ve yandan kesit çizimleri	49
Şekil 4.17	BPM gövdesinin önden, üstten ve yandan teknik çizimleri.....	50

Şekil 4.18 BPM anteninin teknik çizimi	51
Şekil 4.19 BPM anteninin gövdeye montajı.....	52
Şekil 4.20 Test düzeneğinin blok gösterimi	53
Şekil 4.21 Test düzeneğinin görünümü.....	53
Şekil 4.22 Giriş sinyalinin osiloskop görüntüsü.....	54
Şekil 4.23 Tel, BPM' in merkezinde iken BPM antenlerinden elde edilen çıkış sinyalleri.....	55
Şekil 4.24 Test düzeneğinde antenlerin yerleşiminin şematik gösterimi	56
Şekil 4.25 Telin 1 numaralı antene yakın olduğu durum (üst resim) ve telin 2 numaralı antene yakın olduğu durum (alt resim)	57
Şekil 4.26 Demetin pozisyon değiştirmesine (x) karşı $\Delta U/\Sigma U$ grafiği	58
Şekil 4.27 Pozisyon haritası	60
Şekil 4.28 Şerit tipi BPM' in CST görüntüsü.....	62
Şekil 4.29 Şerit tipi BPM' in şematik gösterimi	63
Şekil 4.30 Şerit tip BPM simülasyonunda uygulanan giriş sinyali	64
Şekil 4.31 Demet BPM' in merkezinde plakalardan alınan çıkış sinyali görüntüsü	65
Şekil 4.32 Demet BPM' in merkezinden x yönünde 3 mm kaydırıldığına karşılıklı plakalardan (Anten 1 ve Anten 2) alınan çıkış sinyali görüntüsü	65
Şekil 4.33 Demetin sapma uzaklığına göre S_x değerleri.....	66
Şekil 4.34 CST EM Studio ile Şerit tipi BPM' in elektrik alan enerjisi ekran görüntüsü.....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Demet teşhis cihazları ve bu cihazların demete etkisi	4
Çizelge 2.2 BPM'lerin karşılaştırılması	28
Çizelge 4.1 TARLA nın elektron demeti parametreleri (TARLA TDR V2, 2015)	35
Çizelge 4.2 TARLA' da kullanılması öngörülen diagnostik cihazları (TARLA TDR V2, 2015)	36
Çizelge 4.3 Farklı yarıçaplı butonlar için SNR oranları	44
Çizelge 4.4 Farklı paketçik yükleri için SNR oranları	44
Çizelge 4.5 BPM anten ve gövdesinin üretim özellikleri	52



1. GİRİŞ

Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesinin üçüncü aşaması DPT2006K-120470 kodu ve “Türk Hızlandırıcı Merkezinin Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları” adıyla Kalkınma Bakanlığının desteği ile Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde ve Üniversitelerarası işbirliği ile 2006 yılından itibaren sürdürülmüştür (<http://thm.ankara.edu.tr>). 12 üniversitenin işbirliği ile yürütülen proje kapsamında THM’nin ilk tesisi olarak planlanmış olan Elektron Hızlandırıcısı ve Işınım Tesisinin (TARLA) kurulumu Ankara Üniversitesi Gölbaşı kampüsünde devam etmektedir. TARLA tesisi ülkemizde hızlandırıcıya dayalı ilk Ar-Ge tesisi olma özelliğini taşımaktadır. Proje kapsamında ayrıca GeV enerjili ve büyük ölçekli 4 hızlandırıcı tesisinin teknik tasarım çalışmaları yapılmış olup, çalışmanın bu aşaması 2015 yılı sonunda tamamlanmıştır (Yavaş, 2016). Kalkınma Bakanlığı tarafından projenin 2016 yılı başından itibaren aynı kodla ve “Elektron Hızlandırıcı ve Işınım Tesis (TARLA)” adı ile devam etmesine karar verilmiştir. TARLA tesisi 10-40 MeV enerjili süperiletken elektron hızlandırıcısına dayalı serbest elektron lazeri ve frenleme (Bremsstrahlung) tesisi olarak kurulmaktadır. Tesiste elde edilecek serbest elektron lazerinin 3-250 μm aralığında olması planlanmıştır. Ayrıca maksimum 35 MeV enerjili frenleme ışınımı da elde edilip Ar-Ge amaçlı kullanılacaktır (<http://tarla.org.tr>). Tesisin kurulumu, THM projesinde önerilerek 26.02.2010 tarihinde Ankara Üniversitesi bünyesinde kurulan ve ülkemizde ilk olan Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü (HTE) tarafından koordine edilmektedir (<http://hte.ankara.edu.tr>). TARLA tesisinin kurulumunda edinilen bilgi birikimi ve deneyim planlanmış olan büyük ölçekli tesislerin hayata geçirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. TARLA tesisinde hızlandırıcının kurulumunun 2019 yılı içinde tamamlaması ve 2020 yılından başlayarak frenleme ve serbest elektron lazeri demetlerinin kullanımı yoluyla ülkemiz araştırmacılarının hizmetine sunulması planlanmaktadır.

Hızlandırıcı sistemlerinde demet teşhis (diagnostics) ve kontrol sistemleri en önemli alt sistemleri oluştururlar. Demetin bazı parametrelerini (enerji, pozisyon, akım, emittans vb.) hızlandırıcı içerisinde demete müdahale etmeden ölçme yöntemlerinin en önde

geleni RF algılayıcıları kullanılarak yapılan ölçüm yöntemleridir. Demet pozisyon algılayıcıları (BPM) da bu ölçüm yöntemlerinden biridir. Bu algılayıcılar, demetin demet hattı içerisindeki konumunu belirlemek için kullanılır. Bu yöntemde demetin demet hattı içerisinde ilerlerken saldığı elektromanyetik alan RF antenler ile algılanır ve algılanan alan yükseltilerek demetin karakteristikleri sinyal işleme metotları kullanılarak ortaya konur. Alanın algılanacağı yerde şüphesiz demet hattı geometrisinin değiştirilmesi gerekmektedir. Ancak değiştirilen geometrin hem algılanan paketi hem de arkadan gelen diğer paketleri bozmaması gerekmektedir. Bunun için algılanan paketin yükü boyutlarına bağlı olarak toplayıcı oyukları tasarlanır ve en ideal duruma getirilir.

Bu tezde, TARLA tesisinde kullanılması öngörülen demet pozisyon algılayıcıları için tasarım çalışmaları yapılmıştır. TARLA tesisinde ölçülecek parametreye göre buton, şerit (strip) ve kavite türü BPM' ler kullanılacaktır. Buton ve şerit tipi demet pozisyon algılayıcıları TARLA tesisi için tasarlanarak, geometrileri belirlenmiştir. Computer Simulation Technology (CST) lisanslı simülasyon programı kullanılarak BPM'lerin mekanik tasarımları ve simülasyonları yapılmıştır.

Tasarımı tamamlanan buton tipi algılayıcının tasarımı ve teknik çizimleri yapılarak OSTİM' de mekanik üretimi gerçekleştirilmiştir. TARLA tesisinde gerçekleştirilen vakum kaçak testleri ve masa üstü elektronik ölçüm testleri ile üretim ve simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tez çalışması kapsamında ülkemizde ilk kez buton tipi BPM üretimi ve testleri gerçekleştirilmiştir. Masa üstü testleri TARLA tesisinde hazırlanan test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. BPM tasarım, üretim ve test çalışmalarının yerli olanaklarla yapılması hızlandırıcı teknolojileri konusunda dışa bağımlılığı azaltması açısından önemli bir adım olmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Giriş

Bir hızlandırıcı sisteminin ne derece verimli çalıştığı ve verimli çalışması için ne yapılması gerektiği, ancak elde edilen demet parametrelerinin ölçülmesi ve incelenmesi ile anlaşılır. Demet teşhisi ile demetin akımı, konumu ve enerjisi gibi parametreler hakkında bilgi edinilir. Bu ölçümlerin yapılabilmesi için demet hattının belirli yerlerine bir takım teşhis cihazları yerleştirilmesi gerekmektedir. Ölçüm işlemlerinin demete zarar vermeden gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

2.2 Demet Diyagnostiği

Elektron demeti diyagnostiği, elektron demetinin elektron tabancasından çıkıp durduruluncaya kadar tüm hat boyunca akım, pozisyon, büyüklük, parlaklık, enerji, yayılım gibi demet parametrelerini ölçmek için uygulanır. Demet özelliklerinin belirlenmesi ve kontrol edilmesi hızlandırıcının çalışma verimliliği açısından önemlidir. Demetin özelliklerinden herhangi birinin kontrol altında tutulamaması demet hattında tahribatlara yol açabilmektedir.

Demet diyagnostiğinde ölçümler demete zarar vermeden anlık olarak yapılmalıdır. Demetten alınan sinyaller lokal elektronik yardımı ile takip edilebileceği gibi, dönüştürücüler yardımı ile bilgisayar ortamına aktararak, bilgisayar kontrollü olarak da yapılabilir. İstenilen parametreleri elde etmek için gerekli demet ayarları gerçek zamanlı olarak kontrol odasında yapılmalıdır.

Demet akımı, demetin en temel parametresidir. Faraday kapları, iyonizasyon odaları, sintilatörler ve akım dönüştürücüler ile yük veya akımın ölçümü yapılmaktadır. Bir başka önemli demet parametresi ise demet hattı içerisinde demetin pozisyonudur. Demet pozisyonu gerçek zamanlı olarak sürekli takip altında tutulmalıdır. Demetin

pozisyonunun belirlenmesinde demet pozisyon algılayıcıları (Beam Position Monitors – BPM) kullanılmaktadır. Ölçümler sonucunda demet, odaklayıcı (selenoid) ve saptırıcı (stereer) magnetler yardımıyla hizalanır ve odaklanır. Demet kayıp monitörleri ise, yüksek şiddetli demetlerde gerçekleşebilecek küçük kayıpların hassas olarak ölçülmesinde kullanılır.

Çizelge 2.1 Demet teşhis cihazları ve bu cihazların demete etkisi

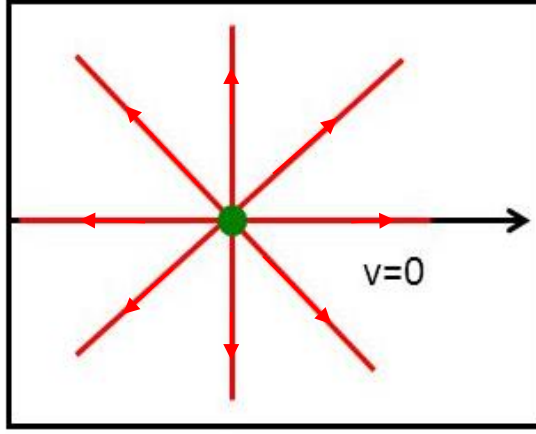
Cihaz	Fiziksel Etki	Ölçüm	Demete etkisi
Faraday kafesi	Yük	Şiddet	Bozar
Akım dönüştürücüsü	Manyetik alan	Şiddet	Bozmaz
Duvar akım monitörü	Görüntü akımı	Şiddet/boyuna demet şekli	Bozmaz
Demet Pozisyon Algılayıcısı	Elektrik ve manyetik alan	Pozisyon, ortalama akım	Bozmaz
Sintilatör ekran	Atomik uyarılmalar	Enine demet boyutu	Bozar
Atık gaz monitörü	İyonizasyon	Enine demet boyutu	Bozmaz

Çizelge 2.1’de bir demet hattında demetin özelliklerini teşhis etmek için kullanılacak olan diyagnostik elemanları ve bu elemanların demetin teşhisi esnasında demete olan etkisi verilmiştir.

2.3 Yüklü Parçacığın Oluşturduğu Elektromanyetik Alan

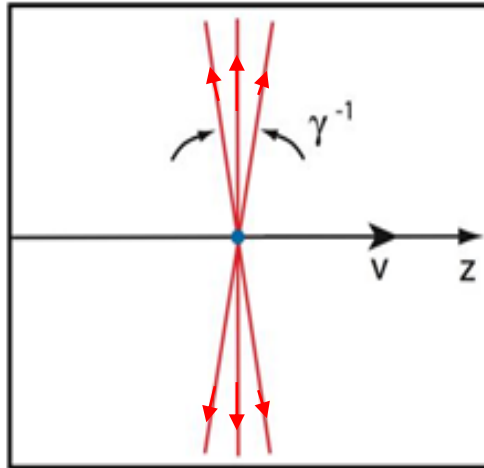
Her yüklü parçacığın hareketine zamana bağlı bir elektromanyetik alan eşlik eder. Yüklü parçacık durgun olduğu zaman oluşturduğu alan sadece elektrik alandır. Manyetik alanı yoktur. Oluşan elektrik alan şekil 2.1’de görüldüğü gibi noktasal durgun

yük için dışarıya doğru her yöne bir alandır.



Şekil 2.1 Durgun yüklü parçacığın oluşturduğu elektrik alanı

Eğer parçacık hareketli ise parçacığın hem elektrik hem de manyetik alanı vardır. Bu alanların hesabı ise, rölativistik elektromanyetik tensörlerin kullanılması ile kendi durgun çerçevesindeki elektrik ve manyetik alanların laboratuvar çerçevesine dönüştürülmesi ile yapılır (Lunde 2014). Hareketli parçacığın oluşturduğu elektromanyetik alan şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Hareketli parçacığın oluşturduğu elektrik alan

q yüklü bir parçacığın z ekseni boyunca v hızı ile hareket ettiğini düşünelim. Lorentz

dönüşümleri uygulanırsa simetriden ötürü oluşacak alanlar şu şekilde olur:

$$\vec{E}(r, z, t) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\gamma[\vec{r} + (z-vt)\hat{z}]}{[\gamma^2(z-vt)^2]^{3/2}} \quad (2.1)$$

$$\vec{B}(r, z, t) = \frac{\beta}{c} \hat{n} \times \vec{E}(r, z, t) \quad (2.2)$$

Burada c ; ışık hızını, β ; v/c oranını, ϵ_0 ise elektriksel geçirgenliği göstermektedir. $\hat{n}$, birim vektörüdür. Görüldüğü gibi manyetik alanın sadece açısız (azimutal) bileşeni vardır. Yüksek enerjilerde rölativistik daralmadan dolayı, alanlar bir bölge içinde $1/\gamma$ açısı ile sınırlanmakta olup parçacık hareketine diktir. Boyuna elektrik alanı $E(z)$, $1/\gamma^2$ ile orantılı olarak azalırken, enine elektrik alan ve azimutal manyetik alan ise γ ile orantılıdır. Yani eğer parçacık hızı artarsa, hareket doğrultusunda elektrik alan miktarı azalmakta ve azimutal manyetik alan artmaktadır. Sonuç olarak hareket doğrultusundaki alan örgüsü parçacık enerjisine ters orantılı olan genişliğe sahip düzleşmiş bir disk şekline yaklaşmaya başlar, yani büzülür. Parçacık hızı ışık hızına yaklaşırsa veya kinetik enerjisi durgun enerjisinden çok büyük olursa, elektrik ve manyetik alanın doğrultusu demet hareketine dik olacaktır. Enine elektrik ve manyetik alan dağılımları Transverse Electric and Magnetic (TEM) modları olarak adlandırılır (Jackson 1962).

2.4 Demet Pozisyon Algılayıcıları

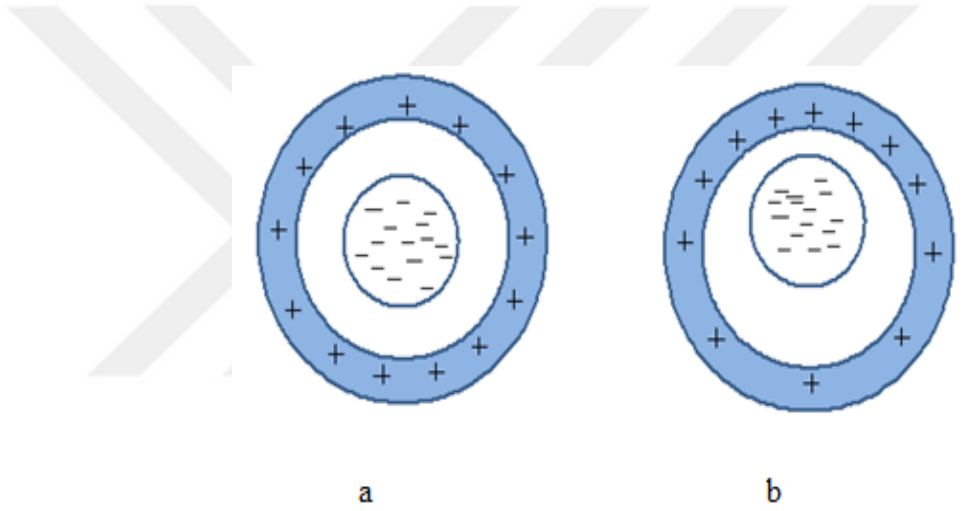
2.4.1 Demet pozisyon ölçümünün temelleri

Demet pozisyon algılayıcıları ile yalıtılmış metal plaka üzerinde demetin elektrik alanının indüklediği yükün ölçümü yapılmaktadır. İndüklenen yükün oluşturduğu elektrik alan zamana bağımlı olduğu için plaka üzerinde alternatif akım (AC) sinyali gözlenir. (Forck, 2011). Demet pozisyon algılayıcıları demetin pozisyonunu belirlemek amacı ile demet hattı etrafına çaprazlama olarak yerleştirilmiş olan algılayıcılarından oluşmaktadır. Zıt algılayıcılardan elde edilen farklı sinyaller demetin kütle merkezini

her bir enine düzlem için ayrı ayrı verir.

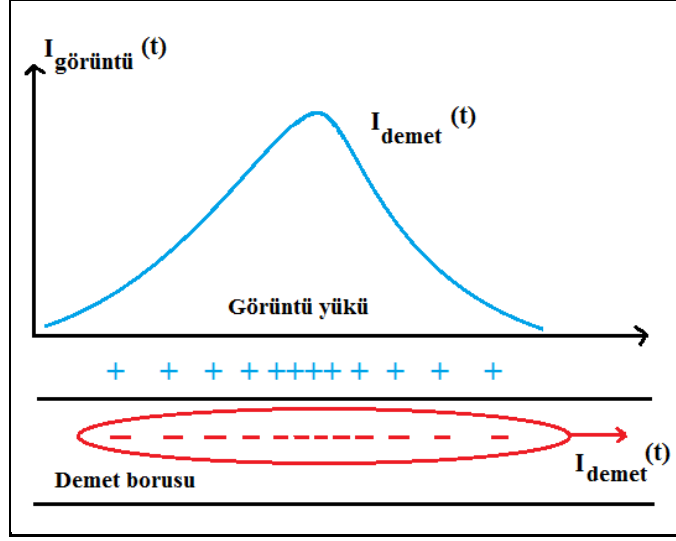
Genel olarak demet pozisyon algılayıcıları yüklü parçacık demeti tarafından oluşturulan elektromanyetik alanı algılar. Görelî demet hızları için laboratuvar çerçevesindeki enine alan bileşeni demetin çerçevesine göre karşılaştırıldığında artar.

Topraklanmış iletken yakınındaki bir yük ayna simetrisi ile iletkenin ardında görüntü yükü yaratır. Silindirik bir demet hattı içerisindeki yükün oluşturduğu bu görüntü yükü gerçek yük ile ters işaretli fakat aynı büyüklükte bir yükür. Bu görüntü yükü silindir boyunca hareketli bir paketi takip eder.



Şekil 2.3 a. Demet hattında ilerleyen demetin oluşturduğu yük dağılımı, b. Demet hattından sapmış demetin oluşturduğu yük dağılımı

Eğer, demet hattındaki demette sapma olursa alan çizgileri paketçik civarında daha yoğundur. Bu yoğun alan çizgileri yoğun fakat asimetric bir görüntü akımı oluşturur.

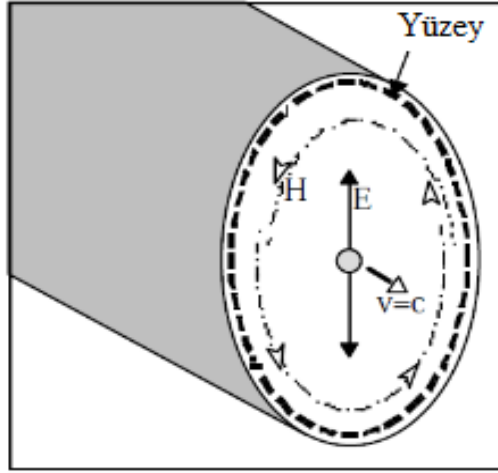


Şekil 2.4 Görüntü yükünün oluşturduğu akım (Forck 2011)

Yüksek enerjili parçacık için enine elektromanyetik (TEM) moda sahip olan atmanın sınırlanma durumu, demet hattı duvarlarında akan görüntü akımının dağılımının çözümünde Ampere Yasasının kullanımına olanak sağlar. Ampere Yasası:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{demet} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} \iint_{yüzey} \vec{E} \cdot \vec{z} \cdot dA \quad (2.3)$$

Burada E elektrik alanı, H manyetik alanı, dA alan elemanını, ε elektriksel geçirgenliği vermektedir. $\vec{z}$ demete paralel birim vektördür ve $d\vec{l}$ ise şekil 2.5’de görülen kesit düzleminin normalidir.



Şekil 2.5 Demet hattında oluşan elektromanyetik alanlar (McGinnis 1994)

TEM modu için elektrik alanı demet doğrultusuna dik olduğu için, yukarıdaki ifadede yer değiştirme akımı (sağ taraf) sıfırdır. Enine manyetik alan statik iki boyutlu ampere yasasının çözümü ile bulunur (McGinnis 1994).

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_{demet} \quad (2.4)$$

Enine elektrik alan ise manyetik alana şu şekilde bağlıdır:

$$\vec{E} = -\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \hat{z} \times \vec{H} \quad (2.5)$$

Demet hattının içinde elektromanyetik alan olmadığı için görüntü akım yoğunluğu ($J_{görüntü}$), metal yüzeyine teğet manyetik alanı yok etmek için demet hattının yüzeyinde akmak zorundadır.

$$\vec{J}_{görüntü} = \hat{n} \times \vec{H} \quad (2.6)$$

Burada $\hat{n}$; demet hattı yüzeyine dik birim vektördür. Silindirik demet hattı için demet

merkezde iken görüntü akımı:

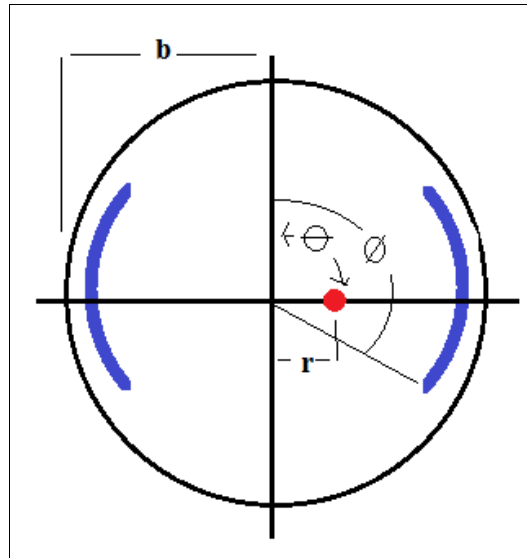
$$\vec{J}_{görüntü} = - \frac{I_{demet}}{2\pi b} \hat{n} \quad (2.7)$$

ile verilir (McGinnis 1994).

Şekil 2.6’da verildiği gibi ince bir demet merkezden sapma gösterirse görüntü akım yoğunluğu şu şekilde verilir;

$$\vec{J}(\phi)_{görüntü} = - \frac{I_{demet}}{2\pi b} \left[\frac{b^2 - r^2}{b^2 + r^2 - 2br \cos(\phi - \theta)} \right] \quad (2.8)$$

Burada I_{demet} ; demetin ortalama akımı, b ; demet hattının yarıçapı, r demetin merkezden uzaklığıdır. ϕ ve θ ise şekil 2.6’da verilen demetin açısal uzaklıklarıdır. Koyu renkler ile gösterilen çizgiler demet pozisyon algılayıcılarında kullanılan karşılıklı elektrotları göstermektedir



Şekil 2.6 Silindir merkezinden sapmış ince bir demet. (McGinnis 1994)

Görüntü akımının yoğunluğu demetin açısal pozisyonunun bir fonksiyonudur. Karşılıklı elektrotlardan görüntü akımına yakın olan elektrot daha fazla akım indükleyecektir. Karşılıklı elektrotların indüklediği akım farkı demet pozisyonunun küçük yerdeğişikliklerinin bir ölçüsüdür (Shafer 1989).

2.4.2 Demet spektrumu

Bir demet pozisyon algılayıcısının tasarımından önce demet akımının frekans spektrumunun bilinmesi gerekir. Farklı yapıda demet profilleri bulunmaktadır. Demet profilleri kare ve gaussiyen şekilli olabilirler.

Kare atmalı ve gaussiyen atmalı bir yapıya sahip q yüklü demet paketçisi için akımın zaman ve frekans bağımlılıkları 2.9–2.13 bağıntıları ile verilmiştir. Kare atmalı demet için zaman bağımlılığı:

$$i(t) = \frac{N_b q}{2\sigma} \quad |t| < \sigma \quad (2.9)$$

$$i(t) = 0 \quad |t| > \sigma \quad (2.10)$$

Frekans bağımlılığı:

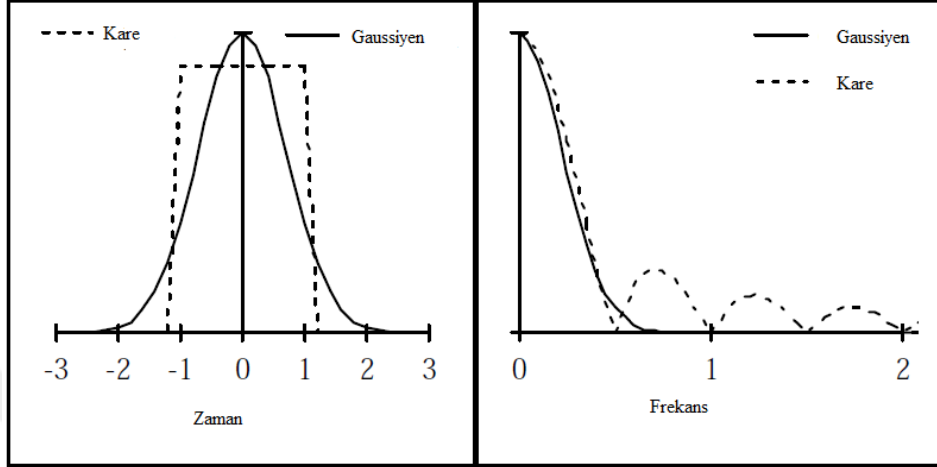
$$i(w) = N_b q \frac{\sin(w\sigma)}{w\sigma} \quad (2.11)$$

Burada N_b bir paketçikteki parçacık sayısı, w açısal frekans ve σ paketçinin zaman uzunluğudur. Gaussiyen atmalı demet için ise zaman bağımlılığı şu şekilde verilir:

$$i(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{N_b q}{\sigma} e^{-(t/\sigma)^2} \quad (2.12)$$

Frekans bağımlılığı:

$$i(w) = N_b q e^{-(w\sigma/2)^2} \quad (2.13)$$



Şekil 2.7 Kare ve gaussiyen atmalar için zaman ve frekans bağımlılığı

Şekil 2.7’de kare ve gaussiyen atma formları için zaman ve frekans bağımlılığı görülmektedir. Frekans bağımlılığı zaman bağımlılığının Fourier transformu ile elde edilir. Görüldüğü gibi her iki durumda da demet akımı yüke bağlıdır. Yüksek frekanslarda kare atmalı bir demet paketçisi gaussiyen atmalı bir demet paketçisine göre daha yavaş sönüme geçmektedir. Bunun nedeni zaman bağımlılığında kare atmanın sahip olduğu keskin köşelerdir. Genel olarak her türlü dalga formunda demet akımının spektral yoğunluğu yüksek frekanslarda $1/w$ ile azalmaktadır (McGinnis 1994).

2.4.3 Demet pozisyon algılayıcılarının ölçüm karakteristikleri

Demet pozisyon algılayıcılarının tasarımının yapılmasından önce ihtiyaç duyulan demet parametrelerinin, bu parametrelerin sistemi nasıl etkilediklerinin ya da sistemin bu parametrelerden nasıl etkilendiklerinin anlaşılması gerekmektedir.

Hassasiyet: Demetin konumunu kullanılan ekipmanlara göre belirleme yeteneğidir. Mekanik tasarımda yapılan hatalar, demet algılayıcılarındaki mekanik toleranslar, bağlantı kablolarında meydana gelen yansımalar ve kayıplar, kalibrasyon hataları elektromanyetik girişim ve devre gürültüleri demet konumunun belirlenmesindeki hatalara neden olmaktadır (Shafer 1989).

Pozisyon çözünürlüğü: Demet pozisyonun çözünürlüğü demetin olması gereken konumundan küçük yerdeğiştirmeler ile uzaklaşmasını ölçme yeteneğidir. Sistemin en önemli karakteristiklerindendir (Vafa 2012).

Zaman çözünürlüğü: Demet pozisyonunun ölçülebildiği frekans aralığıdır. Bazı durumlarda demet çok hızlı bir enine hareket yapar ve bunun tanımlanması gerekebilir. Diğer taraftan da demet atması çok kısadır ve bu zaman aralığında verinin alınması zorunludur. Zaman çözünürlüğü BPM' in bir sonraki demet atmasını algılayabilme yeteneğidir (Sargsyan 2004).

Demet akımı: Genellikle demet paketçığı üzerindeki ortalama DC demet akımını ifade eder. Demet akımı pozisyon belirleme için önemli bir parametredir, çünkü sinyal-gürültü oranını belirler. Demet algılayıcı elektrotlarında oluşan pik voltajı paketçik içi demet akımı ile orantılıdır. Tek paketçik için; her paketçikteki parçacık sayısı demet akımının bir ölçüsü olarak kullanılır. Demet şiddetiyle yakından ilişkilidir. Demet şiddeti frekansa bağımlı, demet akımı ise zamana bağımlıdır (Shafer 1989).

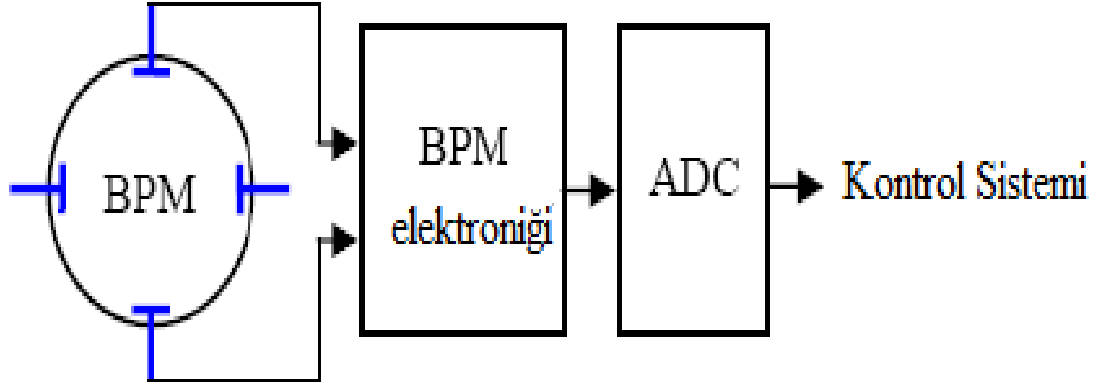
Dinamik Aralık: Diyagnostik sistemdeki tepki olarak ölçülen demet akımının aralığını ifade eder. Çoğu durumda sinyal toplama elektronik sinyal işleme zincirinin giriş basamağındaki değişken kazanç yükselteci ile yapılır (Forck 2011).

Sinyal gürültü oranı: İstenilen sinyal gücünün istenmeyen sinyal gücüne oranını ifade eder. Gürültü; gerçek termal gürültü, amplikatör gürültü, elektromanyetik gürültü (silikon kontrollü doğrultucu gibi veya demet pozisyon sinyalleri gibi aynı frekansa

sahip radyofrekans girişimi) olabilir.

2.4.4 Demet pozisyon algılayıcılarında sinyal işleme

BPM' in iki zıt plakasından alınan elektrik sinyali elektronik kart düzeneğine gönderilir. Analog-to-digital dönüştürücüler (ADC) yardımıyla analog sinyal dijital sinyale çevrilir. Dijital sinyal daha sonra kontrol sistemine gönderilir. Burada gerekli kalibrasyon sabitleri de uygulandıktan sonra elde edilen bu veriler demetin pozisyonunun hesaplamasında kullanılır. Demet pozisyon algılayıcılarının temel sinyal işleme uygulamasının şematik gösterimi şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8 Demet pozisyon algılayıcı sistemi

2.4.4.1 Genel formülizasyon

Şekil 2.8'de bir demet pozisyonunun elektrotlarının şematik gösterimi verilmiştir. Burada demet merkezinden a kadar uzaklıkta A anten yüzey alanına sahip ve uzunluğu l olan plakalar bulunmaktadır. $I_{görüntü}$ görüntü akımı, görüntü yükü $Q_{görüntü}$ tarafından oluşturulmuştur.

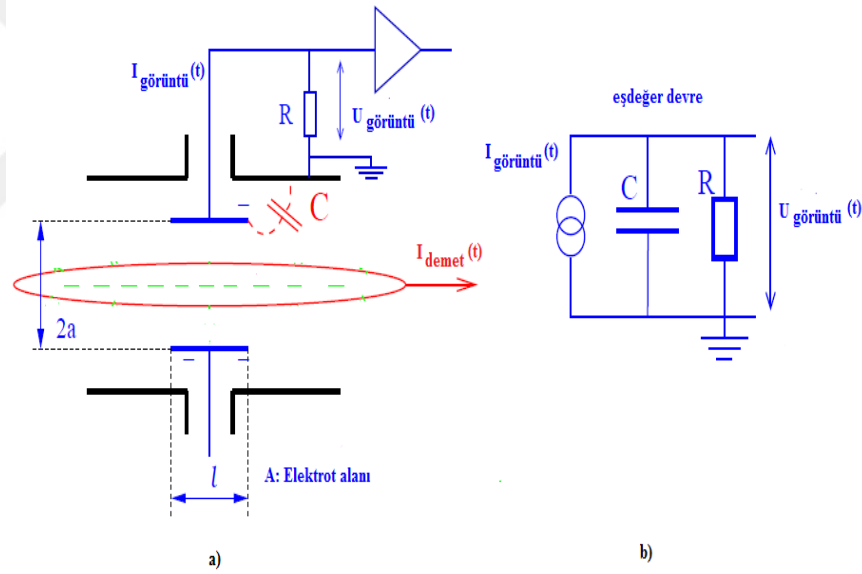
$$I_{görüntü} \equiv \frac{dQ_{görüntü}}{dt} = \frac{A}{2\pi al} \cdot \frac{dQ_{demet}(t)}{dt} \quad (2.14)$$

$v=\beta c$ hızına sahip bir elektron demeti için demet akımı, demet yükünün türevi olarak verilir. Frekans alanında demet akımı I_{demet} ise açısal frekansın bir fonksiyonudur ve $I_{demet} = I_0 e^{i\omega t}$ ile verilir.

$$\frac{dQ_{demet}(t)}{dt} = \frac{l}{\beta c} \frac{dI_{demet}}{dt} = \frac{l}{\beta c} \cdot i\omega I_{demet}(\omega) \quad (2.15)$$

Demet pozisyon algılayıcılarında boyuna transfer Ohm kanununa göre verilir. Burada U potansiyel farkı vermektedir.

$$U_{görüntü}(w) = R \cdot I_{görüntü}(w) = Z_t(w, \beta) \cdot I_{demet}(w) \quad (2.16)$$



Şekil 2.9.a. Demet pozisyon algılayıcı elektrotu, b. Eşdeğer elektrik devresi (Forck 2011)

Demet pozisyon algılayıcılarının kapasitansını C ; elektrotların birbirlerine olan uzaklığı, elektrotların geometrisi ve yükselteç girişi ile elektrot arasındaki kabloun direnci R belirler. Şekil 2.9.b'de verilen devrenin empedansı Z şu şekilde verilir:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + i\omega C \quad \Leftrightarrow \quad Z = \frac{R}{1+i\omega RC} \quad (2.17)$$

Denklem 2.18’de verilen iletim fonksiyonu;

$$U_{görüntü} = \frac{R}{1+iwRC} \cdot I_{görüntü} = \frac{1}{\beta c} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{A}{2\pi a} \cdot \frac{iwRC}{1+iwRC} \cdot I_{demet} \quad (2.18)$$

$f_{kesilim} = w_{kesilim}/2\pi = (2\pi RC)^{-1}$ ve $f = w/2\pi w$ ifadeleri denklem 2.17’de yerine konulursa iletim empedans şu şekilde verilir:

$$|Z_t| = \frac{1}{\beta c} \frac{1}{c} \frac{A}{2\pi a} \frac{w/w_{kesilim}}{\sqrt{1+w^2/w_{kesilim}^2}} \quad (2.19)$$

Bir demet pozisyon algılayıcısı hızlandırma frekansı ve paketçik uzunluğu ile verilen frekans aralığı ile uyumlu olmalıdır (Forck 2011).

Elektrot ile yükselteç girişi arasındaki empedans değeri $R= 50 \Omega$ ’ a eşitlenir. Dalga bir hat üzerinden ilerlerken eğer farklı empedansa sahip bir hatla karşılaşırse dalganın bir kısmı iletilirken bir kısmı yansır. Yansıyan dalganın minimum olması yani iletim sırasında oluşan kaybın en az olması için empedans uyumu önemlidir. Bir iletim hattının hem minimum kayıplı hem de maksimum güç kapasitesine sahip olması istenir. 30ohm (maksimum güç kapasitesi) ile 77 ohm’un (minimum kayıp) aritmetik ortalaması 53.5 ohm, geometrik ortalaması ise 48 ohm’dur. 50 ohm maksimum güç kapasitesi ile minimum kayıp arasında orta yolu sağlayan bir değer olduğundan mikrodalga sistemleri için zamanla standart karakteristik empedans haline gelmiştir.

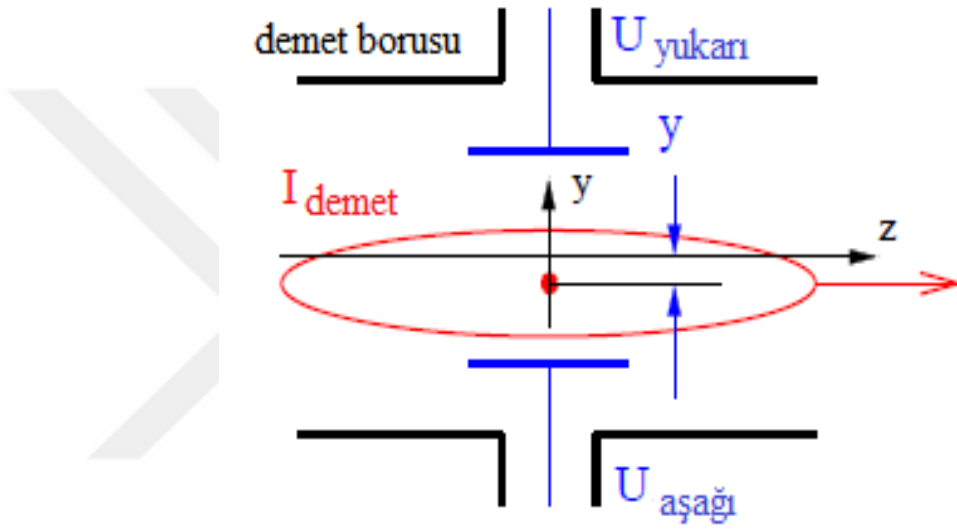
2.4.4.2 Demet pozisyon algılayıcıları ile pozisyon ölçme

Demet pozisyon algılayıcılarının temel uygulaması demet hattına göre demetin kütle merkezinin ölçülebilmesidir. Dikey ve yatay pozisyonda karşılıklı olarak eşit uzaklıkta yerleştirilmiş dört izole plaka üzerinde oluşan voltaj değerleri (U) okunur. Demet pozisyonunu bulmak için karşılıklı antenlerde oluşan voltaj farkı kullanılır.

$$\Delta U_x = U_{sağ} - U_{sol} \quad (2.20)$$

$$\Delta U_y = U_{yukarı} - U_{aşağı} \quad (2.21)$$

Denklem 2.20 ve 2.21 ile karşılıklı antenler arasındaki fark voltajı hesaplanır. Şekil 2.10'da bir demet pozisyon monitörünün düşey düzlemi görülmektedir.



Sekil 2.10 Demet pozisyon algılacısının düşey düzlemi

Demetin pozisyonun yatay düzlemde yerdeğiştirmesi şu şekilde hesaplanır.

$$x = \frac{1}{S_x} \cdot \frac{U_{sağ} - U_{sol}}{\Sigma U_x} + \delta_x \equiv \frac{1}{S_x} \cdot \frac{\Delta U_x}{\Sigma U_x} + \delta_x \quad (2.22)$$

Demetin pozisyonun dikey düzlemde yerdeğiştirmesi ise şu şekilde hesaplanır.

$$y = \frac{1}{S_y} \cdot \frac{U_{yukarı} - U_{aşağı}}{\Sigma U_y} + \delta_y \equiv \frac{1}{S_y} \cdot \frac{\Delta U_y}{\Sigma U_y} + \delta_y \quad (2.23)$$

x ve y demet yerdeşiştirmeleri demetin şiddetinden bağımsızdır. Diğer bir anlatımla demetin şiddeti demet yerdeğiştirmelerini etkilememektedir. Burada S_x ve S_y ile verilen oranlar hassasiyet sabiti olarak adlandırılır. Büyük demet yerdeğiştirmeleri için bu sabitler doğrudan demet pozisyonuna bağlı olabilir δ ile verilen ifade ise off-set düzeltmesidir (Vafa 2012).

$$S_x(x) = \frac{d}{dx} \frac{\Delta U_x}{\Sigma U_x} = \% / mm \quad (2.24)$$

$$S_x(x) = \frac{d}{dx} \left(\log \frac{U_{sağ}}{U_{sol}} \right) = dB / mm \quad (2.25)$$

% / mm ile lineer, dB / mm ile ise logaritmik pozisyon duyarlılığını verilmektedir.

2.5 Demet Pozisyon Algılayıcılarının Çeşitleri

Sinyallerin algılanma yöntemlerine ve tasarlanılan algılayıcıların geometrilerine bağlı olarak farklı tiplerde demet pozisyon algılayıcıları bulunmaktadır. Göreli hızlarda hareket eden bir demet paketçiğinin oluşturduğu görüntü yükü her tip demet pozisyon algılayıcı için farklı şekilde yapılmaktadır.

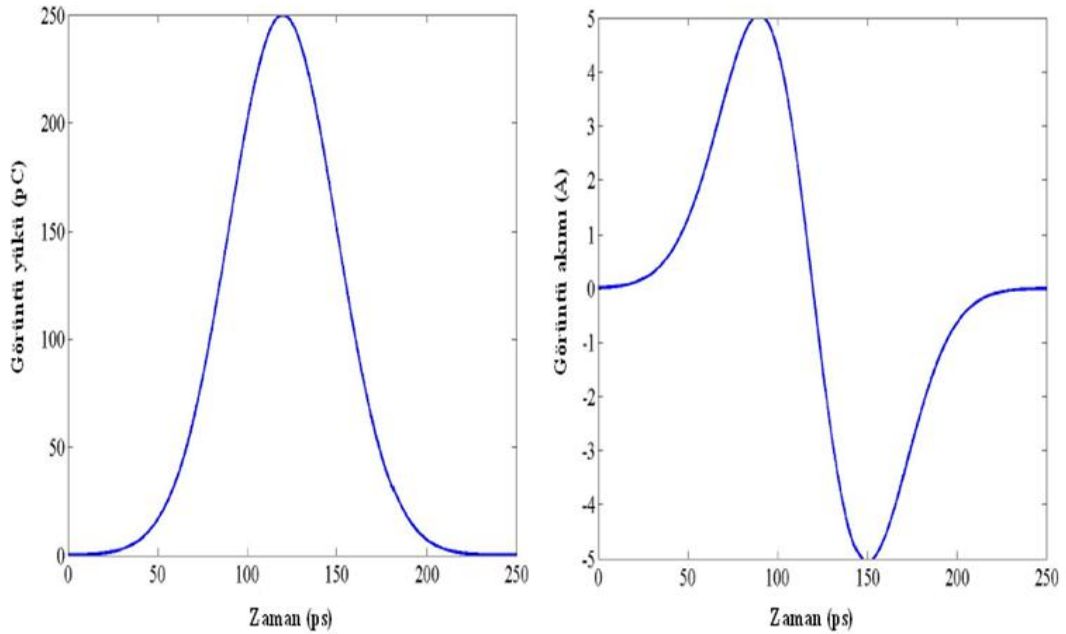
2.5.1 Buton tipi demet pozisyon algılayıcıları

Tipik bir buton tipi demet pozisyon algılayıcısı, vakum altında dört elektrodun demetin pozisyonunu ölçmek amacı ile karşılıklı olarak yerleştirilmesi ile oluşturulur. Eğer demet hattı merkezine göre yerdeğiştirme yapıyor ise manyetik ve elektrik alanlarının değişiminden dolayı Bölüm 2.4.1’de anlatıldığı üzere görüntü yükünde de değişiklik olur. Her bir elektrottan indüklenen görüntü yükünün ölçümü demetin pozisyon bilgisini verir. Demet merkezde iken karşılıklı antenlerde okunması beklenen voltaj değerleri aynıdır (Mollae 2014).

Buton tipi demet pozisyon algılayıcılarında elektrotlar düğme şeklinde, çapı birkaç mm den birkaç cm ye kadar değişen yalıtılmış metal plakadan oluşmaktadır. Bu nedenle buton tipi olarak adlandırılır. Genellikle hızlandırma frekansı 100 MHz ile 3GHz olan doğrusal ve dairesel hızlandırıcılarda kullanılır. Buton tipi BPM' ler genel olarak paketçik uzunluğu kısa olan atmalar için kullanılır (Forck 2011).

Kısa bir pin ile elektrot vakum dışarısında standart bir rf konektörüne bağlanmıştır. Buton plakadan konnektöre geçiş kısımlarındaki vakumlu parçaların seramik destekleri düşük sinyal yansımaları için tasarlanmalıdır. Çünkü GHz frekans aralığında bu durum büyük önem taşımaktadır. Özellikle analog elektroniğe doğru sinyal yolu koaksiyel 50 ohm eşleştirmesi ile uyumlu olmalıdır

Bir buton elektrodundan alınan görüntü yükünün ve görüntü akımının grafiği şekil 2.11'de verilmiştir. Gaussiyen bir yükün oluşturduğu demet akımı yükün türevi olarak verilir. Bu akımın empedanslar üzerinden alınan voltaj değeri okunur ve her bir elektrottan elde edilen voltaj değerleri demetin demet hattındaki pozisyonu hakkında bilgi verir.

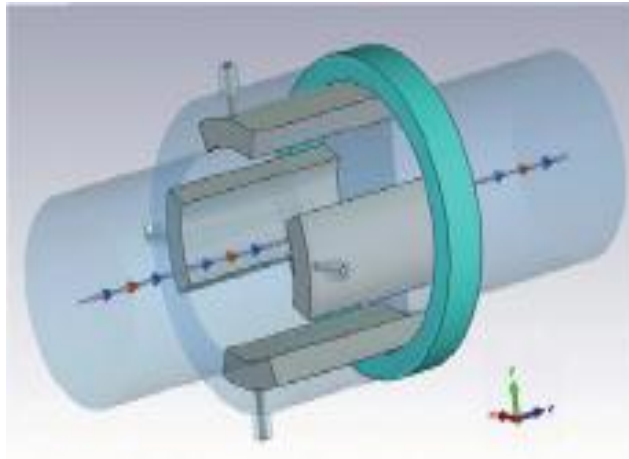


Şekil 2.11 Buton tipi demet pozisyon algılayıcısından elde edilen yük ve akım grafikleri

Buton tipi BPM antenlerinin küçük ebatlara sahip olması ve kısa vakum beslemesi birçok hızlandırıcıda kullanımının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca buton tipi demet pozisyon algılayıcılarının maliyeti de diğer demet pozisyon algılayıcılarına göre daha düşüktür.

2.5.2 Şerit tipi demet pozisyon algılayıcıları

Şerit tipi demet pozisyon algılayıcıları, buton tipi demet pozisyon algılayıcılarının daha gelişmiş ve modifiye edilmiş halidir. Paketçiklerin paketleme frekansı ile sınırlanmasına rağmen, o frekansta buton tipi demet pozisyon algılayıcılarına göre daha belirgin bir yanıt verebilmektedir. Standart bir Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısı, demete paralel doğrultuda yerleştirilir. Buton tipi ile çalışma prensipleri benzerdir. Aralarındaki fark buton tipinde kullanılan elektronların yerini boyut olarak daha uzun olan Şerit olarak adlandırılan plakaların almasıdır. Şekil 2.14’de bir Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısı görülmektedir. Karşılıklı yerleştirilmiş plakalar demetin pozisyonunu ölçmek için tasarlanmıştır.

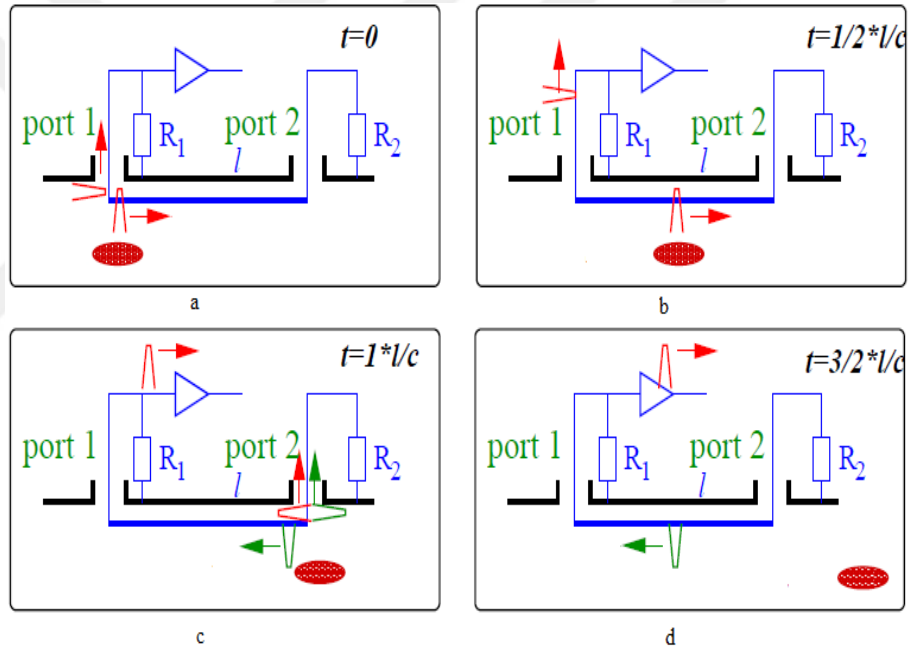


Şekil 2.12 Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısı

Şerit tipi demet pozisyon algılayıcılarının açısal kapsama alanı buton tipi algılayıcılara göre daha geniş olduğu için sinyal gücü daha yüksek olur. Bu algılayıcılar, cm boyutunda iletim hattı içerir. Şerit plakaların baş kısmı uygun bir besleme ile iletim

hattına ve BPM işlemcisine bağlanır. Plakanın son kısmı ise açık bir devredir. Her iki ucunda da R_1 ve R_2 kesintisiz empedans vardır. Karakteristik empedanstan ötürü yine 50 ohm'a uyum göstermek zorundadır. Bu tip demet pozisyon algılayıcılarında arka arkaya gelen sinyallerin süperpozisyon oluşturmasını önlemek amacı ile demet paketçik uzunluğu, şerit plakalarından kısa olmalıdır (Jolly 2004).

Demet hattından geçen elektron paketçığının oluşturduğu görüntü yükü Şerit plakasında yük ayrımına neden olur. Pozitif yük plakanın iç tarafında toplanır ve BPM' den geçerken gerçek demeti izler. Negatif yük ise iki farklı yol izler: yarısı alt plakada ilerlerken diğer yarısı demet hattı boyunca ilerler.



Şekil 2.13 Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısının elektrik devresi

Şekil 2.13'de Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısının Şerit plakasından demetin geçişi anlatılmaktadır. Şekil 2.15a'da, $t=0$ anı, demet paketçığının port 1'e ulaştığı andır. Demet paketçığının oluşturduğu görüntü yükü kaynak olarak davranır. Geçen akım voltaj bölücü ile ikiye ayrılır. Sinyalin yarısı port 1'e gider diğer yarısı ise Şerit boyunca ilerler. Şekil 2.14b, $0 < t < l/c$ anıdır. Bu sırada demet paketçığı port 2'ye ulaşır ve böylece görüntü yükü Şerit plakadan ayrılmış olur. Bu esnada eşit fakat zıt

yüklü akım kaynağı oluşur. Bu akım R_2 direnci ile ikiye ayrılır. Üst portda oluşturulan ters işarete sahip yansıyan sinyalin yarısı port 1’de oluşan ilk sinyali yok eder, yansıyan sinyalin diğer yarısı ise port 1’e geri gelir (Forck 2011).

Şerit tipi demet pozisyon algılayıcısının tepkisinin frekans bağımlılığı şu şekilde verilir:

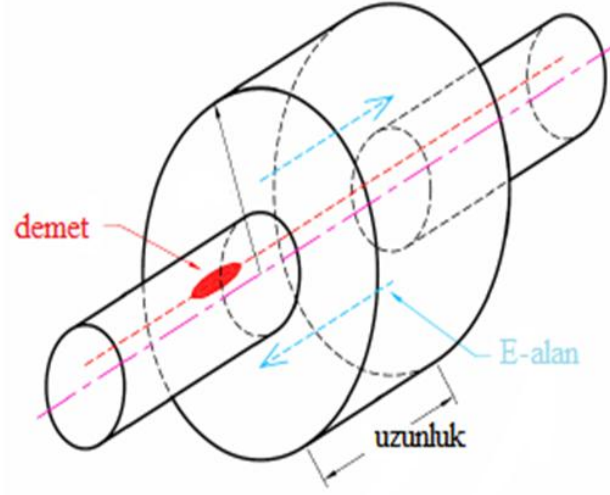
$$V_0 \propto \left| \sin\left(\frac{2\pi fl}{c}\right) \right| \quad (2.26)$$

Sinyallerin üstüste binmemesi için, bu durum $2 \times$ şerit uzunluğu/c ($2l/c$) sürede gerçekleşir. Burada l , plakalarının uzunluğu, c ise ışık hızıdır. Plakaların uzunluğu sinyallerin üstüste binmemesi durumu göz önüne alınarak seçilir. Böylece bipolar bir sinyalin iki tepe noktası Şerit plakasının uzunluğuna eşit olmalıdır. Eşitlik 2.27 ile verilen denklemde paketçik frekansının katları kullanılarak optimum uzunluk belirlenir. β , paketçik hızıdır. f_{acc} sistemin hızlandırma frekansıdır.

$$L_{şerit} = \frac{c}{2f_{acc}} \times \frac{\beta}{1+\beta} \quad (2.27)$$

2.5.3 Kavite tipi demet pozisyon algılayıcıları

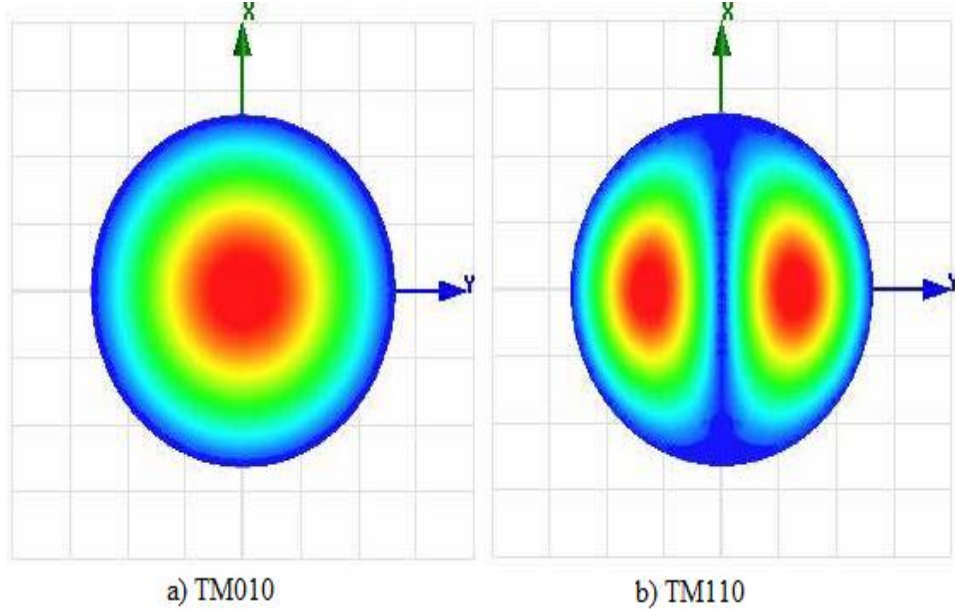
Kavite tipi demet pozisyon algılayıcıları, demet pozisyonun ölçümünde kullanılan daha yeni ve geliştirilmeye açık tekniktir. Bu teknikte algılayıcı, bazı frekanslarda rezonans sağlayan dalga kılavuzları içermektedir. Çalışma prensibi diğer iki tip demet



Şekil 2.14 Bir kavite BPM geometrisi

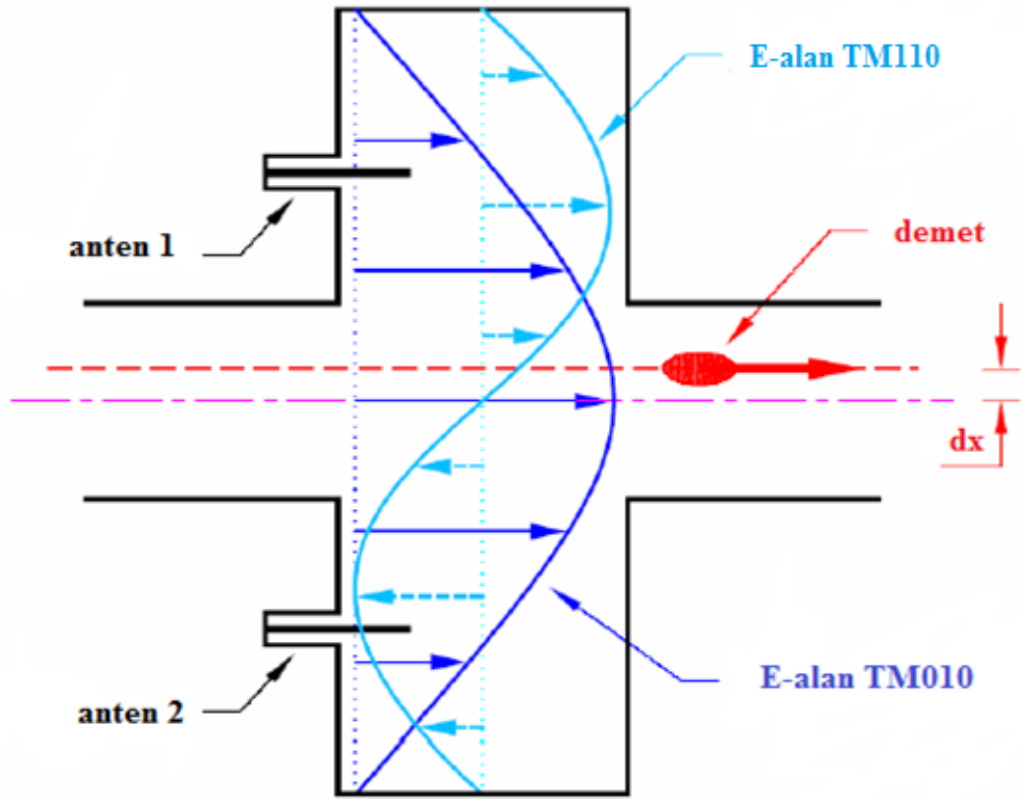
pozisyon algılayıcılarından daha farklıdır. Buton tipi ve Şerit tipi pozisyon algılayıcılarında plakalarda oluşan anlık potansiyel farkının ölçümü yapılırken, kavite tipinde hareketli paketçiğin indüklediği elektromanyetik alan kullanılır. Şekil 2.14 ile genel olarak bir kavite BPM geometrisi verilmiştir.

İndüklenen elektromanyetik alanın bir kavite içerisindeki davranışı dalga kılavuzları ile aynıdır. Demet paketçiği kaviteden geçerken, demetin elektrik alanı yüksek frekanslı bir dalga üretir. Birçok olası uyarılma modu vardır. Demetin pozisyonun ölçülmesinde iki önemli mod öne çıkmaktadır. Bunlar; TM_{010} monopol modu ve TM_{110} dipol modu. Şekil 2.15’de bu modların kavitedeki uyarılmaları görülmektedir. Şekil 2.16’da ise kaviteden geçen demet için TM_{010} ve TM_{110} modları görülmektedir.



Şekil 2.15 Kavitedeki elektron demeti uayrılmaları: a. TM010 modu için, b. TM110 modu için (Forno 2011)

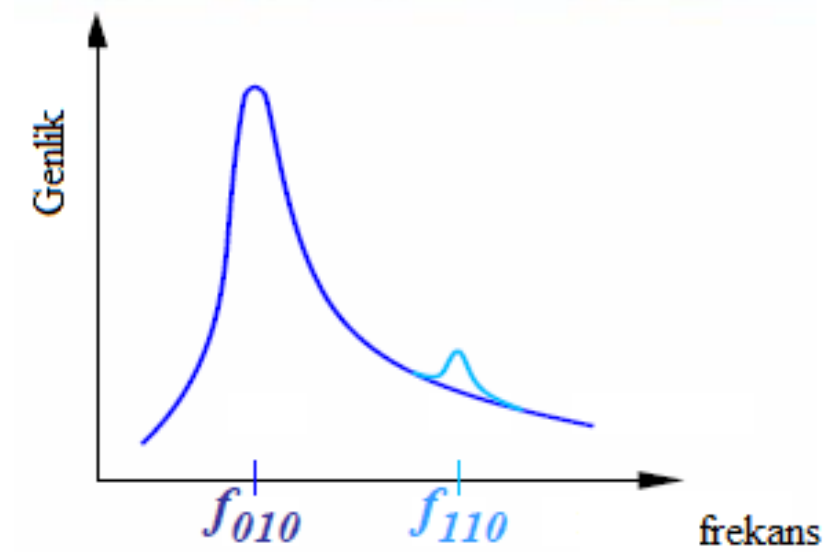
Kavite içerisinde demet paketçisi tarafından oluşan temel mod monopol moddur. Monopol mod sadece demetin şiddeti ile orantılıdır ve demetin pozisyonu ile bir bağımlılık göstermez. Bu yüzden demetin pozisyonunu ölçmek için dipol mod seçilir (Forno 2011).



Şekil 2.16 Dipol (TM110) ve monopol (TM010) için elektrik alan dağılımı (Jolly 2004)

Dipol modun değeri demet kavitenin merkezinde iken sıfırdır. Buna karşılık demet kavite merkezinde iken monopol mod çok daha güçlüdür. Bu durumda demet merkezde iken dipol mod yok sayılırken, demet merkezden sapma gösterdiğinde monopol mod yok sayılır (Swinson 2010).

Şekil 2.17’de iki farklı mod için elektron demetinin spektrumu verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi demet kavitenin merkezinde iken dipol mod yok sayılabilmektedir.



Şekil 2.17 Kavite tipi BPM' in şematik frekans spektrumu

Kavite tipi demet pozisyon algılayıcıları maliyeti yüksek algılayıcılardır. Ancak kavite tarafından üretilen dipol mod sinyali sayesinde pozisyon çözünürlüğü buton ve şerit tipi algılayıcılara göre daha iyidir. TARLA tesisinde özellikle hızlandırıcı modüllerinden sonra kavite tipi BPM' lerin kullanılması gerekmektedir.

2.5.4 Demet pozisyon algılayıcılarının karşılaştırılması

Demet pozisyon algılayıcılarının en önemli karakteristikleri pozisyon ve zaman hassasiyetidir. Pozisyon hassasiyeti demetin merkezden en küçük bir sapmasının ölçülebilmesidir. Zaman hassasiyeti ise algılayıcının bir sonraki demet paketçisini okuyabilmek için kendini hazırlayabilmesidir. Demet pozisyon algılayıcıları, farklı demet özelliklerini karşılayacak şekilde, ihtiyaca göre kullanılır (Sargasyan 2004) .

Button tipi demet pozisyon algılayıcıları; tasarımı ve kullanımı en basit pozisyon algılayıcı tipidir. Boyutları birkaç mm den birkaç cm'ye kadar değişir. Şerit tiplerine göre daha iyi bir çözünürlüğe sahiptir. Yaklaşık 100 nm'ye kadar çözünürlüğe sahiptir.

Yüksek akımlarda daha iyi sonuç verir. Çıkış güçleri fazladır. Basit bir mekanizmaya sahip oldukları için maliyetleri düşüktür (Soby 2007).

Şerit tipi demet pozisyon algılayıcıları buton tiplerine göre daha büyük ebatlara sahiptir. Yaklaşık 20- 30 cm boyutları vardır. Zaman çözünürlüğü çok iyi değildir. Genellikle düşük akımlar için kullanılırlar. Çıkış güçleri buton tiplerine göre daha azdır (Soby 2007).

Kavite tipi demet pozisyon algılayıcıları buton ve şerit tipi algılayıcılara göre farklı bir çalışma prensibine sahiptir. Şerit ve buton tipi algılayıcılarda kullanılan elektrotların yerini burada RF antenler almaktadır. Dipol mod sinyali kullanıldığı için bir tek demet paketçisi için nm aralığında yüksek çözünürlüğe sahiptirler ve yaklaşık 1 nA düşük sürekli (cw) modda düşük akımlar için kullanılır. Kilo ohm ($k\Omega$) mertebesinde yüksek transfer empedansına olanak sağlar. TM110 ve TM010 temel modları için genlik paketçik yükü veya akım ile orantılıdır. Ancak yanıt süresi diğer algılayıcılara göre daha yavaş olmaktadır. Bunun nedeni ise sinyallerin dar bantlı olmasıdır. Kavite BPM' in kullanım spektrumu daha genişse de maliyeti diğer algılayıcılara göre oldukça fazladır (Lorenz, 1998). Çizelge 2.2'de buton, şerit ve kavite tipi demet pozisyon algılayıcıların karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 2.2 BPM'lerin karşılaştırılması

Tipi	Kullanıldığı yerler		Avantajları	Dezavantajları
Buton tipi	p-linak e-linak	$f_{rf} > 10$ MHz	Mekanizması basit	Doğrusal değil, sinyal bozulması olabiliyor
Şerit tipi	Çarpıştırıcılar p-linak e-linak	$\beta \approx 1$ Kısa paketçikler	Temiz sinyal	Kompleks bir mekanizma
Kavite tipi	e-linak	Kısa paketçikler Özel uygulamalar	Hassas	Çok kompleks

2.6 Demet Pozisyon Algılayıcılarında Sinyal İşleme Elektronikleri

Demet pozisyon algılayıcılarının bir hızlandırıcı içerisindeki temel görevi demetin demet hattı içerisindeki konumunu belirleyerek demette sapma var ise demeti düzelten cihazlara bilgi vermektir. Burada amaç, demetin demet hattına zarar vermesini engellemektir.

Buton ve Şerit tipi algılayıcılarda yatay ve dikey olarak karşılıklı elektrotlardan alınan voltaj değerleri karşılaştırılır. Karşılıklı algılayıcılardan alınan sinyaller aynı şekilde kalibre edildikten sonra işlenmelidir (Ruf 2009).

Demet pozisyon algılayıcılarından alınan normalize pozisyon sinyali genel olarak üç farklı yöntemle işlenebilir. Bunlar; toplam- fark ile sinyal işleme (difference-over-sum processing), genlik- faz dönüşümü ile sinyal işleme (amplitude to phase conversion - AM / PM) ve logaritmik oran ile sinyal işleme (log- ratio processing) olarak adlandırılır. Her üç yönteminde birbirlerine göre üstünlükleri bulunmaktadır.

2.6.1 Toplam – fark yöntemi ile sinyal işleme

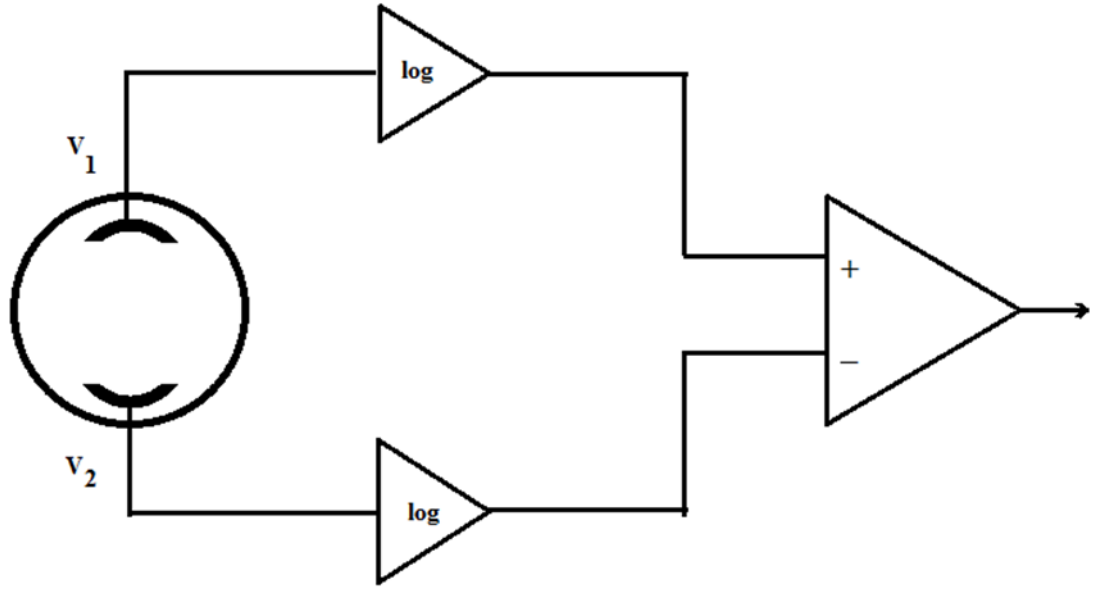
Toplam- fark yöntemi ile sinyal işleme metodu, demet pozisyonunun belirlenmesinde hem donanımsal hem de yazılımsal olarak kolaylık sağlamaktadır. Burada karşılıklı antenlerden alınan sinyallerin toplamının farklarına oranı bir eksenindeki demet pozisyonunu verir. En basit yöntemdir ve bu nedenle çok tercih edilen yöntemdir. Her bir antenden alınan sinyaller demetin pozisyonu, antenin geometrik yapısı ve empedansı ile ilgilidir. Eşitlik 2.28 ile verilen formül kullanılarak karşılıklı antenlerden alınan sinyaller işlenir.

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} = \frac{4 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) x}{\varphi b} + \text{yüksek mertebeli terimler} \quad (2.26)$$

Burada V ile verilen karşılıklı antenlerden alınan voltaj sinyalleridir. φ elektrodun genişliği, b demet hattının yarıçapı, x ise demet pozisyonudur (Kwon 2013).

2.6.2 Logaritmik oransal yöntemi ile sinyal işleme

Diğer bir sinyal işleme metodu logaritmik oran ile sinyal işleme metodudur. Şekil 2.18’de logaritmik oran ile sinyal işleme yönteminin elektronik devresinin blok gösterimi verilmiştir. Bu yöntem ile logaritmik yükselteçler kullanılarak büyük bir dinamik aralığa ulaşılabilmektedir. Yani küçük sinyaller daha büyük bir etki ile yükseltilmektedir. Logaritmik yükselteçten alınan çıkış sinyalde ki gürültünün azaltılması için düşük frekans geçiren filtre kullanılır. Birçok uygulamada düşük frekans geçiren kesilim frekansı tipik olarak MHz mertebesinde ve her demet paketçiği gözlenmez (Forck 2011).



Şekil 2.18 Logaritmik oransal yöntemi ile sinyal işleme

Bu elektronik sinyal işleme için demet pozisyonu x ekseninde şu şekilde verilir:

$$x = \frac{1}{S_x} (\log V_1 - \log V_2) = \frac{1}{S_x} \log \frac{V_1}{V_2} \quad (2.29)$$

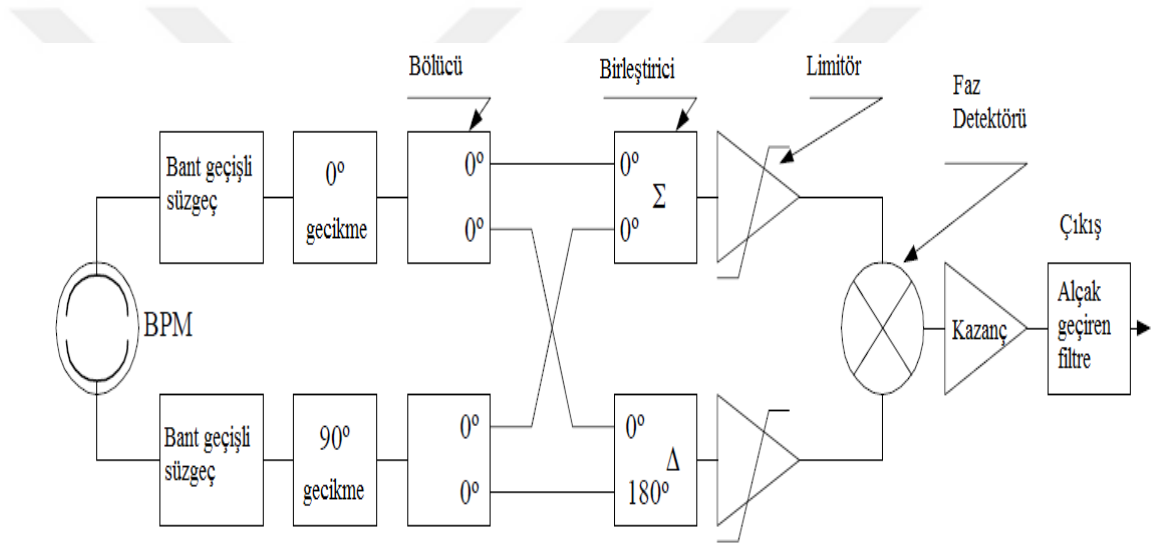
Burada S_x pozisyon hassasiyetidir. Logaritmik oran ile sinyal işleme yöntemi kazanç anahtarlama olmadan büyük dinamik aralıkta ucuz ve sağlam bir elektronik gerçekleştirmeye olanak sağlamaktadır. Aynı şekilde S_y y ekseninde pozisyon hassasiyeti olmak üzere, bu ekseninde elektronik sinyal işleme için demet pozisyonu şu şekilde verilir:

$$y = \frac{1}{S_y} (\log V_3 - \log V_4) = \frac{1}{S_y} \log \frac{V_3}{V_4} \quad (2.30)$$

V_3 ve V_4 ise y ekseninde konumlandırılmış karşılıklı iki antenden alınan potansiyeldir.

2.6.3 Genlik- faz dönüşümü yöntemi ile sinyal işleme

Genlik faz dönüşümü tekniği frekans bağımlı ve kısa atmalı zaman bağımlı alanlarda RF sinyalleri için geliştirilmiştir. Karşılıklı antenlerden alınan sinyal farkları genlik-faz (AM/PM) modülasyonu ile faz farkına dönüştürülür. Bu durumda genlik bağımlılığı olmaz ancak şiddet bilgilerinde kayıplar olur (Vismara 2000). Pratik olarak dönüşüm 90° hibrit bileşke ile gerçekleştirilir. Bir çıkış portuna 90° gecikme uygulanır. Sinyaller dört parçaya bölünür ve birleştirilir. Plakalardan alınan sinyallerin genlik farkı burada faz farkına dönüştürülür. Faz detektörü, demetin pozisyonu ile orantılı çıkış voltajı üretir.



Şekil 2.19 Genlik – faz dönüşümü yöntemi ile sinyal işleme

Şekil 2.19’da genlik – faz dönüşümü ile sinyal işleme yönteminin blok gösterimi verilmiştir. Bu yöntem ile küçük demet yerdeğiştirmelerinde diğer sinyal işleme yöntemlerine göre daha güvenilir pozisyon ölçümü sağlamaktadır. Tam demet yerdeğiştirme aralığı zayıflatıcı/ yükseltici veya geri besleme devreleri olmadan demet şiddetinde büyük dinamik aralık (> 40 dB) sağlar (Wendt 2001).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

“Makro ve Mikro Atmalı Elektron Demetleri İçin Demet Pozisyon Algılayıcıları Tasarımı” konulu tez çalışmasında hızlandırıcılara dayalı ışıınım kaynakları, demet teşhisi ve demet pozisyon algılayıcıları konulu kaynak kitaplar ve yayınlanmış makaleler incelenmiştir. Dünyada çalışır durumda olan hızlandırıcılarda demet pozisyonu, demet akımı, demet profili gibi demet özelliklerini ölçmede kullanılan demet algılayıcıların yapısı incelenmiştir. Bu alanda yapılan araştırmalar ve kullanılan yöntemler laboratuvarların internet sayfalarından, uluslararası hızlandırıcı konferansları ve çalıştaylarında yapılan sunumlardan ve karşılıklı temaslardan yararlanılarak incelenmiştir.

Çalışmalar neticesinde elde edilen bilgiler ve gerekli yazılımlar ihtiyaç duyulan demet algılayıcılarının tasarımında kullanılmıştır. Simülasyonlarda lisanslı olarak mevcut olan CST (Comouter Simulation Technology) paket programı kullanılmıştır. Elde edilen verilerin grafik üzerine dökülmesinde ve hesaplamalarda Mathematica 5.0, ve OrijinPro 7.5 paket programları kullanılmıştır.

3.2 Yöntem

Demet pozisyon algılayıcılarının tasarımı yapılmadan önce kaynak kitap ve makalelerden yararlanılarak algılayıcıların fiziği ve türleri incelenmiştir. TARLA tesisinin elektron demeti parametreleri ile beraber değerlendirilerek demet hattında diyagnostik amaçlı kullanılacak demet pozisyon algılayıcı türleri belirlenmiştir. Farklı geometrilerde elektron demetinin elektromanyetik simülasyonu yapılarak optimum algılayıcı geometresi oluşturulmuştur.

Elektromanyetik simülasyon yapmak için CST Particle Studio programı kullanılmıştır. Bu program üç boyutlu elektromanyetik alanda yüklü parçacık dinamiğini doğru ve

hızlı bir şekilde analiz etmekte kullanılan yazılım paketidir. Yazılım farklı çözücü türlerine sahiptir. Parçacık izleme çözücüsü (particle tracking solver); statik bir alanda parçacığın davranışını modellemektedir. Göreli uygulamalarda ise zayıf alan çözücüsü (wakefield solver) kullanılır. Bu çözücü ile göreli hızlara sahip parçacıkların demet hattında oluşturduğu elektromanyetik alanı hesaplamaktadır. Bu çalışmada da zayıf alan çözücüsü ile tasarımı yapılan demet pozisyon algılayıcısından geçen göreli elektron demetinin analizi yapılmıştır. Ayrıca CST EM Studiosunun elektrosatetik çözücüsü kullanılarak da algılayıcıların kapasitans değerleri hesaplanmıştır.

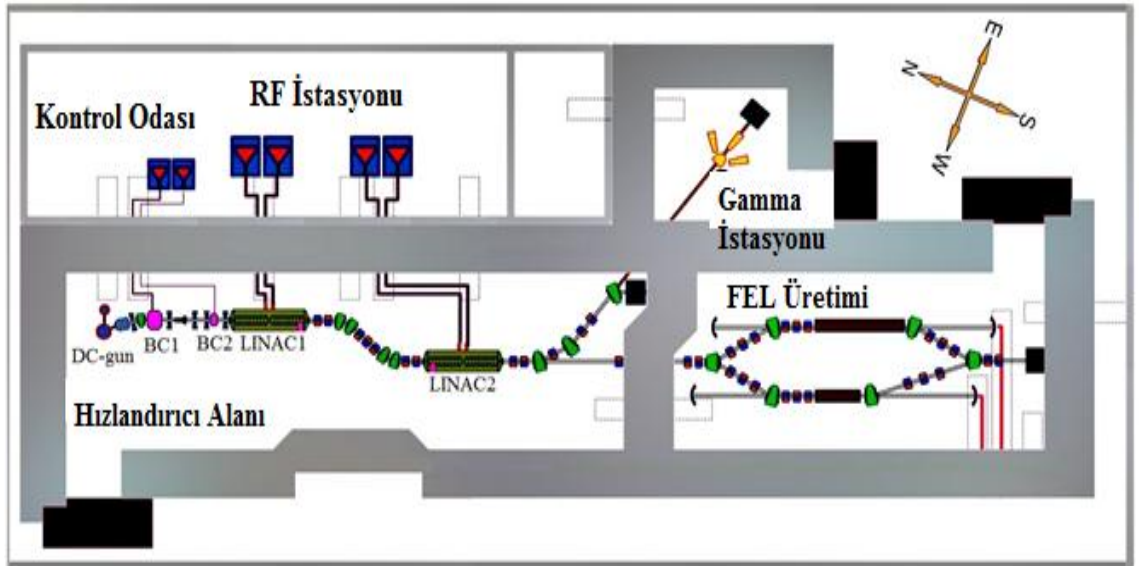
Simülasyon sonucunda üretilcek demet pozisyon algılayıcısının parametreleri belirlenmiştir. Üretim aşamasına geçilmeden buton BPM' in çizimleri üç boyutlu çizim programı olan Solid Works kullanılarak yapılmıştır. Katı çizimlerine ve CST ile yapılan çizimlere göre teknik resimleri oluşturulmuştur. Teknik resimlerde anten, gövde ve flanşlar gibi tüm parçaların ölçüleri ve üretim toleransları verilmiştir. Ayrıca mekanik üretim için istenilen sıcaklık aralığı ve üretilen parçaların akıma ve voltaja dayanıklılığı üretimi yapacak firmaya sunulmuştur. Mekanik üretim bu çizimlere göre gerçekleştirilmiştir ve herbir parça talep edilen malzemelerden, talep edilen boyutlarda ve talep edilen fiziki ortamda üretilmiştir. Mekanik üretim Ankara OSTİM' de bulunan Dora Makine Ltd. Şirketi tarafından yapılmıştır.

Üretim tamamlandıktan sonra BPM' in mekanik ve elektriksel testleri yapılmıştır. Bu testler TARLA tesisinde oluşturulan bir deney düzeneği ile yapılarak veriler kaydedilmiştir. Elde edilen verilerin işlenmesi ve grafik üzerine dökülmesi Mathematica 5.0, MathLab ve OrijinPro 7.5 paket programları ile gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR

4.1 TARLA Tesisi ve Tesisin BPM İhtiyacı

Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara (TARLA) tesisi Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi kapsamında kurulumu yapılan ilk hızlandırıcı ve ışınım kaynağı tesisidir. TARLA tesisi kapsamında 15- 40 MeV enerjili elektron demeti ve 25 mm ve 90 mm periyot uzunluklu salındırıcı kullanılarak 3-250 mikron dalga boyu aralığında kırmızı altı serbest elektron lazeri ve frenleme ışınımı (Bremsstrahlung) elde edilmesi öngörülmektedir. Elde edilen serbest elektron lazeri, 5 farklı deney istasyonunda araştırma amacıyla kullanılacaktır. Ayrıca tesiste aynı hızlandırıcıya dayalı bir de frenleme ışınımı (Bremstrahlung) deney istasyonu kurulmaktadır. Bu deney istasyonunun da nükleer spektroskopi çalışmalarının yapılması planlanmaktadır. Şekil 4.1’de TARLA tesisin donanım yerleşim olanı görülmektedir. Tesis temel olarak üç ana bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler; Elektron Hızlandırıcısı bölgesi, Serbest Elektron Lazeri ve Frenleme Işınımı Üretimi bölgesi ve Deney İstasyonları bölgesidir (Aksoy 2014).



Şekil 4.1 TARLA Tesisinin şematik gösterimi (TARLA TDR V2, 2015)

Şekil 4.1’de gösterilen elektron hızlandırıcısı bölgesinde elektron kaynağı olarak 250 keV enerjili çalışan bir DC termiyonik tabanca kullanılmıştır. Enjektör sistemi normal iletken teknolojiye dayalı 260 MHz ve 1.3 GHz’de çalışan iki paketleyiciden oluşmaktadır (Aksoy 2008). Ana hızlandırıcı ise her biri iki 9 hücreli TESLA süperiletken kaviteden oluşan iki ELBE (Electron Linac for beams with high Brilliance and low Emittance) modülü içermektedir. Bu modüller 1 mA demet akımında çalışabilecek ve sürekli demet sağlayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Modüllerin arasında konumlanmış manyetik paket sıkıştırma sistemi bulunmaktadır. Serbest Elektron Lazeri (SEL) ve Frenleme Işınımı üretim bölgesinde ise 3-250 mikron dalgaboyu aralığına sahip SEL üretimi amacı ile 90 mm ve 25 mm periyot uzunluğuna sahip salındırıcılar ve maksimum 35 MeV enerjili frenleme ışınımı üretimi için ışınlayıcı () bulunmaktadır. Demet hattının en önemli özelliği maksimum enerjide minimum paket boyunun böylelikle maksimum pik akımının elde edilmesidir. Çizelge 4.1’de TARLA tesisinin elektron demet parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.1 TARLA’ nın elektron demeti parametreleri

Demet enerjisi (MeV)	15 – 40
Paketçik yükü (pC)	77
Paketçik uzunluğu (ps)	0.5 – 5
Paketçik tekrarlama frekansı (ns)	77
Normalize boyuna emittans (mm.mrad)	<12
Normalize enine emittans (mm mrad)	<15
Makro atma tekrarlama frekansı (Hz)	10- CW
Makro atma süresi (µs)	40- CW
Ortalama akım (mA)	1

SEL deney istasyonları bölgesinde ise SEL diyagnostik odasının yanı sıra 4 adet kullanıcı istasyonu yer almaktadır. Bu istasyonlarda malzeme bilimi, lazer ve optik bilimi, atom ve molekül fiziği, biyoteknoloji, medikal fizik, nanoteknoloji, dedektör aşamaları, foto-kimya ve foto-jeoloji gibi pek çok alanda AR-GE ve teknoloji geliştirme amaçlı çalışmalar yapılması öngörülmektedir.

Türk Hızlandırıcı Merkezi' nin ilk tesisi olarak kurulmakta olan TARLA tesisinde ilk elektron demeti elektron tabancası test laboratuvarında 11 Nisan 2013 tarihinde elde edilmiştir (www.tarla.org.tr.).

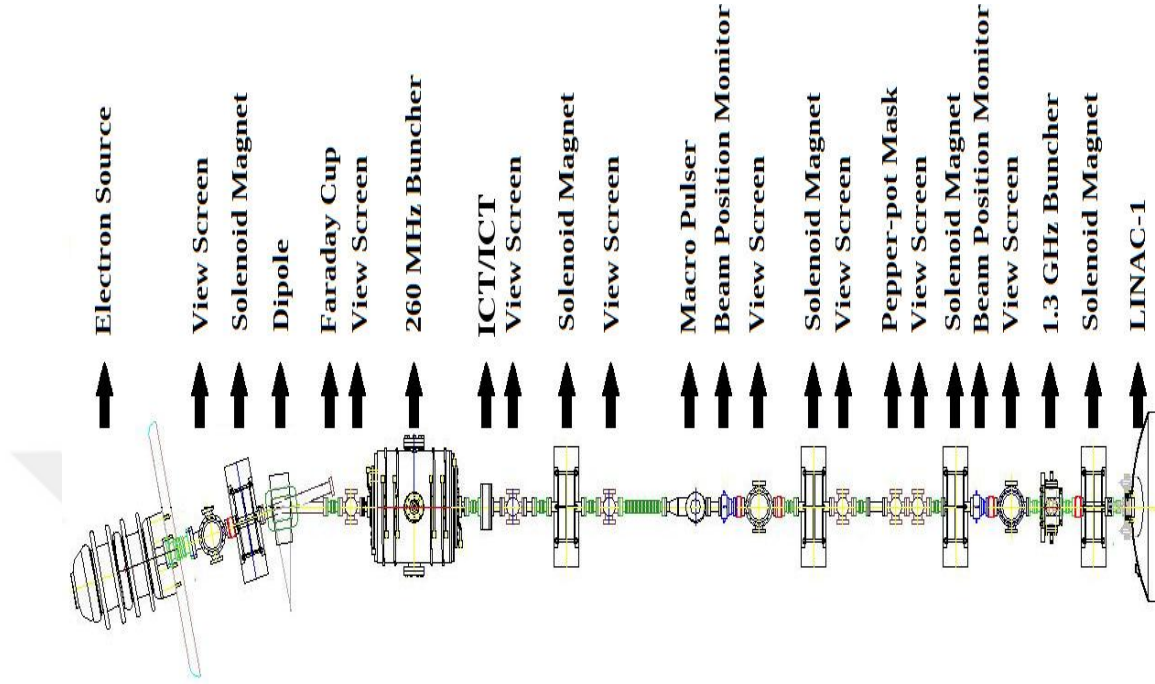
TARLA' nın demet diyagnostiği için ihtiyaç duyulan ve kullanılması öngörülen teşhis cihazları çizelge 4.2'de verilmiştir. Elektron demetinin teşhisi için hattın farklı yerlerinde 80'in üzerinde demet teşhis cihazı kullanılacaktır.

Çizelge 4.2 TARLA'da kullanılması öngörülen diagnostik cihazları (TARLA TDR V2, 2015)

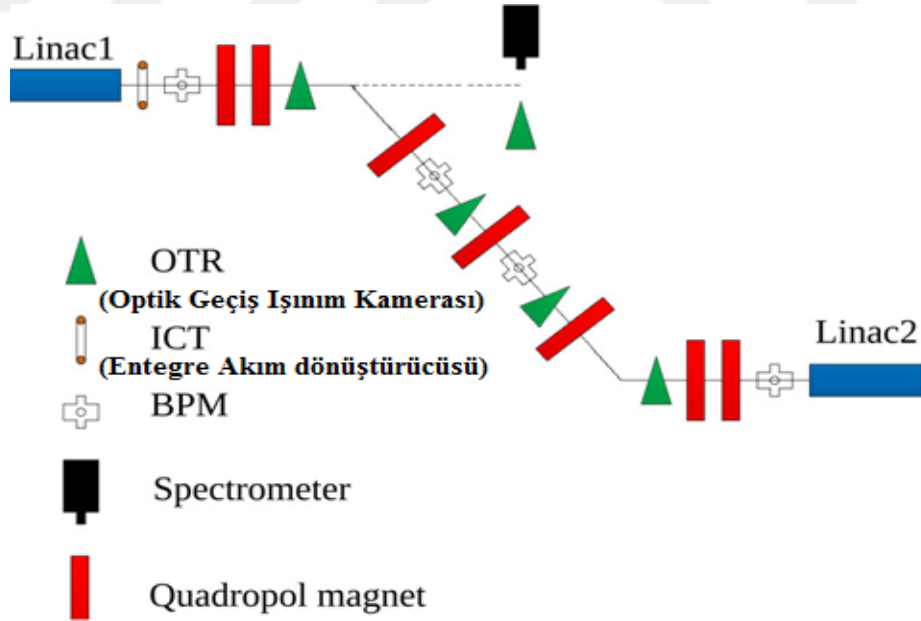
Cihaz	Yerleşimi	Adedi
BPM	Tüm iletim hattında	30
Sintilasyon ekranı	Enjektör hattında	5
Optik geçiş ışınımı ekranı	Tüm iletim hattında	31
Faraday kafesi	Enjektör hattında	1
Akım dönüştürücüler	Tüm iletim hattında	7
Enerji spektrometresi	1.ve 2. linaktan sonra	2
Demet kayıp monitörü	Tüm iletim hattında	10
İnterferometre	1. ve 2. linaktan sonra	2
Elektro optik örnekleme	2. linaktan sonra	2

Demet pozisyon monitörleri, parçacık hızlandırıcıları açısından demet diyagnostiği için hayati öneme sahip bileşenlerindendir. Monitörler genelde yüklü parçacığın hareketinden kaynaklanan elektrik ve manyetik alanın bir kısmını keserek, demet hattındaki demetin enine ve boyuna pozisyonunu ölçmek için kullanılır. TARLA tesisinde demetin pozisyonunun belirlenebilmesi amacı ile toplam 30 adet demet pozisyon algılayıcılarının kullanılması planlanmaktadır. İhtiyaca yönelik olarak belirlenen bu monitörlerin sayısında ve yönteminde kurulum ve test aşamasında teknolojinin gelişimine ve maliyete bağlı olarak değişiklikler olabilir. Sırası ile TARLA tesisi enjektör alanı BPM yerleşimi (Şekil 4.2), Linak-1 ve Linak-2 arası demet hattı BPM yerleşimi (Şekil 4.3), Linak-2 sonrası demet hattı BPM yerleşimi (Şekil 4.4),

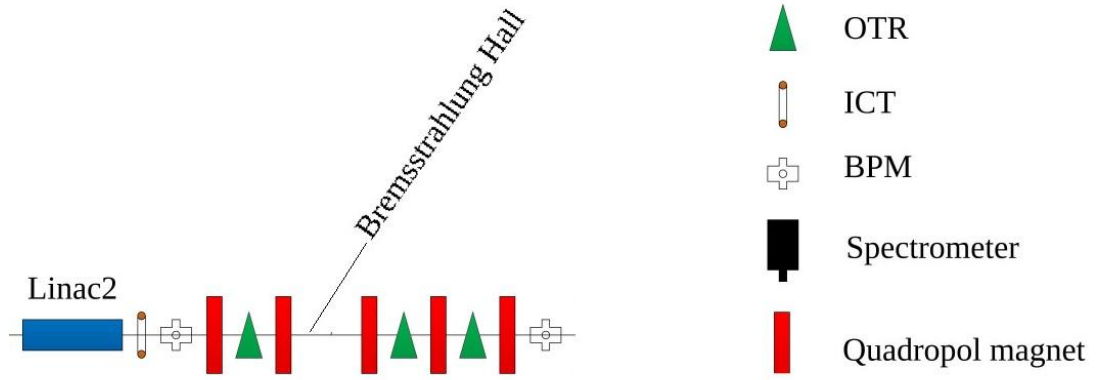
salındırıcı magnet öncesi (Şekil 4.5) ve sonrası (Şekil 4.6) BPM yerleşimi verilmiştir.



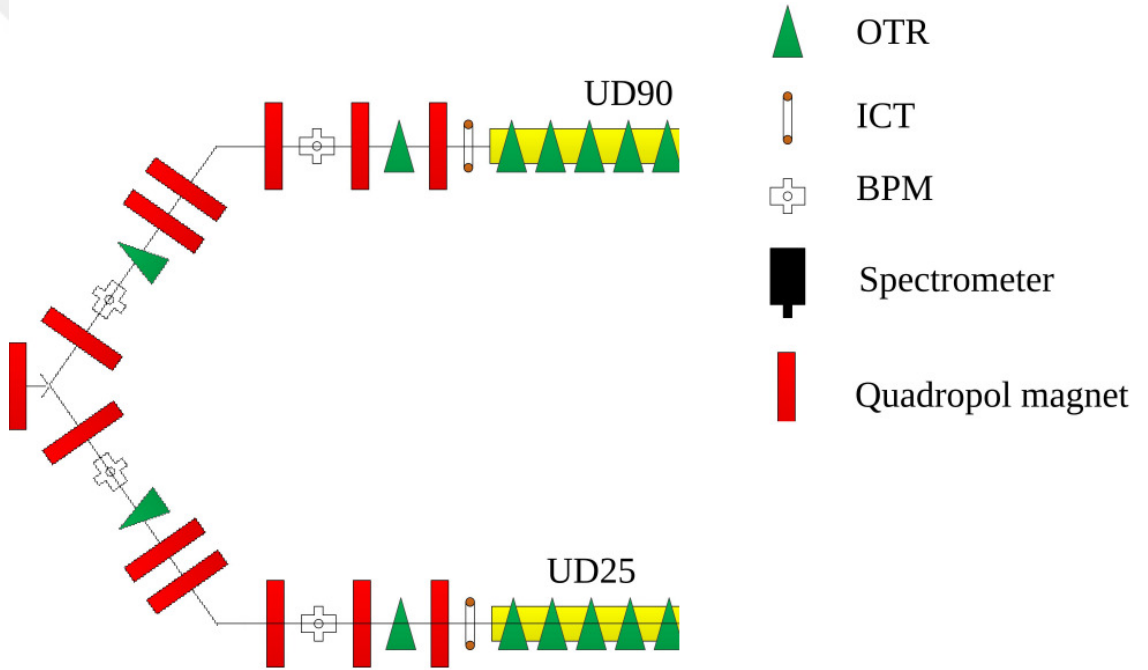
Şekil 4.2 TARLA enjektör alanı BPM yerleşim planı



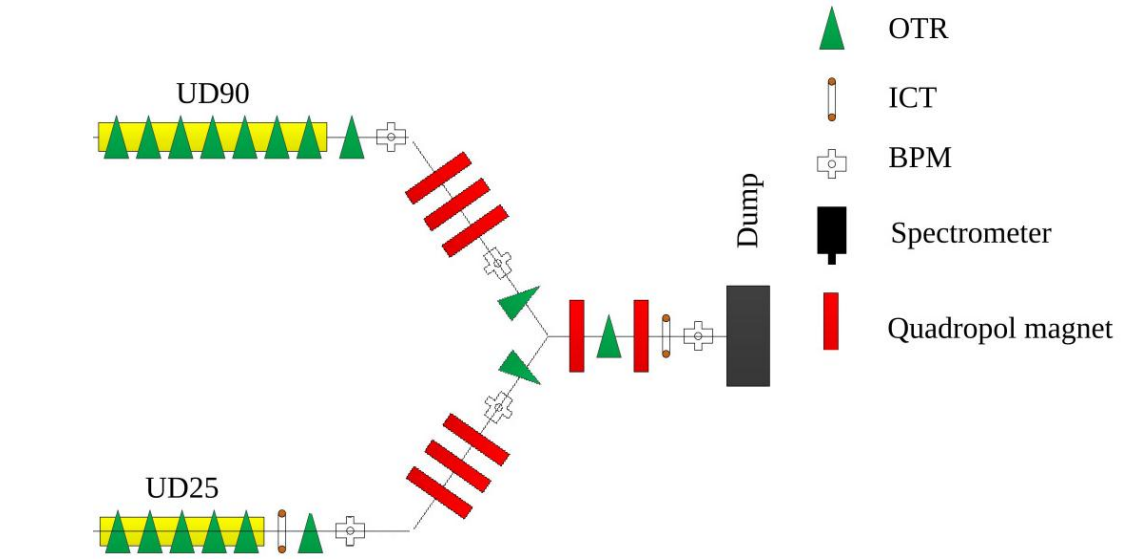
Şekil 4.3 TARLA'da linac-1 ve linac-2 arası demet hattı BPM yerleşim planı



Şekil 4.4 TARLA’da linak-2 sonrası demet hattı BPM yerleşim planı



Şekil 4.5 TARLA’da salındırıcı magnetler öncesi BPM yerleşim planı



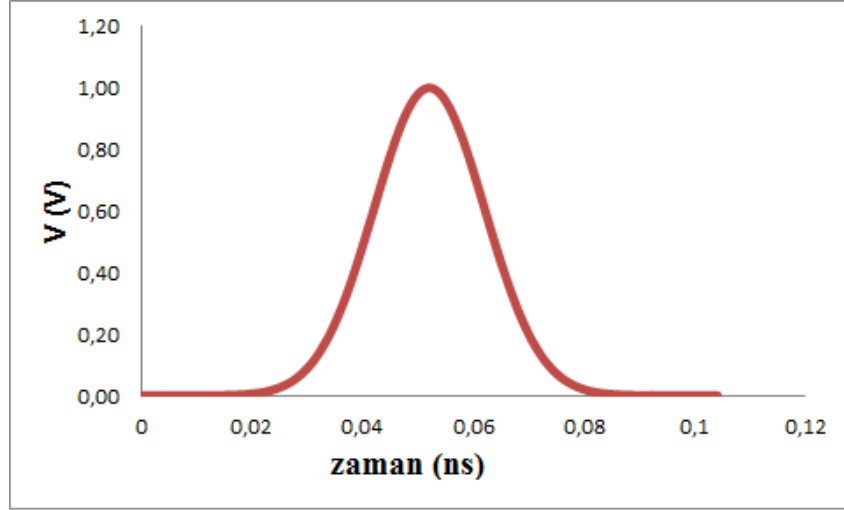
Şekil 4.6 TARLA'da salındırıcı magnetler sonrası BPM yerleşim planı

4.2 Buton Tipi BPM Çalışmaları

4.2.1 Buton tipi BPM tasarım çalışmaları

Buton tipi BPM ile demet pozisyon ölçümü demet hattı çevresine karşılıklı olarak yerleştirilmiş aynı geometriye, malzemeye ve ölçülere sahip eş elektrotlar kullanılarak yapılmaktadır. Bu çalışmada öncelikle TARLA elektron demetinin parametrelerine göre geometrisi belirlendi. Demetin zaman yapısı, sinyal şiddeti, hassasiyeti ve boyutu göz önüne alındı. Buton tipi BPM tasarımı çalışmalarında CST Particle Studio programı kullanıldı.

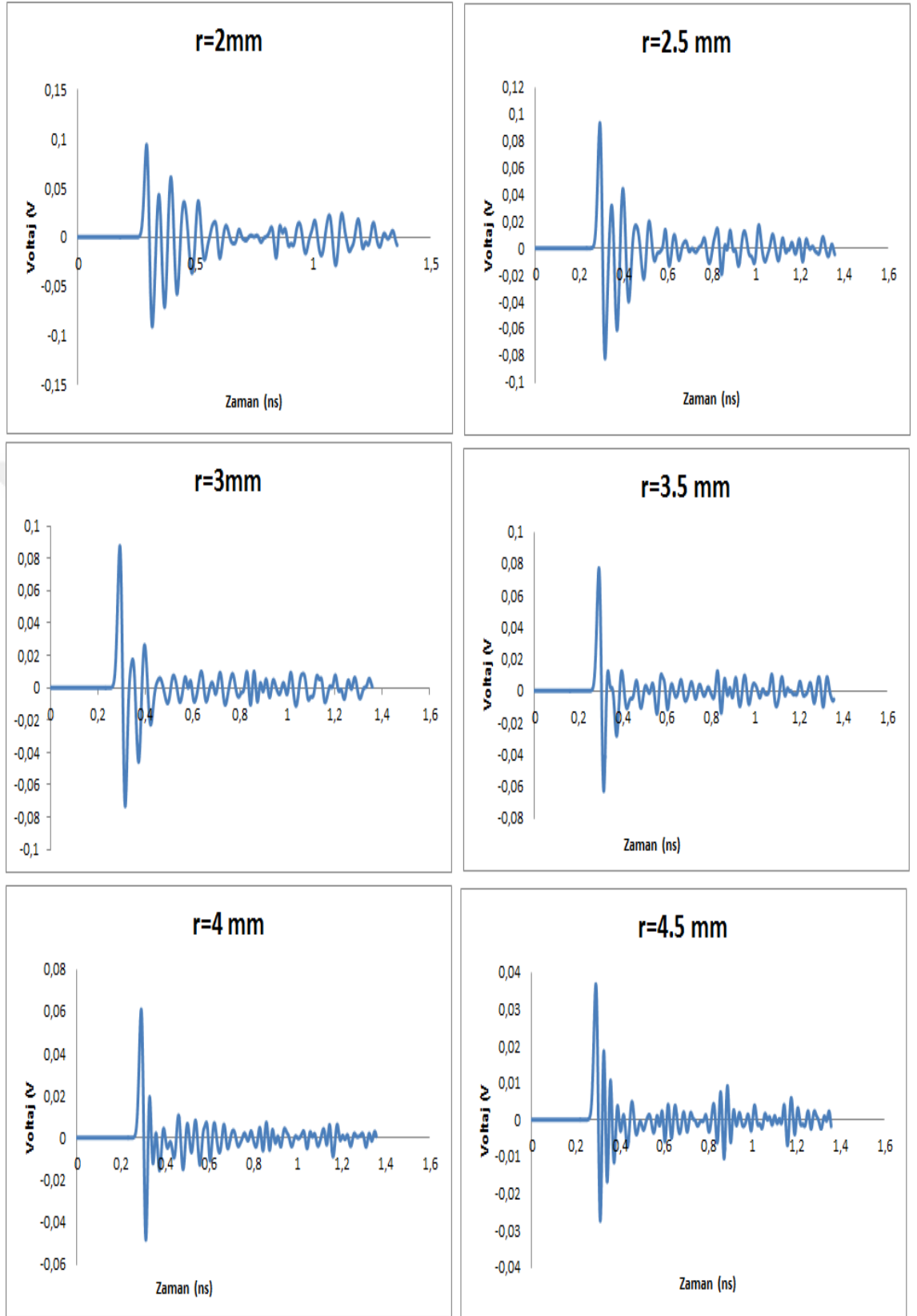
Simulasyonda, BPM içerisinden geçirilen tele gaussiyen bir sinyal uygulandı. Demetin yükü 1 pC, yarı maksimumda bant genişliği (σ) 3 mm olarak verildi. Elektron demeti 0.9999c'lik bir hıza sahiptir. TARLA tesisinde elektron tabancasından elde edilen elektron demetinin paketçik yükü 1-77 pC arasında ayarlanabilir. Simulasyonda 1 pC kullanılmasının nedeni BPM ile ölçülmesi beklenen en küçük paketçik yükünü ölçebilecek antenin yarıçapının belirlenmesidir. Şekil 4.7'de uygulanan giriş sinyali görülmektedir. Çıkış sinyalinin, giriş sinyalinin türevi olması beklenir.



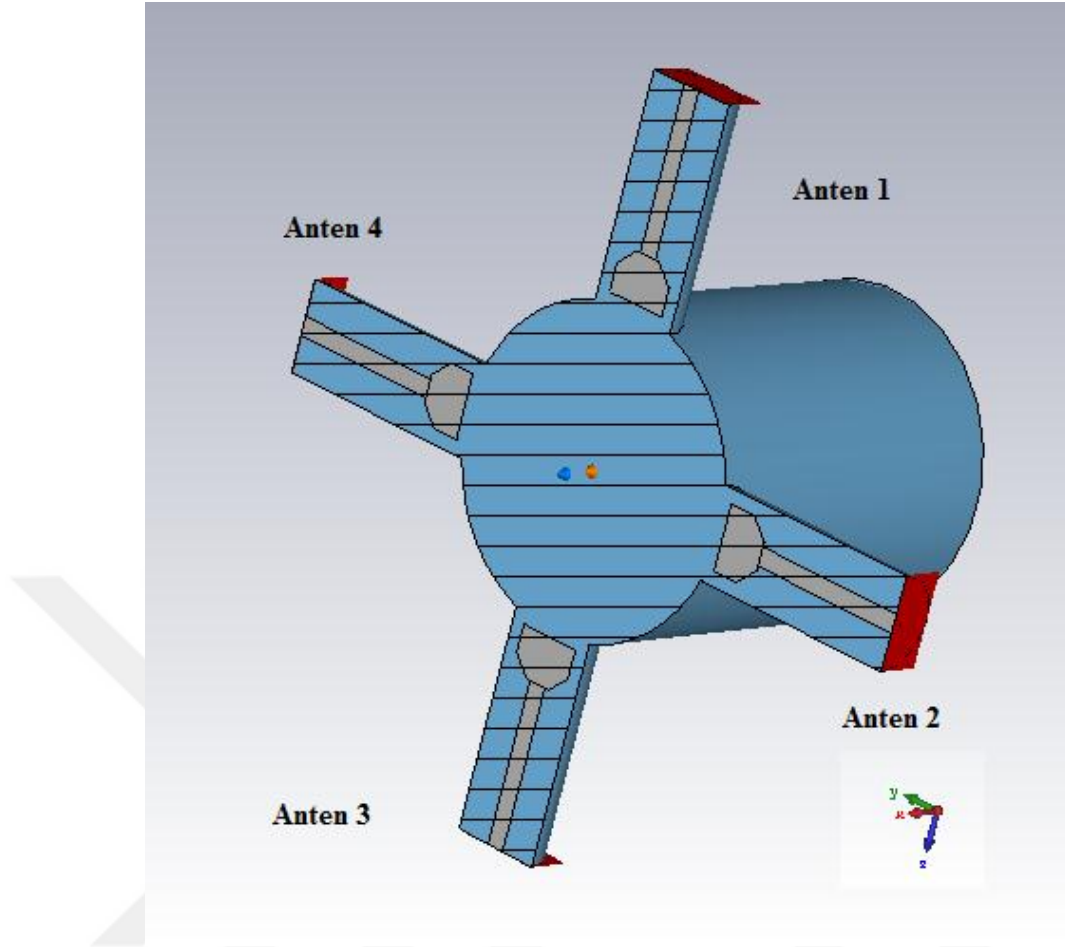
Şekil 4.7 BPM' e uygulanan sinyal ($q=1$ pC, $\sigma=3$ mm, $\beta=0.9999$)

Öncelikle kullanılacak antenlerin geometrilerini belirlenmek için farklı buton çaplarında anten simülasyonları yapılmıştır. Anten yarıçapı 2 mm'den 4.5 mm'ye kadar 0.5 mm aralıklarla değiştirilerek CST Particle Studio ile elde edilen çıkış sinyallerinin elde edildiği gözlemlendi. Elde edilen çıkış sinyalleri şekil 4.8'de verilmiştir.

Şekil 4.8'de küçük yarıçaplarda çıkış sinyalinde gürültünün daha çok olduğu görülmüştür. Antenden elde edilen sinyallerin düzgün olmaması, yani sinyallerin gürültülerinin ve dalgalanmaların çok olması sinyal kalitesini etkilemektedir. Bu durum, demet pozisyon ölçümünde hassasiyeti ve çözünürlüğü olumsuz etkilemektedir. Sinyallerin işlenmesini zorlaştıracaktır. Şekil 4.8'e göre yarıçapı 3.5 mm olan anten çıkışında daha kaliteli sinyal görülmektedir. Aynı zamanda yarıçapı 4 mm ve 4.5 mm olan antenlere göre daha yüksek genlikli sinyal elde edilmektedir. Bu doğrultuda tesiste yarıçapı 3.5 mm olan bir anten kullanılması öngörülmüştür. Yarıçapı 3.5 mm olan anten ile hem daha yüksek kalite de sinyal elde edilmekte hem de elde edilen sinyalin genliği daha büyük olmaktadır. Yarıçapı belirlenen karşılıklı yerleştirilmiş dört buton antenin CST Particle Studio ile çizimi şekil 4.9'de verilmiştir. Şekil butonların bir kesitini vermektedir. Karşılıklı iki buton arasındaki uzaklık 35 mm olarak belirlenmiştir. +x yönünde şekil 4.7 ile verilen sinyal uygulanmıştır.

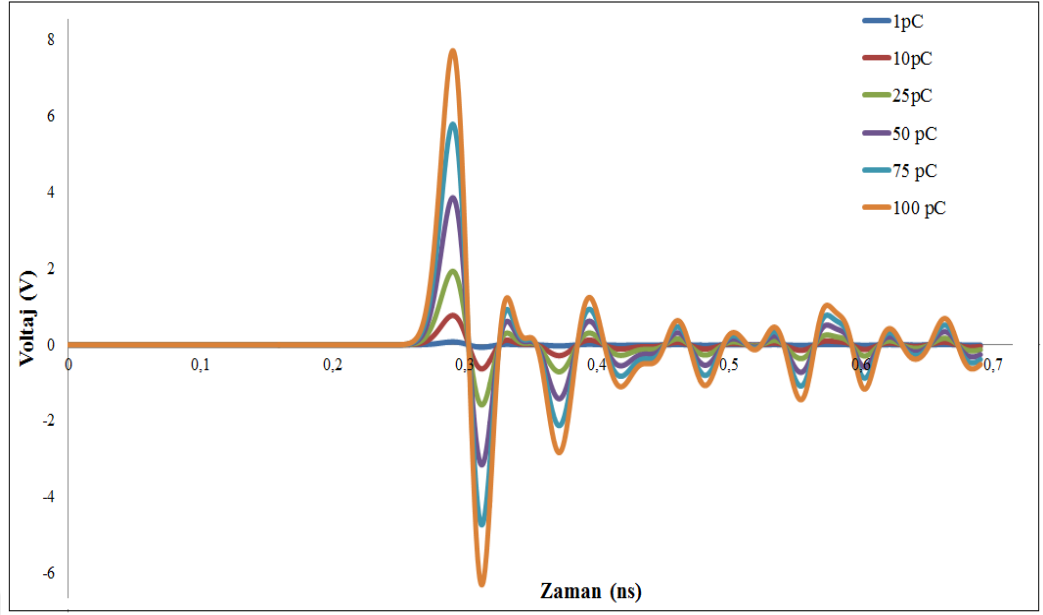


Şekil 4.8 Anten yarıçapına göre BPM çıkış sinyalleri



Şekil 4.9 Buton antenlerin CST ile gösterimi

TARLA tesisinin demet paketçiği, enjektör girişinde 500 ps, çıkışında 10 ps zaman yapısına sahiptir. İkinci lineer hızlandırıcı (linak) çıkışında ise elektron paketçiğinin zaman yapısı 0.4- 5 ps arasında değerlere kadar düşmektedir. Demet paketçik yükü ise 77 pC'dur. Tasarımı yapılan BPM' in bu paketçik yükünü ölçebilmesi gerekmektedir. 3.5 mm yarıçapa sahip anten için 1 pC ile 100 pC arası paketçik yüklerinin ölçümü yine CST Particle Studio kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.10'da değişen paketçik yüklerine karşı elde edilen çıkış sinyalleri verilmiştir.



Şekil 4.10 Farklı paketçik yüklerine göre karşı BPM çıkış sinyalleri

Şekil 4.10-4.11 ile verilen sinyaller için sinyal-gürültü oranı (SNR) hesaplanmıştır. Öncelikle Eşitlik 4.1 ile sinyal gücü P_s hesaplanmıştır. Eşitlikte A paketçik şekli için verilen sabit bir katsayıdır. Demet gaussiyen bir paketçik olduğu için A katsayısı 1 olarak alınmıştır. R, koaksiyel empedanstır. a; BPM' in iki anten arası uzaklığı ve r buton yarıçapıdır. f paketçik frekansı 13 MHz ve I ortalama akımı 1 mAdır.

$$P_s = \frac{2\pi^2 a^4}{r^2 \beta^2 c^2} R A^2 f^2 I^2 \quad (4.1)$$

Eşitlik 4.2 ile gürültü gücü P_n hesaplanmıştır. B; ölçülen bant genişliği (1 MHz), k_B ; Boltzman sabitidir. T ise sıcaklıktır ve 300 K olarak alınmıştır. Gürültü gücü -114 dBm olarak hesaplandı.

$$P_n = k_B T R B \quad (4.2)$$

Çizelge 4.3'de farklı buton yarıçapları için Eşitlik 4.3 ile hesaplanan sinyal gücü ve sinyal gürültü oranları verilmektedir.

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (4.3)$$

Çizelge 4.3 Farklı yarıçaplı butonlar için SNR oranları

r (mm)	P _s (dBm)	SNR (dB)
2	-60.05	53.95
2.5	-56.18	57.82
3	-53.01	60.99
3.5	-50.32	63.68
4	-48.01	65.99
4.5	-45.97	68.03

Çizelge 4.4’de farklı paketçik yükleri için SNR oranları verilmiştir. Buton çapı sabit tutularak 3.5 mm olarak alınmıştır.

Çizelge 4.4 Farklı paketçik yükleri için SNR oranları

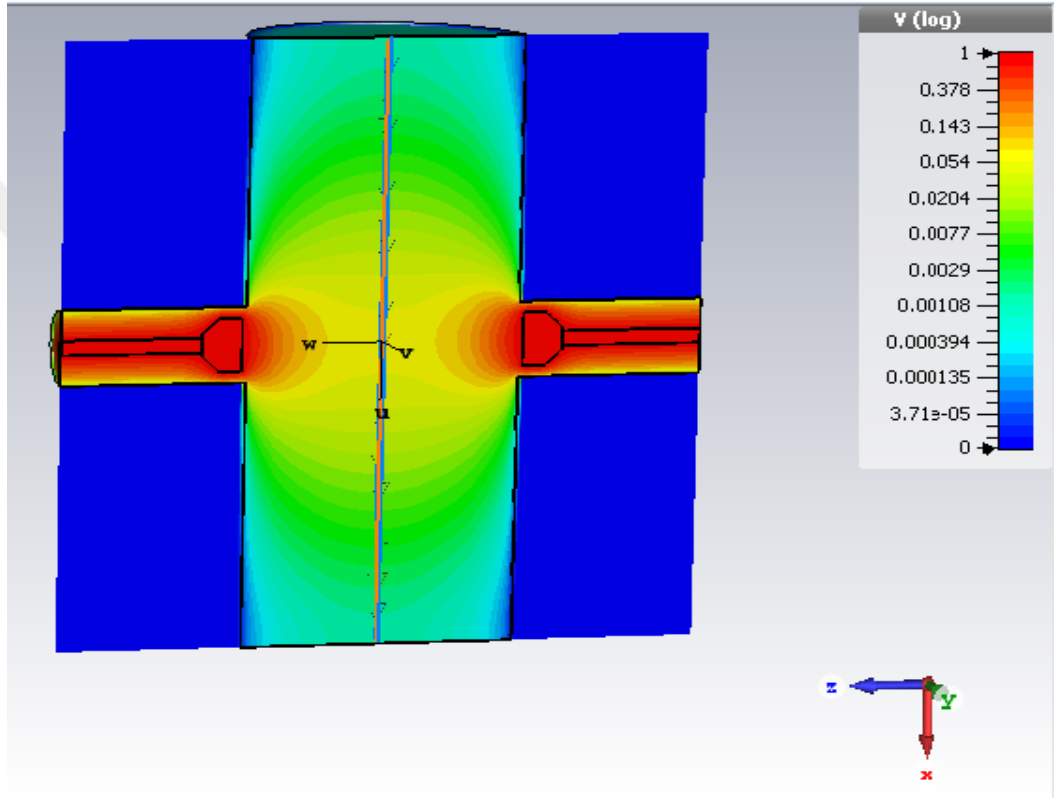
q (pC)	P _s (dBm)	SNR (dB)
1	-90.42	23.58
10	-70.42	43.58
25	-62.91	51.09
50	-56.88	57.12
75	-53.27	60.73
100	-50.42	63.58

Bir demet pozisyon algılayıcısı için hızlandırma frekansının ve paketçik uzunluğunun verilen frekans aralığı ile uyumlu olması gerektiği Bölüm 2’ de belirtilmişti. Eşitlik 2.14 transfer empedansının frekansa göre değişimini vermektedir. Bu değişimin hesaplanması için öncelikle buton BPM’ in kapasitans değeri belirlenmelidir.

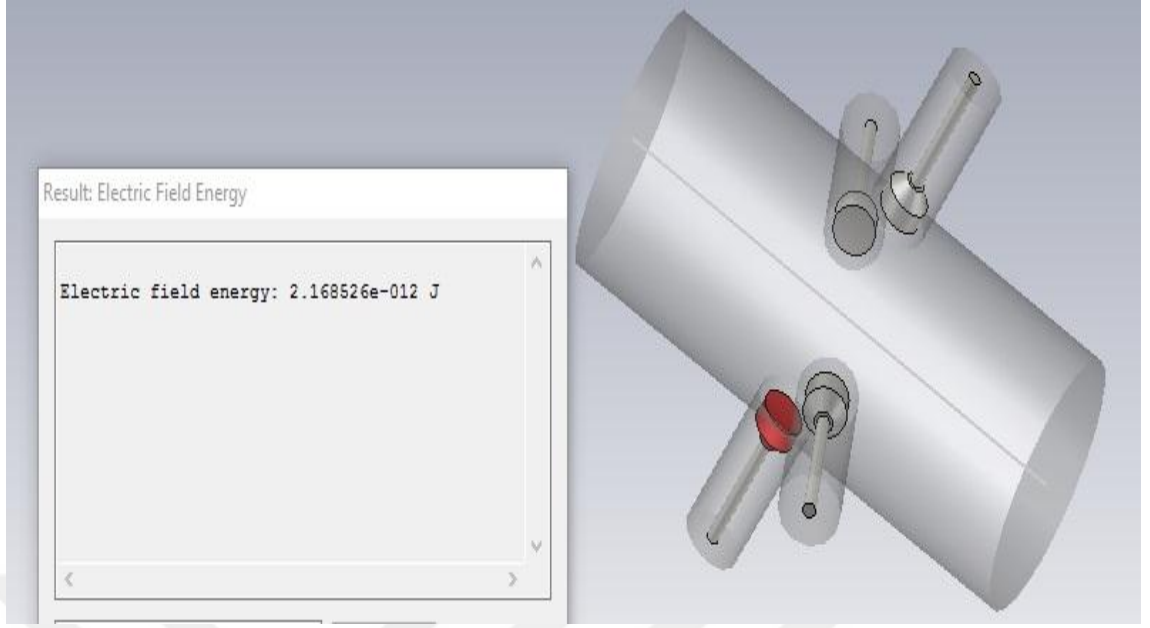
Boyutları belirlenen buton BPM’ in üretiminde gerekli olan kapasitans değeri Eşitlik 4.4 ile hesaplanmıştır. Bu hesabın yapılması için CST EM Studio kullanılarak elde edilen elektrik alan enerjisi (w) kullanılmıştır.

$$\omega = \frac{1}{2} CV^2 \quad (4.4)$$

3.5 mm yarıçapa sahip butonlara 1 V potansiyel uygulanmıştır. Butonlara uygulanan potansiyel şekil 4.11’de görülmektedir. Elektrik alan enerjisi w' nun verildiği CST EM Studio ekran görüntüsü ise şekil 4.12’de verilmiştir. Elde edilen elektrik alan enerjisi ve uygulanan potansiyel eşitlik 4.4’de kullanılarak buton BPM’ in kapasitansı hesaplanmıştır. 4.33 pF değerinde bir kapasitansın üretimimiz için yeterli olduğu hesaplanmıştır.

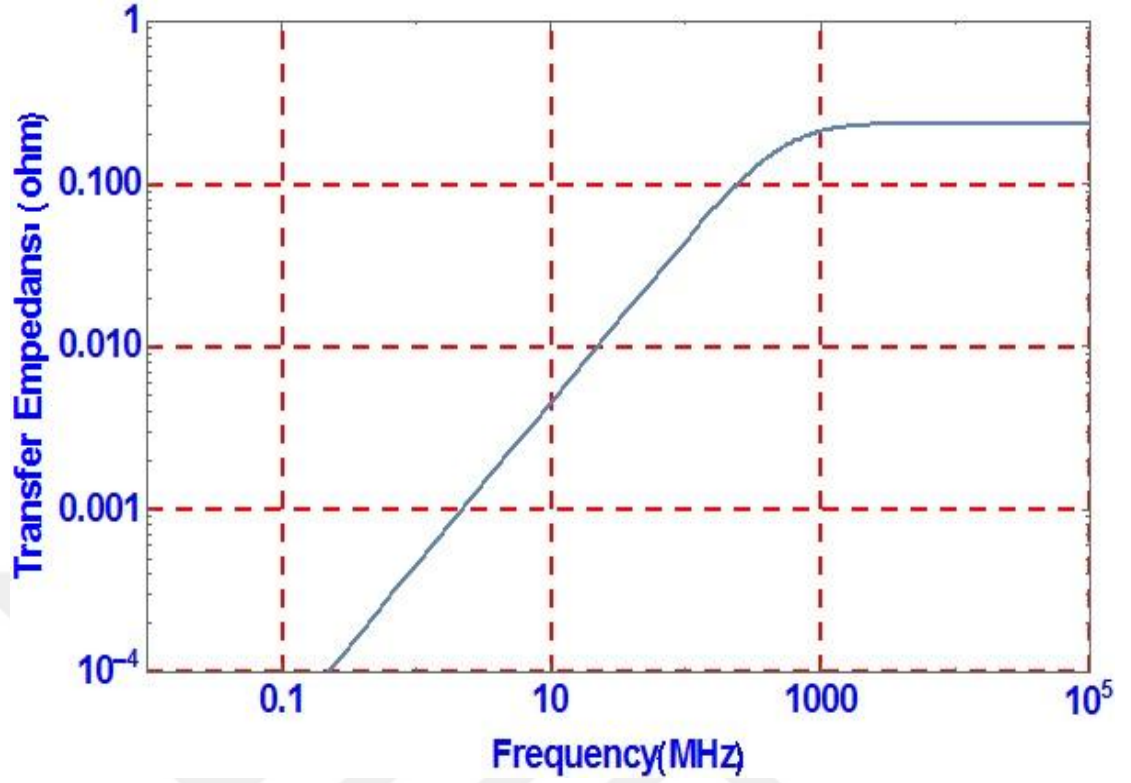


Şekil 4.11 Butonlara uygulanan 1 V potansiyelin dağılımı



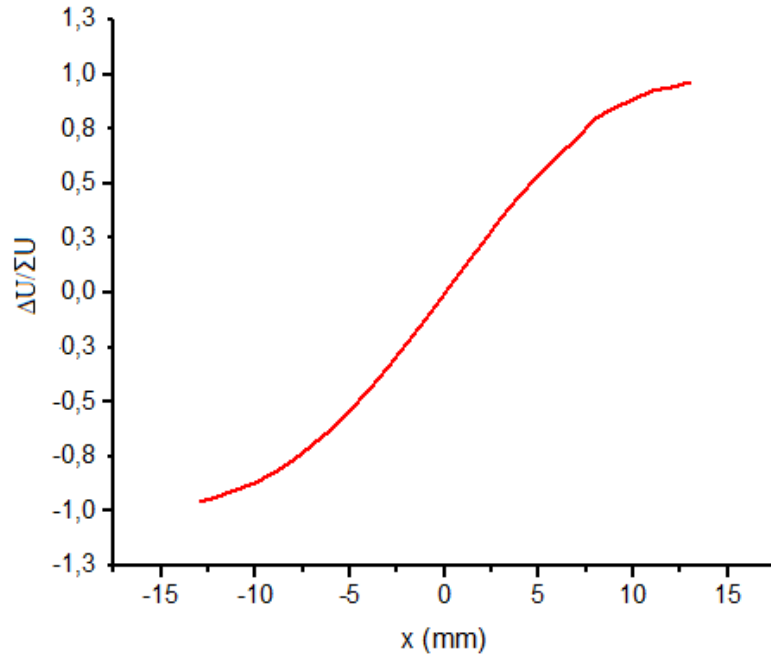
Şekil 4.12 CST EM Studio ile elektrik alan enerjisi ekran görüntüsü

Empedansın frekansa bağlı değişimi Eşitlik 2.19 kullanılarak Mathematica programı ile çizdirilmiştir. Parametreler buton tipi BPM için alınmıştır. Burada a demetin merkezden uzaklığı 17.5 mm, A buton kesit alanı; l ise buton çapıdır. Eşitlik 4.4 ile elde edilen kapasitans değeri kesilim frekansını vermektedir. $(2\pi RC)^{-1}$ ile kesilim frekansı yaklaşık 735 MHz olarak hesaplanmaktadır. Paketçik frekansı 13 MHz' dir. Paketçik frekansı kesilim frekansından çok çok küçük olduğu için, transfer empedansı genel bir kapasitif etkiye sahip olacak ve buton voltajı demet akımının türevi ile orantılı olacaktır. Buton kapasitansının artması, kesilim frekansı ile ters orantılı olduğu için, kesilim frekansının azalmasına sebep olur. Bununla birlikte transfer empedansı da azalacaktır (Eşitlik 2.19). Yani buton kapasitansının küçük olması daha yüksek bir buton voltajı oluşması anlamına gelmektedir. Şekil 4.13 ile frekansa karşı transfer empedansı grafiği verilmiştir. Paketçik frekansı 13 MHz' in kesilim frekansı 735 MHz'in çok çok altında olduğu görülmektedir.



Şekil 4.13 Transfer empedansının frekansa göre davranışı (Eşitlik 2.14)

Demetin BPM içerisinde konumunu belirlemek için demet pozisyon hassasiyeti belirlenmelidir. Bu nedenle CST Particle Studio ile demetin farklı pozisyonlarda simülasyonu yapıldı. Bunun için BPM' in içerisinde geçen sinyalin pozisyonu x ekseninde -13 mm ile +13 mm arasında 1 mm aralıklar ile değiştirilerek simülasyonu yapıldı ve karşılıklı antenlerden CST ile elde edilen çıkış sinyalleri kaydedildi. Karşılıklı antenlerden elde edilen voltajların farkının toplamına oranı kullanılarak $\Delta U/\Sigma U$ hesaplandı. Demetin x eksenindeki pozisyon değiştirmesine karşı $\Delta U/\Sigma U$ ' nun grafiği elde edildi. Bu grafik şekil 4.14'de görülmektedir.

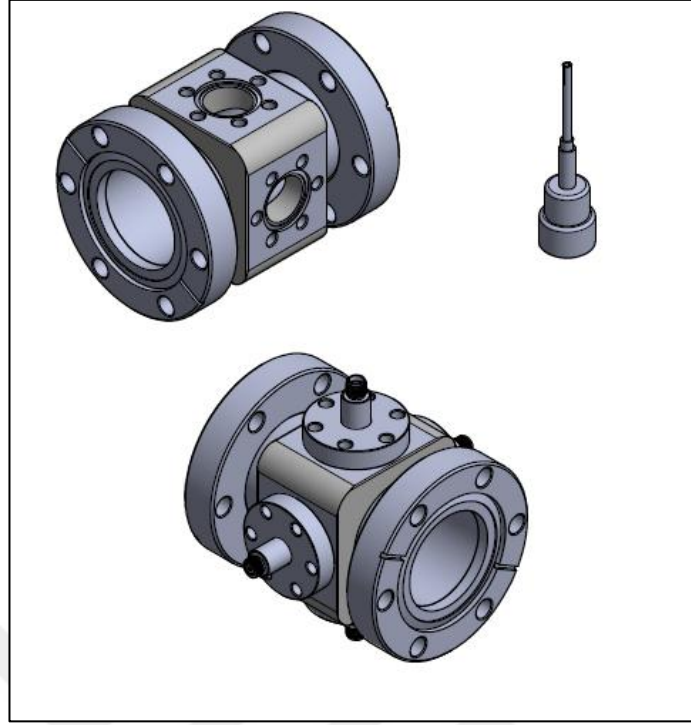


Şekil 4.14 Demetin pozisyon değiştirmesine karşı $\Delta U/\Sigma U$ oranı

Bu grafiğin lineer olan kısmının eğimi pozisyon hassasiyetini vermektedir. Pozisyon hassasiyeti 110 dB/mm olarak hesaplanmıştır. Pozisyon hassasiyeti, pozisyon çözünlüğü ile ilişkilidir ve uzunluk başına düşen sinyal şiddetini vermektedir.

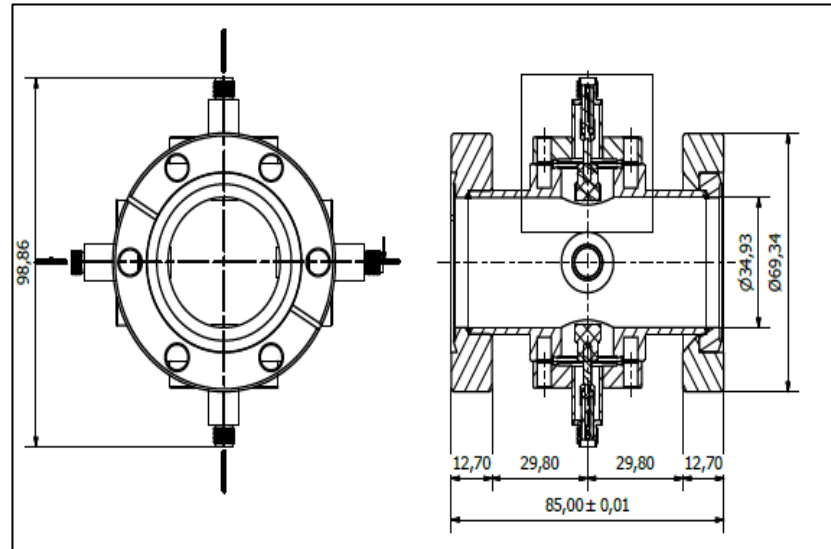
4.2.2 Buton tipi BPM üretim çalışmaları

CST ile yapılan simülasyonlar ile BPM' in boyutları ve parametreleri belirlendi. Ölçüleri belirlendikten sonra teknik çizimleri yapılmıştır. Üretilen 35 mm yarıçaplı BPM; bir gövdeden, 4 antenden ve CF16 ve CF 40 türünde iki adet flanştan oluşmaktadır. Demet hattı 40 mm olduğu için karşılıklı antenler arası uzaklık 35 mm olarak seçilmiştir. BPM' in demet hattına montajı için 5 mm' lik bir pay bırakılmıştır. Şekil 4.16' da buton tipi BPM' in antenin gövdesinin, antenin ve tüm BPM' in Solid Works kullanılarak yapılan üç boyutlu çizimi verilmiştir. Bu teknik çizimlere dayanılarak üretim aşamasına geçilmiştir. Bu çizimler göz önünde tutularak üretimi yapılan ana gövde, anten ve flanşlar ultra-yüksek vakum altında birleştirilmişlerdir.



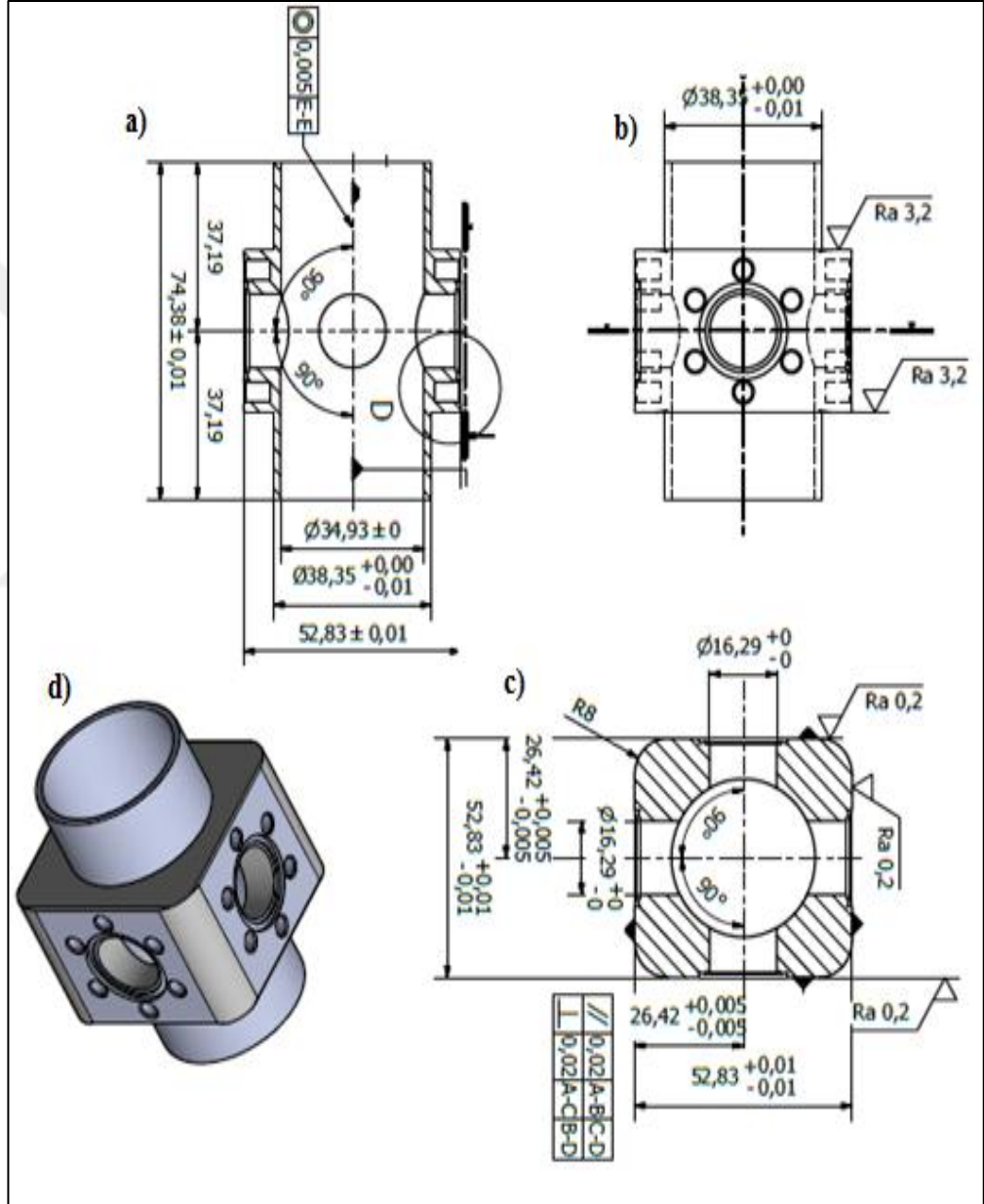
Şekil 4.15 BPM gövde ve antenin üç boyutlu çizimi

Şekil 4.16’de BPM’ in sırası ile önden ve yandan görünümü teknik çizim olarak verilmiştir. Ölçüler mm olarak verilmiştir.



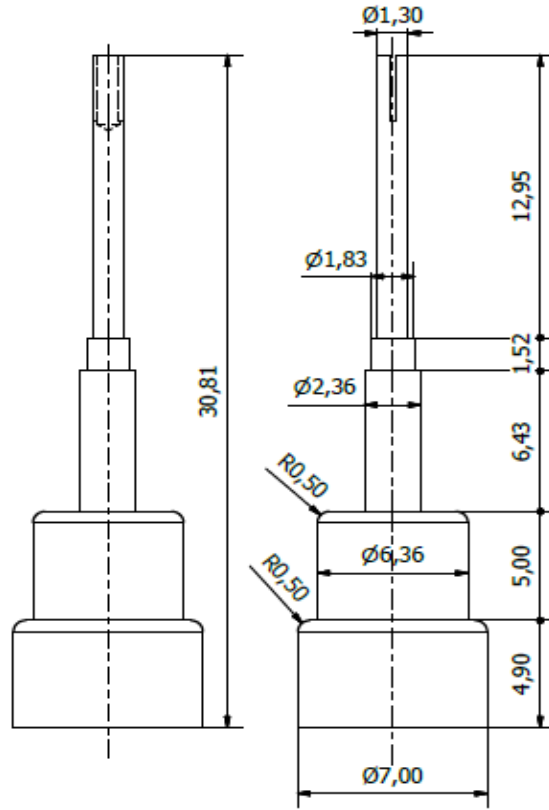
Şekil 4.16 BPM’ in önden ve yandan kesit çizimleri

Gövde, AISI 316 paslanmaz çelikten yapılmıştır. Bu paslanmaz çelik türü, paslanmaz çeliğin içerisine molibden ve daha fazla nikel eklenerek elde edilmiş bir paslanmaz çelik türüdür. 316 paslanmaz çeliğin korozyona dayanımı sert koşullu ortamlarda üst düzeydedir. Kolay kaynak yapılabilmesi özelliği bulunmaktadır. Şekil 4.17’de gövdenin önden, üstten ve izometri görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.17 BPM gövdesinin a) önden kesiti, b) önden, c) üstten d) izometri görüntüsü ve ölçüleri

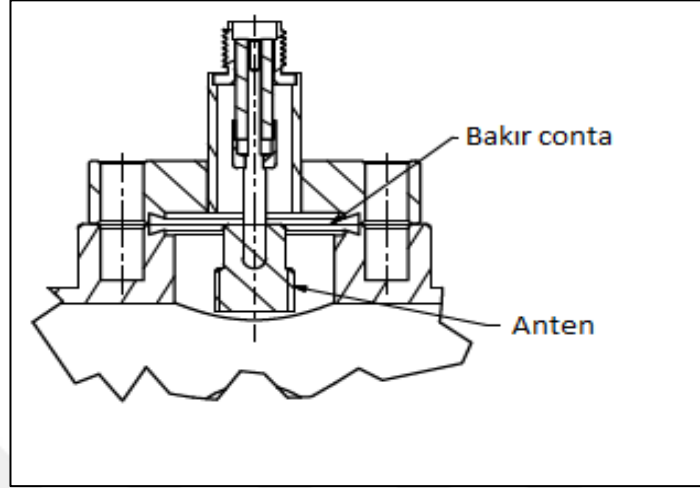
Şekl 4.18’de ise BPM antenlerinin teknik çizimi ölçüler yine mm olacak şekilde verilmiştir. Antenler, bakırdan yapılarak üzeri altın kaplanmıştır. Bakır en iyi iletken malzemedir. Ancak altına göre daha kolay okside olduğundan dolayı kolay korozyona uğrar. Bu durum antenlerin performansının kısa sürede azalmasına neden olur. Bu nedenle antenlerin ömrü daha uzun olsun diye altın ile kaplanmıştır. Bu bakır antenlerin üretimi Türkiye’ de yapılamaktadır. Antenlerin üretimi için gerekli toleranslar Türkiye’ de sağlanamadığı için antenler Amerika’ da yerleşik MDC Vacuum firmasında üretilmiştir.



Şekil 4.18 BPM anteninin teknik çizimi

Üretim Ankara OSTİM Organize Sanayi Bölgesinde bulunan DORA Makine Ltd. firması tarafından yapılmıştır. Üretimi yapılan bütün malzemeler için helyum kaçak oranı 1×10^{-10} mbar. Lt/s’ dan daha düşük olarak tespit edilmiştir. Bütün kaynaklar Tungsten Inert Gas (TIG) kaynağı ile yapılmıştır. Böylelikle kaynak dikişlerinde boşluk kalmamıştır. Antenin ana gövdeye montajı yapılırken şekil 4.19’da gösterildiği gibi bakır conta kullanılmıştır. Bu conta, birleşme yerlerinde oluşacak kaçak oranını

azaltmak için kullanılır. Diğer bir taraftan; bakır, ısınmanın etkisi ile genişecek ve anten ve gövde arasında daha sıkı bir conta görevi görecektir.



Şekil 4.19 BPM anteninin gövdeye montajı

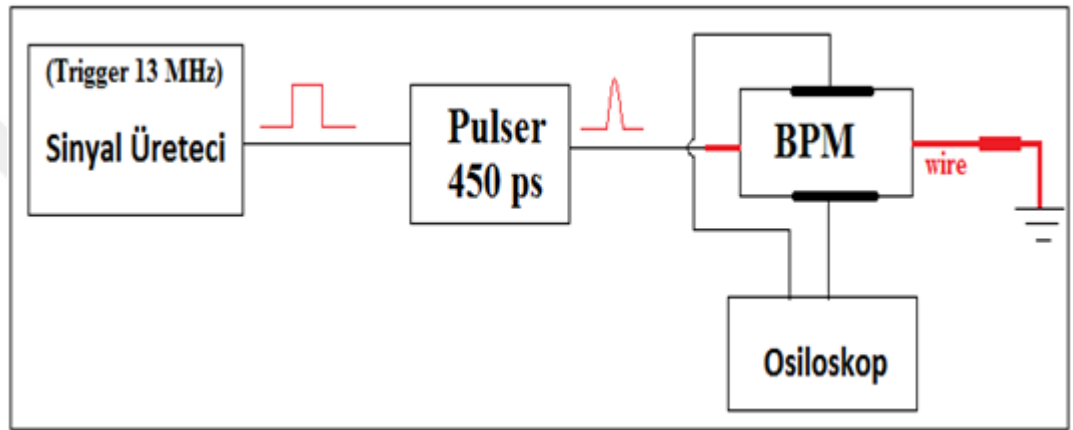
Üretim yapılırken, üretilen parçaların 1A akıma ve 700 V DC gerilime dayanıklı olması sağlandı. Üretim esnasında sıcaklık -200 °C ile 450 °C aralığındadır. Hava tarafı konnektörü çalışma aralığı ise -65 °C ile 165 °C olarak belirlenmiştir. Yüksek frekans sinyal iletkenliği ez an 1 GHz' dir. İzolasyon malzemesi alüminyum oksit seramik olacaktır. Vakum çalışma aralığı 1×10^{-10} Torr olarak belirlenmiştir. Üretim özellikleri çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 BPM anten ve gövdesinin üretim özellikleri

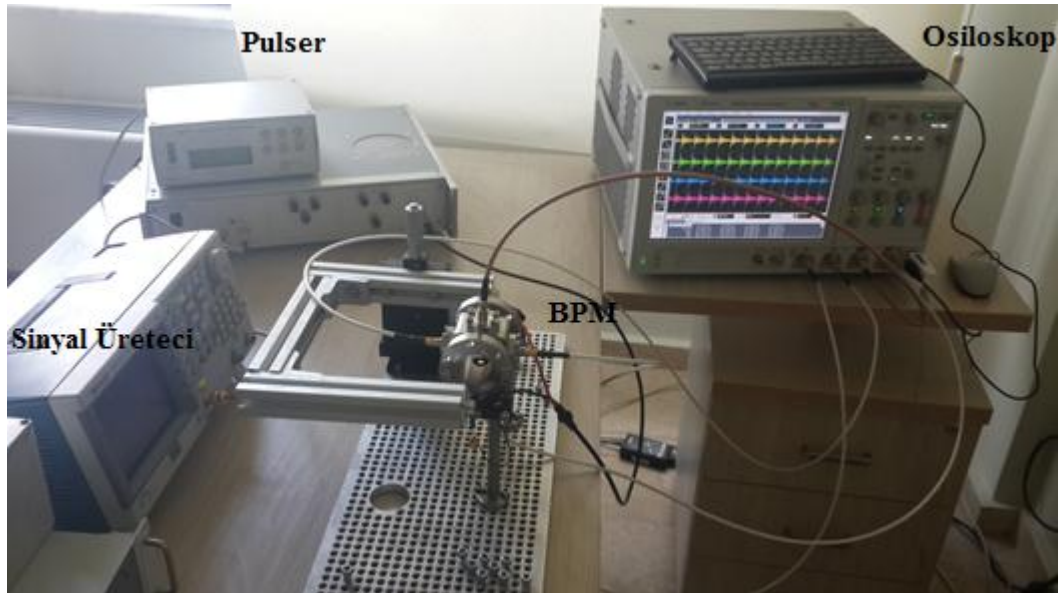
	BPM Gövdesi	BPM Anteni
Malzeme	AISI316 paslanmaz çelik	Bakır (% 99.9), yüzeyi altın kaplama
Helyum kaçak oranı	$<1 \times 10^{-10}$ mbar.Lt/s	$< 1 \times 10^{-10}$ mbar. Lt/s
Sıcaklık çalışma aralığı	-200 °C- 450 °C	-200 °C- 450 °C
Akım dayanımı	1 A	1 A
Voltaj dayanımı	700 VDC	700 VDC
Boyutlar	Yarıçap: 17.5 mm Uzunluk: 85 mm	Yarıçap: 3.5 mm Uzunluk: 30 mm

4.2.3 Buton tipi BPM masa üstü testleri

Üretimin tamamlanmasından sonra, TARLA tesisinde BPM' in masa üstü testleri yapılmıştır. Testlerin yapılması için oluşturulan test düzeneği; Tektronics marka ve AFG3101 mode bir sinyal üreticiden, Avtech marka bir akım kaynağından ve Agilent 500 MHz marka bir osiloskoptan oluşmaktadır. Deney düzeneğinin blok gösterimi şekil 4.20'de, fotoğrafı ise şekil 4.21'de verilmiştir.

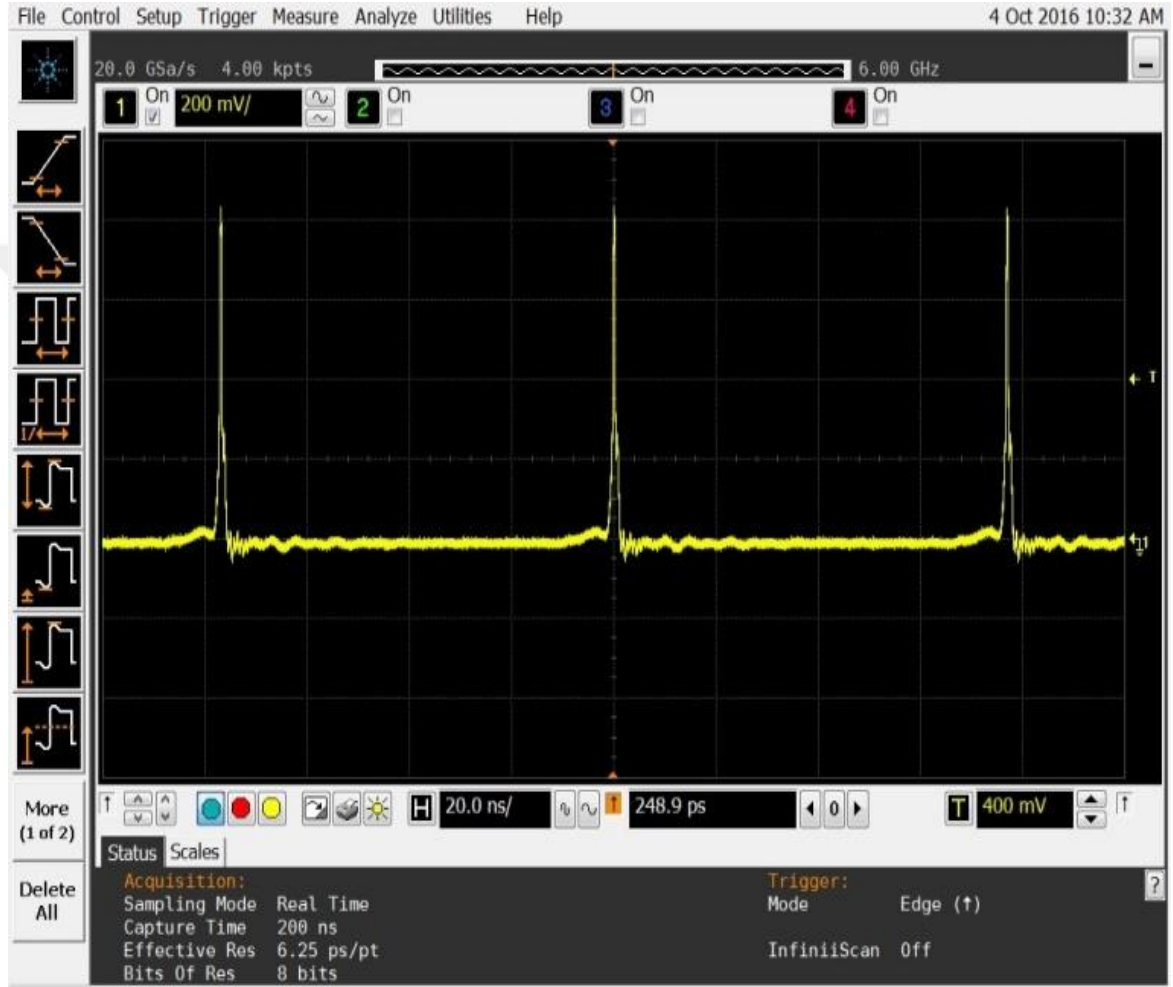


Şekil 4.20 Test düzeneğinin blok gösterimi



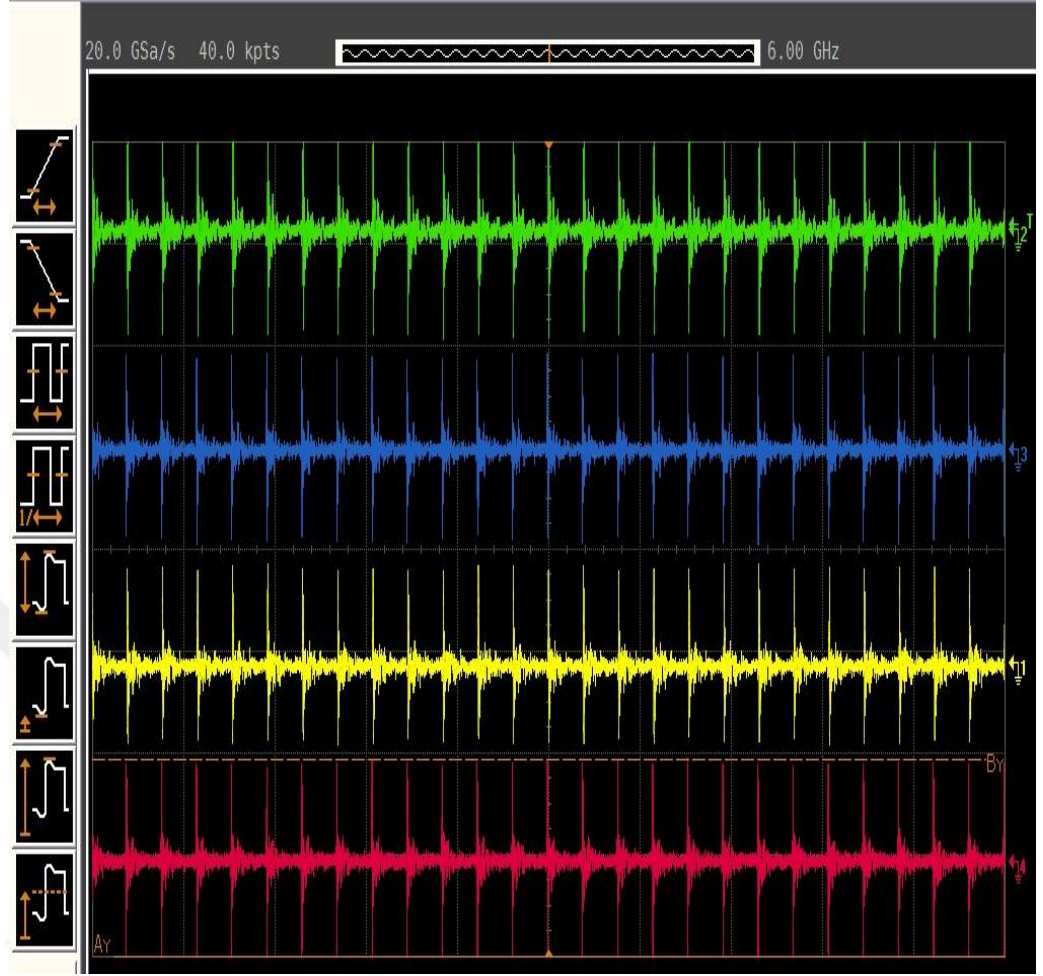
Şekil 4.21 Deney düzeneğinin görünümü

13 MHz bir tetikleme sinyali ile pulser tetiklenmiştir. Pulserin çıkış sinyali 70 V'a yükseltilmiştir. Atma tekrarlama frakansı 77 ns'dir. BPM' in merkezinden ince bir tel geçirilerek, bu sinyal bu tele uygulanmıştır. Monitördeki yansımaları engellemek amacı ile 100 ohmluk bir direnç kullanılmıştır. Giriş sinyalinin osiloskop görüntüsü şekil 4.22' de verilmiştir.



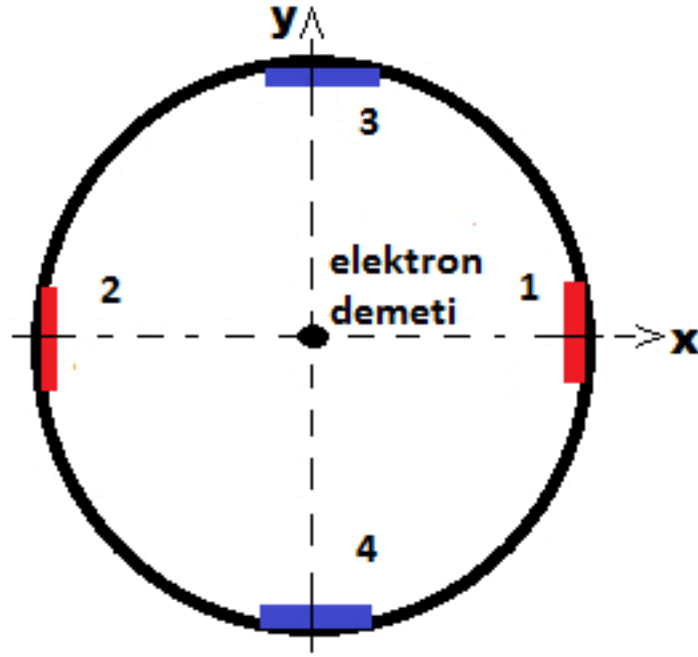
Şekil 4.22 Giriş sinyalinin osiloskop görüntüsü

BPM' in içerisinde geçen telin pozisyonu değiştirilerek karşılıklı antenlerden elde edilen voltaj sinyalleri karşılaştırılmıştır. Tel, BPM'in merkezinde iken karşılıklı antenlerden elde edilen voltaj sinyallerinin aynı olması beklenir. Tel bu pozisyonda iken osiloskopta görülen ekran görüntüsü şekil 4.23' de verilmiştir.



Şekil 4.23 Tel BPM' in merkezinde iken BPM antenlerinden elde edilen çıkış sinyalleri

Şekil 4.23'de sarı olan sinyaller 1 numaralı antenden alınan çıkış sinyalleri, yeşil olan sinyaller ise karşısında bulunan 2 numaralı antenden alınan sinyallerdir. Aynı şekilde mavi olan sinyaller 3 numaralı antenden alınan sinyaller, pembe olan sinyaller ise karşısında yer alan 4 numaralı antenlerden alınan sinyallerdir. Bu antenlerin yerleştirilmesinin şematik gösterimi şekil 4.24 ile gösterilmiştir. Demet merkezde iken antenlere olan uzaklık aynı olduğu için her antenden elde edilen çıkış sinyali aynı olacaktır. Demet merkezden uzaklaştıkça bu durum değişecektir. Hangi antene yakınsa o antenden daha yüksek bir çıkış sinyali elde edilmesi beklenir.



Şekil 4.24 Test düzeneğinde antenlerin yerleşiminin şematik gösterimi

Yapılan çalışmada tel ilk olarak BPM'in merkezinde tutularak anten çıkışlarının bağlı olduğu osiloskop kanallarından okunan çıkış sinyalleri kaydedilmiştir. Daha sonra tel $y=0$ ekseninde sabit tutularak x ekseninde 1 mm aralıklar ile öncelikle $+x$ yönünde, daha sonra yine 1 mm aralıklar ile $-x$ ekseninde yer değiştirilerek antenlerin çıkışlarının bağlı olduğu kanallardan çıkış sinyalleri kaydedilmiştir. Bu işlem $x=-12$ ile $x=+12$ arasında yapılmıştır. Şekil 4.25'de üst resimde telin $+x$ yönünde $+10$ mm' de, alt resimde ise $-x$ ekseninde -10 mm' de çıkış sinyallerinin osiloskop görüntüleri verilmiştir. $+10$ mm'de tel 1 numaralı antene çok yakın ve 2 numaralı antene çok uzaktır. Bu nedenle sinyal genlikleri arasındaki fark büyüktür. Tel bu konumlarda iken, 2 ve 3 numaralı antenlere uzaklığı eşittir. Bu nedenle bu antenlerden elde edilen çıkış sinyalleri yakındır.

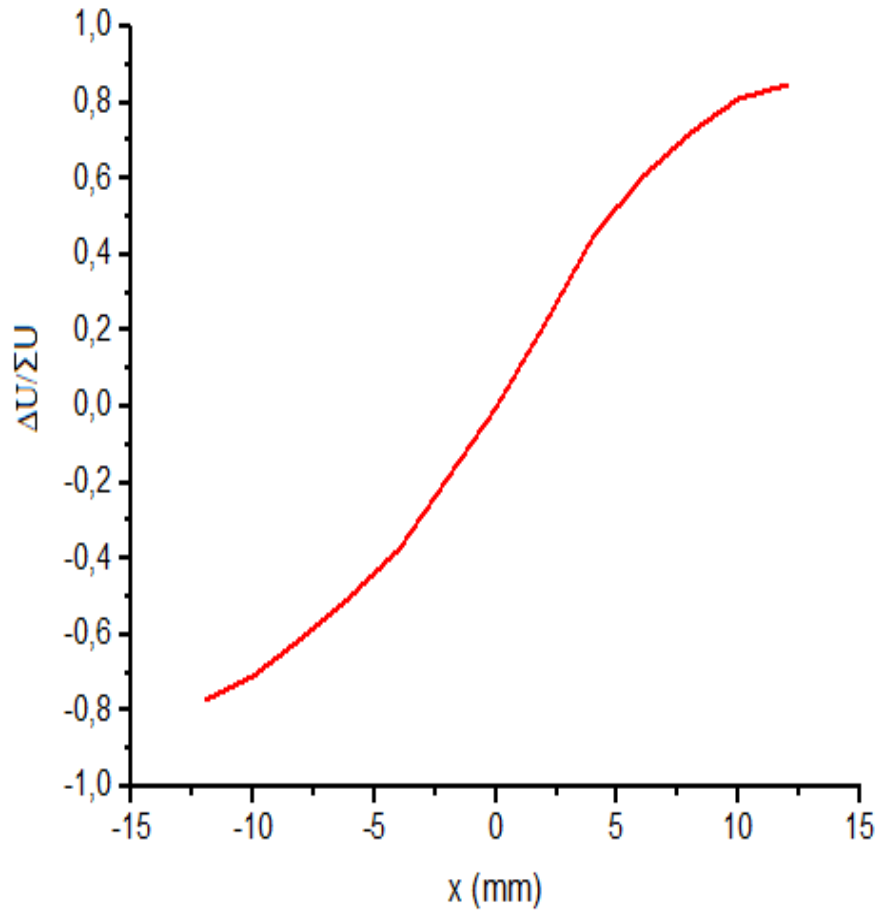


Şekil 4.25 Telin 1 numaralı antene yakın olduğu durum (üst resim) ve telin 2 numaralı antene yakın olduğu durum (alt resim)

y=0 eksenini sabit tutularak x eksenini tarandıktan sonra, y eksenini 1 mm aralıklarla yer

değiştirilerek yine x eksenini taranmıştır. Bu şekilde BPM içerisinde 12 mm yarıçapa sahip bir bölgede telin 1 mm aralıklarla yer değiştirilerek demetin pozisyonu gözlenmiştir.

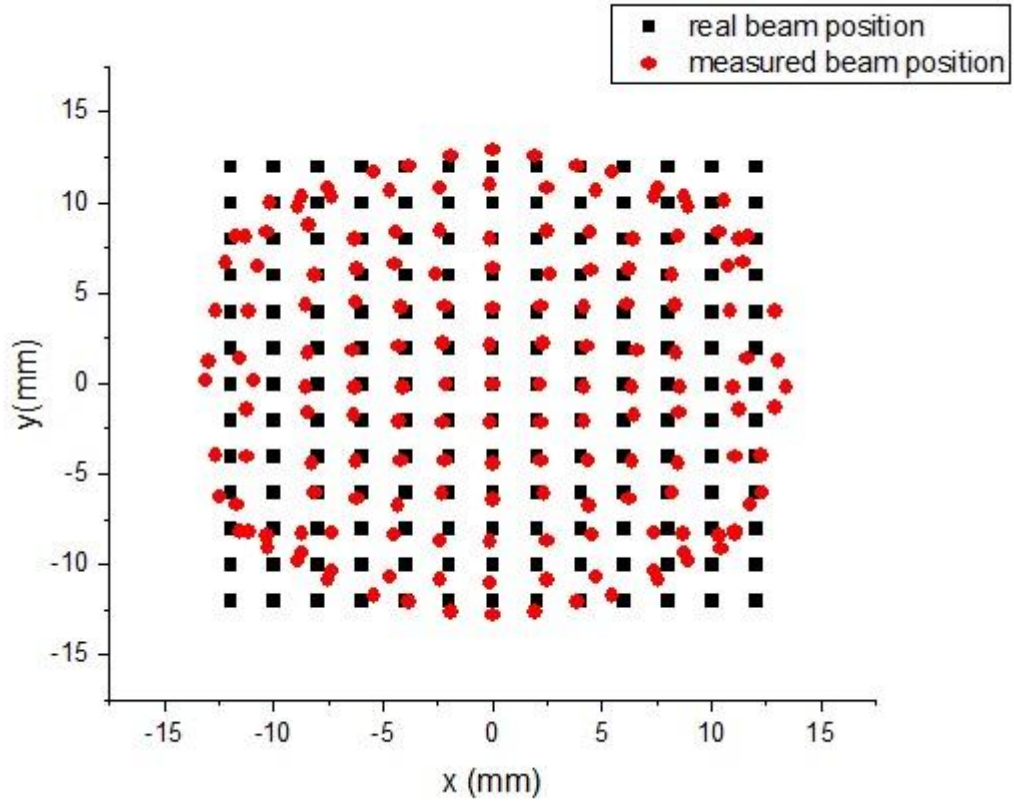
BPM' in x ekseninde pozisyon hassasiyeti deneysel olarak hesaplanmıştır. X ekseninde telin 1 mm yer değiştirmelerine karşı 1 ve 2 numaralı antenlerden elde edilen çıkış sinyallerinin değeri kaydedilmiş ve karşılıklı antenlerden elde edilen voltajların farkının toplamına oranı kullanılarak $\Delta U/\Sigma U$ hesaplanmıştır. Demetin x ekseninde pozisyon değiştirmesine karşı $\Delta U/\Sigma U$ ' nun grafiği elde edilmiş ve şekil 4.26 ile verilmiştir.



Şekil 4.26 Demetin pozisyon değiştirmesine (x) karşı $\Delta U/\Sigma U$ oranı

Grafiğin lineer kısmının eğimi pozisyon hassasiyetini verir. Hassasiyet 103 dB/mm olarak hesaplanmıştır. CST ile yapılan simülasyon çalışmalarında bu hassasiyet 110 dB/mm olarak hesaplanmıştır. Deneysel olarak hesaplanan pozisyon hassasiyeti ile ve simülasyon çalışmalarında elde edilen pozisyon hassasiyetleri arasında minimal bir fark görüldü. Bu fark; öncelikli olarak üretimden kaynaklı toleranslardan kaynaklanmaktadır. Test çalışmasında kullanılan sinyal üretici, osiloskop gibi elektronik cihazların hassasiyeti de bu farkı etkilemiştir. Testlerde kullanılan demetin merkezden saptırılmasında kullanılan optik tutucu 10 μ m hassasiyete sahiptir. Bu yüzden yapılan ölçümler de bu hassasiyet ile ölçülmüştür.

BPM içerisinde demetin pozisyonunun doğru ölçülebildiği aralığı belirlemek için pozisyon haritası kullanılır. Bu harita, BPM içerisinde telin her pozisyonu için dört antenden de elde edilen çıkış sinyalleri kullanılarak çizdirilmiştir. X ekseninde yerleştirilmiş antenlerden alınan çıkış sinyalleri Denklem 2.22’de kullanılarak x konumları ve y ekseninde yerleştirilmiş antenlerden elde edilen çıkış sinyalleri Denklem 2.23’de kullanılarak y konumları oluşturulmuştur. Bu denklemlerde S_x ve S_y ile verilen değerler hassasiyet sabitidir. Bu sabitler; bu çalışmada BPM’ in yarıçapı 17.5 mm alınmıştır. Şekil 4.27 pozisyon haritasını göstermektedir. Bu harita kırmızı noktalar, BPM içerisinde, telin 12 mm yarıçapa sahip bölgede 1 mm aralıklar ile yerleştirilmesi ile elde edilmiştir. Siyah noktalar ise -12 ile +12 aralığında telin gerçek konumunu vermektedir.



Şekil 4.27 Pozisyon haritası

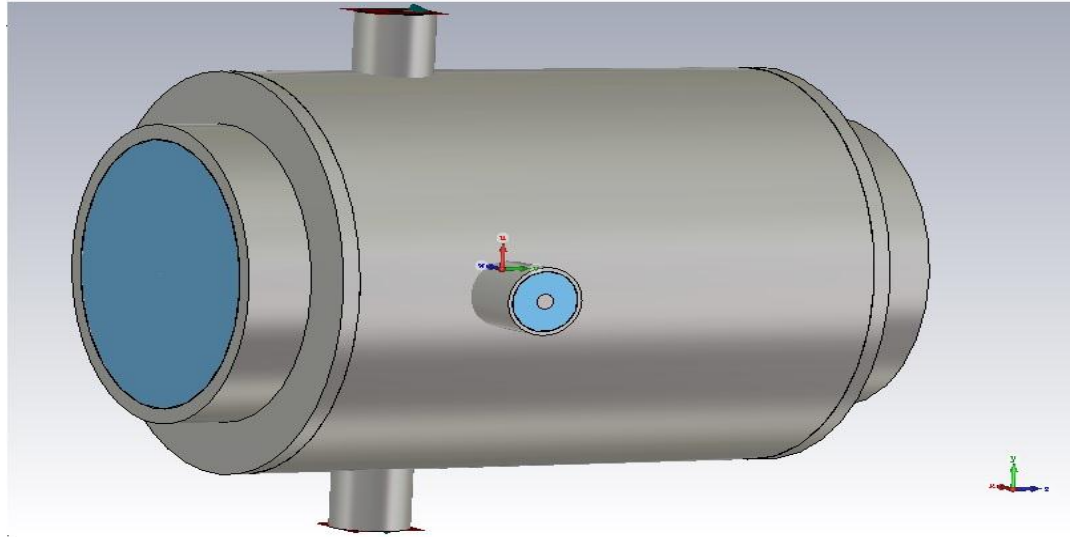
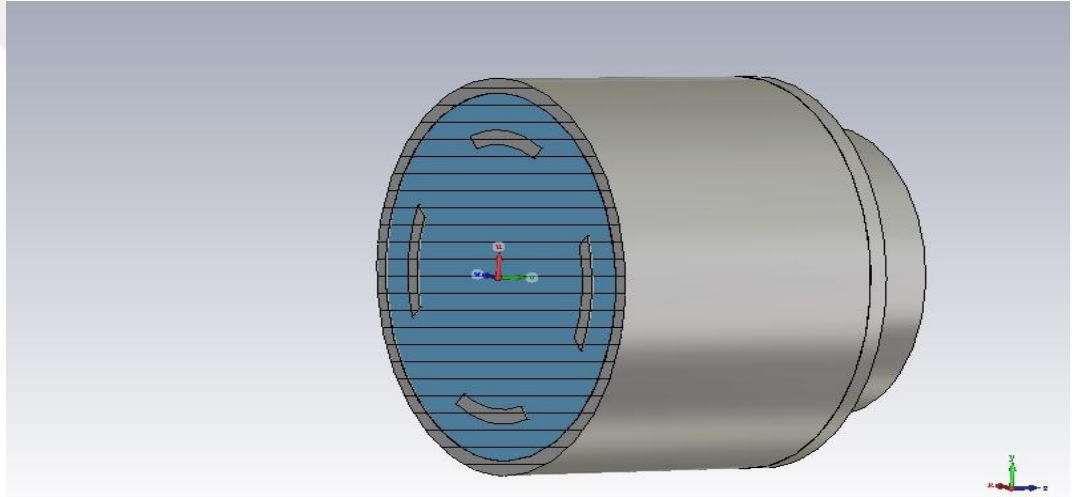
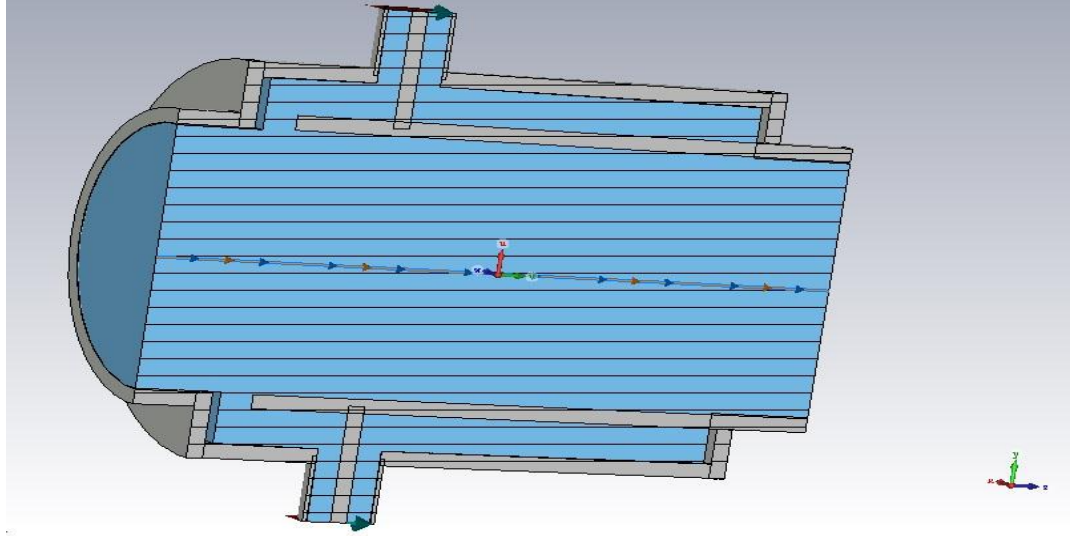
Pozisyon haritası incelendiğinde -7 mm ile + 7 mm arasında yer alan noktalar demetin gerçek pozisyonları ile uyuşmaktadır. Ancak 7 mm sonrasında demetin pozisyonunda doğrusallığın bozulduğu görülmektedir. Bu durumda; bu aralıktan sonra demet pozisyonunda doğru bilgi elde edilemeyeceği belirlenmiştir. 35 mm çapa sahip bir BPM içerisinde 14 mm bir çap içerisinde doğru ölçüm alınabiliyor olması BPM' in 40 %' nın etkin olduğunun göstergesidir. BPM' in 40 % alanında demetin konumu kesin olarak belirlenirken bu alanın dışına çıkıldıkça lineerlik bozulduğu için demetin konumunun belirlenmesi için interpolasyon, fit etme (curve fitting) gibi nümerik çözümler geliştirilerek demetin konumu yine belirlenebilir (Kwon 2013, Noysch 2014). TARLA elektron demetinin enine paketçik uzunluğu (transverse beam emittance σ_{xy}) 2.5 mm' dir (Aksoy, 2014). Bu durumda demetin konumunun 14 mm' lik bir alanda ölçülmesi demetin sapmasına müdahale edilmesi için yeterlidir. Merkezden daha büyük saptalarda nümerik metotlar ile demetin konumu yine belirlenebilir.

4.3 Şerit Tipi BPM Tasarım Çalışmaları

Demet pozisyonunun belirlenmesinde kullanılan diğer bir BPM türü şerit tip BPM' dir. Bu tip monitörler düşük akımlar için buton tipi monitörlere göre daha iyi sonuç vermektedir. TARLA tesisinde 1pC paketçik yükünün ölçülmesi gerektiği durumlar için şerit tipi BPM daha etkin ölçüm sonuçları verir. Bu nedenle bu çalışmada şerit tipi BPM için simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

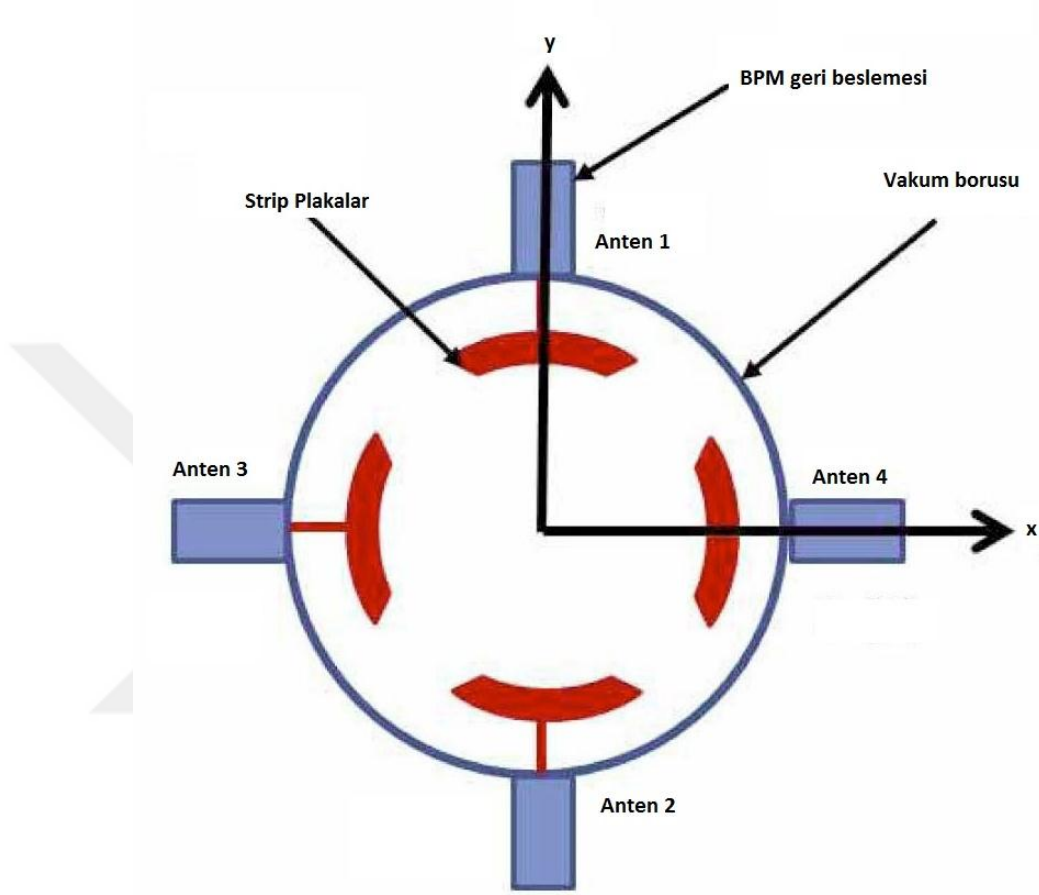
Şerit tipi BPM' in simülasyon çalışmalarında CST Particle Studio ve EM Studio kullanılmıştır. Öncelikle şerit plakalarının uzunlukları belirlenmiştir. Bu uzunluğun belirlenmesinde hızlandırma frekansı ve enerji öne çıkmaktadır. Uzunluk; Eşitlik 2.25 kullanılarak belirlenmiştir. TARLA tesisinin sahip olduğu hızlandırma frekansı 1.3 GHz' dir. Bu hesaplamada paketçik frekansının katları kullanılarak en olası uzunluk belirlenmiştir. Farklı uzunluklar ile yapılan simülasyonlar ile BPM' in verdiği çıkış sinyalleri gözlenmiştir. Yapılan simülasyon çalışmalarında 58 mm şerit uzunluğuna sahip BPM'in optimum çıkış sinyali verdiği gözlenmiştir. Şerit kalınlığı 2 mm ve karşılıklı iki plaka arasındaki uzaklık 36 mm olarak seçilmiştir. BPM' in yarıçapı böylece 18 mm olarak alınmıştır. Bu seçimler TARLA tesisinin demet hattının ölçüleri gözönüne alınarak belirlenmiştir. BPM' in demet hattına montajı da hesaba katılmıştır.

CST ile simülasyonu yapılmış Şerit tipi BPM' in görüntüsü şekil 4.28'de verilmiştir. Şekil sırası ile BPM' in x ekseninde ve y ekseninde kesiti ile bütün olarak görüntüsünü vermektedir.



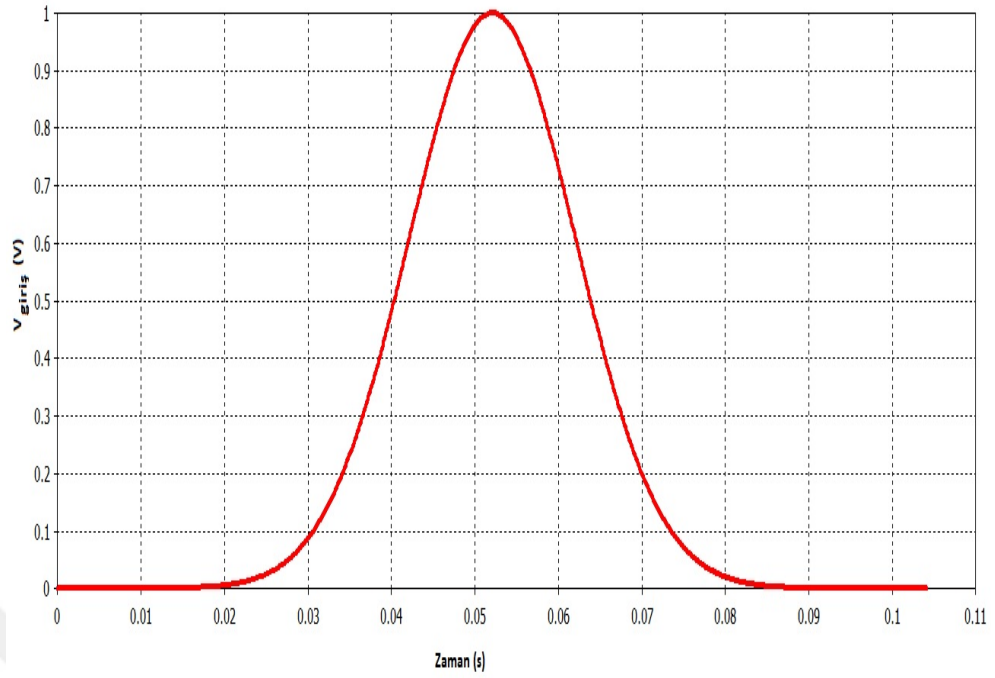
Şekil 4.28 Şerit tipi BPM' in CST görüntüsü

BPM plakalarının yerleşimi ve adlandırılması yani şematik gösterimi şekil 4.29’da görülmektedir. Kırmızı ile çizilen şekiller Şerit plakalarını göstermektedir. Antenlerin uçlarına portlar bağlanmıştır.



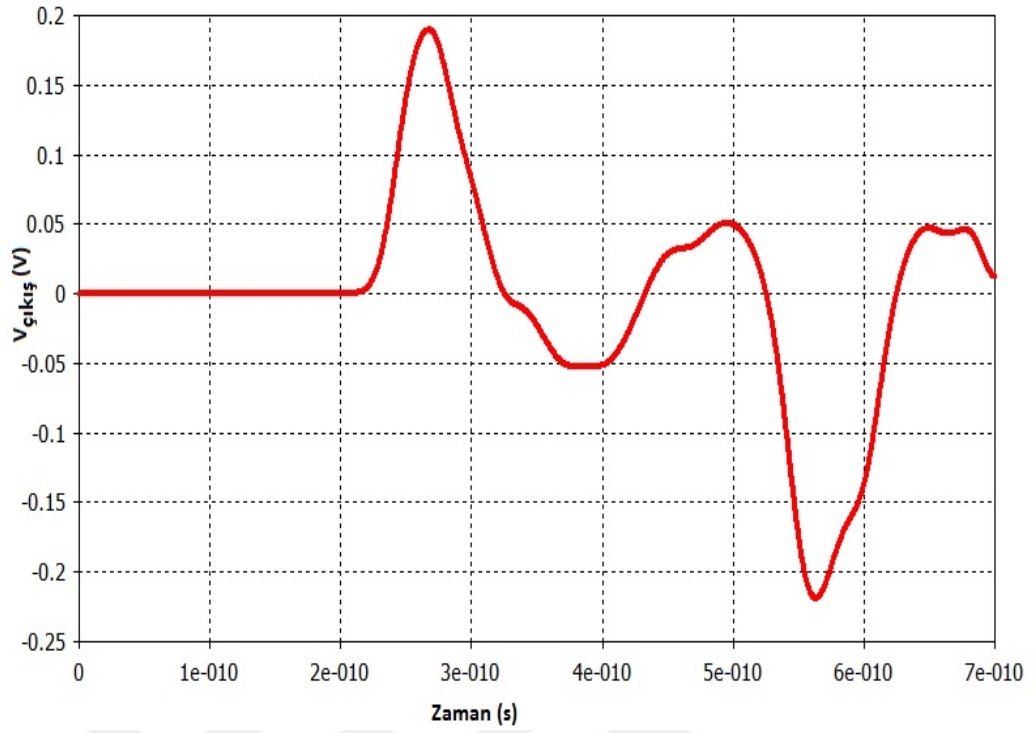
Şekil 4.29 Şerit tipi BPM’ in şematik gösterimi

Simülasyon yapılırken plakaların merkezinden geçirilen elektron demeti 1 pC yüke sahiptir. Elektron demetinin yarı maksimumda bant genişliği (σ) 3 mm olarak verilmiştir. Uygunan sinyal, 0.9999c lik bir hıza sahiptir. Şekil 4.25’de uygulanan giriş sinyali görülmektedir. Çıkış sinyallerini okumak için plakalara portlar yerleştirilmiş ve bu portlar üzerindeki voltaj monitörlerinden çıkış sinyalleri gözlenmiştir.

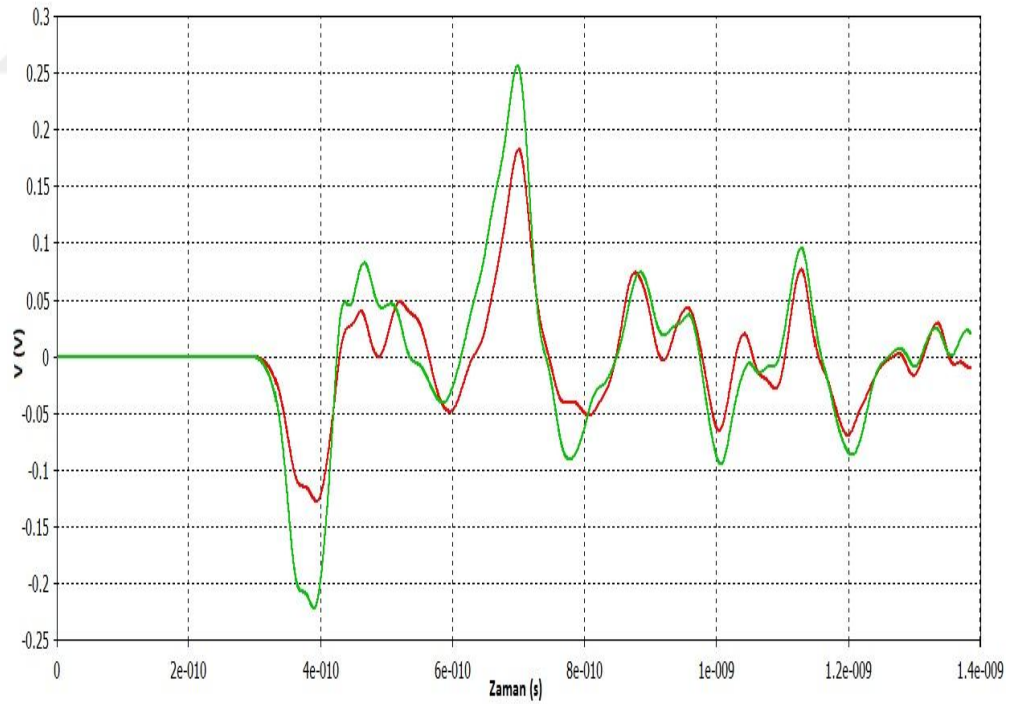


Şekil 4. 30 Şerit tip BPM simülasyonunda uygulanan giriş sinyali ($q=1$ pC, $\sigma=3$ mm, $\beta=0.9999$)

Demet BPM' in merkezinde iken karşılıklı yerleştirilmiş plakalardan kaydedilen çıkış sinyallerinin aynı olması beklenir. Demet merkezden uzaklaştıkça yaklaştığı antenin çıkış sinyali daha şiddetli olacaktır. Demet merkezde iken tüm plakalardan elde edilen çıkış sinyali şekil 4.31'de verilmiştir. Plakalara yerleştirilmiş voltaj monitörlerinden, kaydedilen çıkış sinyalleri aynı olduğu için üstüste denk gelmektedir. Demet merkezden kaydırılarak plakalardan okunan sinyallerin değişimi gözlenmiştir. Şekil 4.32'de demet merkezde değil iken karşılıklı plakalardan okunan sinyalleri göstermektedir. Demet, y ekseninde 2 mm kaydırılmıştır. Bu durumda y ekseninde karşılıklı olarak yerleştirilmiş plakalar üzerinde yeralan alan voltaj monitörlerinden sinyaller gözlenmiştir. Anten 1 ile Anten 2 için alınan sinyaller verilmiştir. Yeşil renk ile verilen çıkış sinyali Anten 1' den ve kırmızı renk ile verilen çıkış sinyalleri Anten 2'den alınmıştır. Demet merkezde iken eşit olan bu sinyaller, demet merkezden sapma gösterdiğinde farklılık göstermiştir. Demet x ekseninde 1 numaralı antene yaklaştığı için Anten 1 portunda okunan voltaj değeri artmış ve 2 numaralı antenden uzaklaştığı için o antenden okunan değer azalmıştır. Bu değerler arasındaki fark demetin pozisyonu hakkında bilgi verir.



Şekil 4. 31 Demet BPM' in merkezinde plakalardan alınan çıkış sinyali görüntüsü

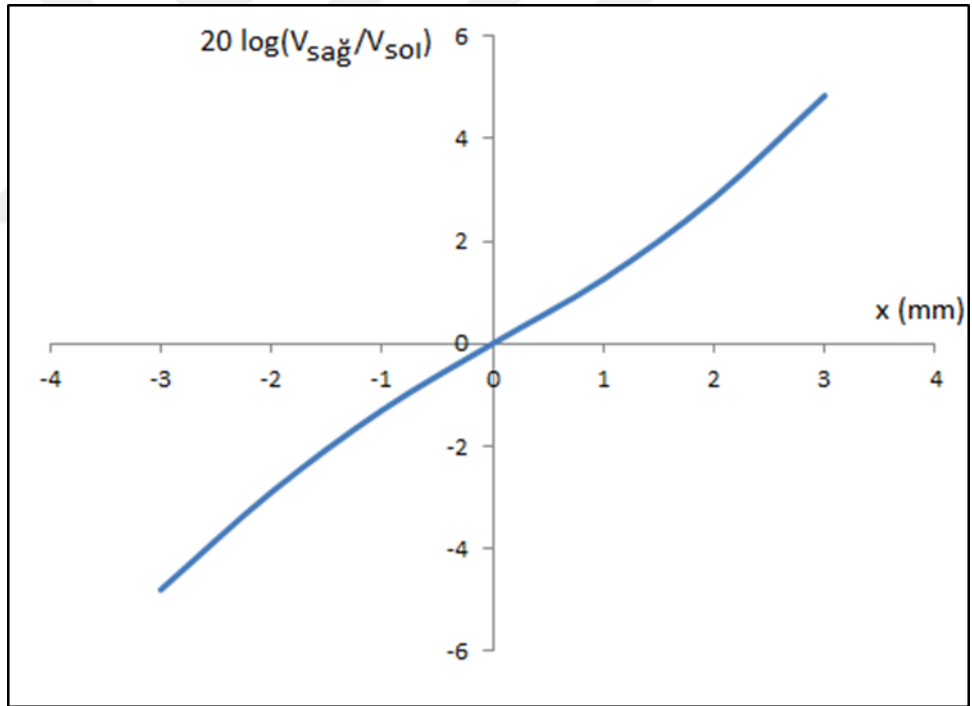


Şekil 4. 32 Demet BPM'in merkezinden x yönünde 3 mm kaydırıldığına karşılıklı plakalardan (Anten 1 ve Anten 2) alınan çıkış sinyali görüntüsü

Şerit tipi BPM' in pozisyon hassasiyeti buton tipinde olduğu gibi hesaplanmıştır. Demet y ekseninde 1 mm aralıklar ile kaydırılarak bu eksen üzerine yerleştirilmiş antenlerden çıkış sinyalleri kaydedilmiştir. Butondan farklı olarak, bu antenlerin oranlarından pozisyon hassasiyeti elde edilir. Eşitlik 4.2 ifadesi Şerit tipi BPM için pozisyon hassasiyet grafiğini veren ifadedir.

$$S_x = 20 \log \frac{V_1}{V_2} / \Delta x \quad (4.2)$$

Şekil 4.31 ile her bir demet sapmasında, demetin sapma uzaklığına göre, hesaplanan S_x değerinin grafiği verilmiştir. Grafiğin lineer kısmının eğimi pozisyon hassasiyetini verir. Şekil 4.33 ile verilen grafiğin eğimi 1.8 dB/mm olarak hesaplanmıştır.



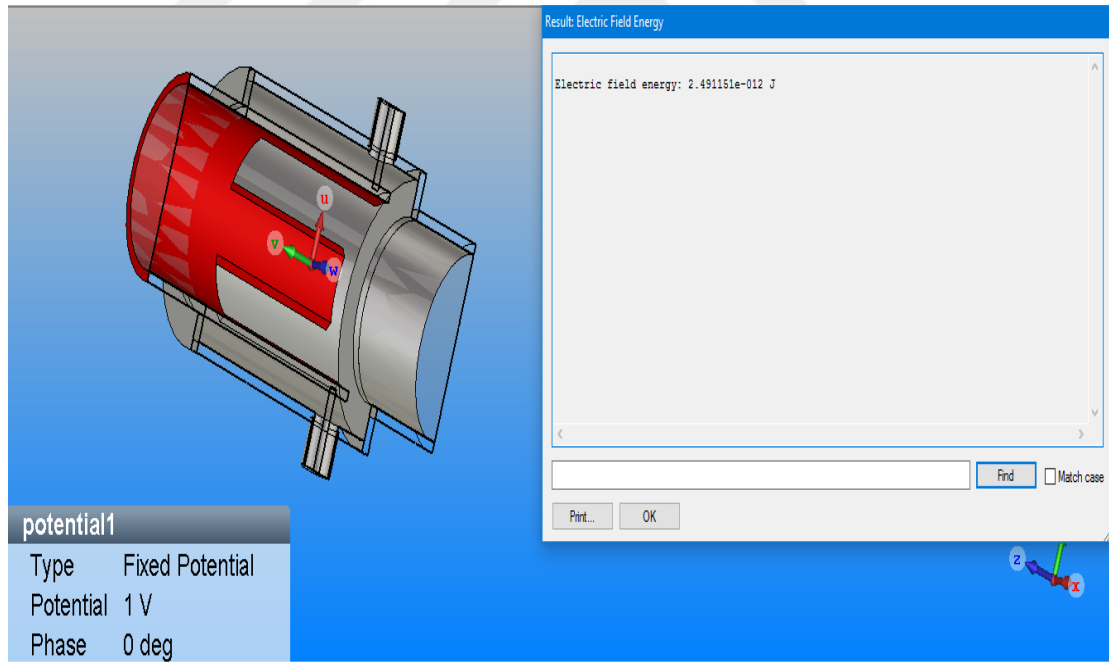
Şekil 4. 33 Demetin sapma uzaklığına göre S_x değerleri

Şerit tipi BPM için monitor sabiti teorik olarak Eşitlik 4.3 ile hesaplanır. Burada b şerit tipi BPM' in yarıçapı, ϕ ise plakaların yaptığı açıdır. Bu açı tasarımıımızda 60° olarak seçilmiştir. Teorik olarak bu değer 1.84 dB/mm olarak hesaplanmıştır. Teorik ve

simülasyon değerinin uyumlu olduğu görülmektedir.

$$S_x = \frac{80}{\ln(10)b} \frac{\sin \varphi/2}{\varphi/2} \quad (4.3)$$

Şerit tipi BPM' in kapasitansı CST EM Studio ile hesaplanmıştır. Bunu hesaplamak için plakalara 1 V potansiyel uygulanmıştır. Plakalara uygulanan potansiyel ve elektrik alan enerjisi w' nun verildiği CST EM Studio ekran görüntüsü ise şekil 4.34'de verilmiştir. Elde edilen elektrik alan enerjisi ve uygulanan potansiyel eşitlik 4.4' de kullanılarak Şerit tipi BPM' in kapasitansı hesaplanmıştır. 4.98 pF değerinde bir kapasitansın üretim için yeterli olduğu hesaplanmıştır. Kapasitans değerinin 1–10 pF olması beklenen sonuçtur. Bu aralıkta elde edilebilecek bir kapasitans, yüksek voltaj değeri okumada öne çıkmaktadır.



Şekil 4.34 CST EM Studio ile Şerit tipi BPM' in elektrik alan enerjisi ekran görüntüsü

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

TARLA tesisi Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Projesi kapsamında, ülkemizde Ar-Ge amacıyla kurulan ilk elektron hızlandırıcı ve ışıınım tesisidir. Bu nedenle, THM kapsamında kurulması planlanan diğer hızlandırıcı ve ışıınım kaynakları tesisleri için örnek teşkil edecek olup aynı zamanda hızlandırıcı ve ışıınım teknolojileri ve uygulamaları açısından bir test laboratuvarı niteliğindedir. Bu tesis ile ayarlanabilir dalgaboyuna, yüksek parlaklık ve pik güce sahip serbest elektron lazeri ve frenleme ışıınımları elde edilerek Ar-Ge çalışmalarında kullanılacaktır. Bu özellikleri ile tesis ülkemiz ve bölgemiz araştırmacılarına hepsi ilk kez sağlanan birçok yeni deneysel araştırma olanağı sağlayacaktır.

Bu çalışmada; TARLA tesisi için öncelikli olmak üzere makro ve mikro atmalı elektron hızlandırıcılarında hızlandırıcı boyunca demetin pozisyonu, akımı, yükü, profili gibi niceliklerini ölçmekte kullanılan demet algılayıcıların tanımlanması, tasarlanması, teknolojik özelliklerinin ortaya konulması ve sisteme adaptasyonu amaçlanmıştır. Çalışmada ilk olarak TARLA tesisinin BPM ihtiyacı ve tesisin elektron demeti parametreleri göz önüne alınarak kullanılması planlanan BPM çeşitleri belirlenmiştir. Tesiste demetin pozisyonunun belirlenebilmesi amacı ile toplam 30 adet demet pozisyon monitörünün (BPM) kullanılması planlanmaktadır. İhtiyaca yönelik olarak belirlenen bu monitörlerin sayısında ve tiplerinde değişiklikler olabilir. BPM'lerin kullanılacağı konumlar bulgular kısmında verilmiştir. TARLA tesisinin sahip olduğu kısa paketçik yapısı gözönüne alındığında ilk olarak buton ve şerit tipi BPM'lerin kullanılacağı belirlenmiştir.

Buton ve Şerit tipi BPM'lerin tasarımı için CST Particle Studio programı kullanılarak tasarım simülasyonları yapıldı. Üretiminin ülkemizde ilk olarak yapılıyor olması nedeniyle üretimi Şerit tipine göre daha kolay ve maliyeti daha düşük olan buton tipi BPM'in üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan buton tipi BPM'in testleri TARLA tesisinde yapılarak simülasyon ve test sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anten boyutları belirlenirken simülasyonlarda maksimum genlikte ve yüksek kalitede çıkış sinyalleri baz alınmıştır. Buton tipi BPM' ler için anten çapı sınırlayıcı olmuştur. Simülasyonlar sonucunda buton tipi BPM için pozisyon hassasiyeti 110 mV/mm olarak hesaplanmıştır. Testler sonucunda bu hassasiyet 103 mV/mm olarak elde edilmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçları arasında minimal bir fark bulunmaktadır. Bu durum üretilen BPM' in toleranslarından ve test esnasında kullanılan elektronik cihazların hassasiyetinden kaynaklanmaktadır. 3.5 mm' lik yarıçapa sahip buton BPM için kapasitans 4.33 pF olarak hesaplanmıştır. Bu ölçüde küçük bir kapasitans yüksek çıkış voltajına olanak sağlamaktadır. Bu durum sinyal işlemeyi ve böylece demetin pozisyonunu belirlemeyi kolaylaştırmaktadır

Demet pozisyonun BPM içerisinde ölçülebilme hassasiyeti pozisyon haritası ile belirlenmektedir. Masa üstü testlerin tamamlanmasından sonra pozisyon haritası oluşturulmuştur. Bu haritadan 35 mm yarıçapa sahip buton tipi BPM' in 14 mm yarıçapa sahip kısmında demetin gerçek pozisyonun ölçülen pozisyon ile uyum sağladığı görülmektedir. Bu uzunluğun dışına çıkıldıkça ölçülen demet pozisyonlarında sapmalar oluşmakta ve demetlerin üstüste bindiği, bu nedenle doğrusallığı bozulduğu görülmektedir. Bu durum BPM' in % 40'ında demetin demet hattı içerisindeki pozisyonunun daha kesin belirlendiğini gösterir. Bu oran TARLA elektron demetinin pozisyonunun belirlenebilmesi için yeterlidir.

TARLA tesisi için üretilen buton tipi BPM'in tesiste ilk hızlandırıcı modülde kullanılması planlanmaktadır. Burada paketçik uzunluğu 3-4 ps' dir. Ayrıca deneysel amaçlı olarak enjektör çıkışında da kullanılması planlanmaktadır. Paketçik yükünün 1 pC olduğu durumlarda Şerit tipi BPM daha hassas sonuç verecektir. Tesiste paketçik uzunluğu 1-100 pC arasında değiştiğinden dolayı Şerit tipi BPM' in geliştirilmesi ve kavite tipi BPM çalışmalarının detaylandırılmasına ihtiyaç bulunmaktadır.

Yapılan bu çalışma hem inşa aşamasında olan TARLA tesisinde hem de THM kapsamında teknik tasarım çalışmaları tamamlanmış olan 3. nesil sinkrotron ışınımı (TURKAY) ve 4. nesil SASE serbest elektron lazeri (TURKSEL) tesislerinde

kullanılacak olan demet pozisyon monitörlerinin tasarımları ve yerli olanaklar ile üretimleri konusunda önemli bir adım teşkil etmiştir. Çalışmada elde edilen deneyim bu tesisler için gerekli olan demet pozisyon algılayıcılarının tasarım ve üretimlerinde kullanılması, dışa bağımlılığı azaltıp tesislerin maliyetinde büyük tasarruf sağlayacağı gibi benzer diğer yüksek teknolojik donanımların yerli olanaklar ile üretilmesinin önünü açmaktadır. Ayrıca BPM'in üretiminin Türkiye'de yapılmış olması benzer yüksek teknolojik ürünler açısından Türk endüstrisinde özgüven kazanılması açısından da başarılı bir örnek olmuş ve diyagnostik elemanları, RF kaviteleri, soğutma sistemleri ve kontrol sistemleri gibi hızlandıcılarda kullanılan pek çok sistemin ülkemizde üretilbileceği konusunda önemli bir motivasyon sağlamıştır.



KAYNAKLAR

- Aksoy, A. and Lehnert U. 2014. Beam transport and bunch compression at TARLA, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 762 54-63.
- Aksoy, A, Karşlı, Ö. and Yavaş, Ö. The Turkish Accelerator Complex IR FEL Facility. Infrared Physics & Technology, 51 (2008) 378-381.
- Aksoy, A., Arıkan, P., Karşlı, Ö., Kaya, Ç., Kazancı, E., Özkorucuklu, S. and Yavaş, Ö. Design Parameters and Current Status of the TARLA Facility. 5th International Particle Accelerator Conference (IPAC2014). June 15-20, 2014, Dresden, Germany. Proceedings of IPAC2014, p. 2918-2920
- Aksoy, A, Karşlı, Ö., Kaya, Ç., Yavaş, Ö., Özkorucuklu, S. and Arıkan, P. Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara (TARLA) Project. Conference on Free Electron Laser (FEL2014). 25-29 August 2014, Basel, Switzerland. Proceedings of FEL2014, p. 585-588.
- Anonim. 2016. Ankara Üniversitesi Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü Web Sitesi. <http://hte.ankara.edu.tr>, Erişim Tarihi: 14.04.2016.
- Anonymous. 2016 Computer Simulation Technologies, <http://www.cst.com>, Erişim Tarihi: 09.05.2016.
- Anonim. 2016. Türk Hızlandırıcı Merkezi Websitesi. <http://thm.ankara.edu.tr>, Erişim Tarihi: 12.04.2016.
- Anonim. 2016. Elektron Hızlandırıcı ve Lazer Tesisi Websitesi. <http://tarla.org.tr>, Erişim Tarihi: 10.04.2016.
- Evtushenko P. 2004. Electron Beam Diagnostic at the ELBE Free Electron Laser. Dresden University of Technologie, Ph. D. Thesis, Dresden, Germany.
- Forck, P., Kowina, P. and Liakin, D. 2008. Beam Position Monitors. Proceedings of CAS-CERN Accelerator School: Course on Beam Diagnostics, p. 187–228, Dourdan, France.
- Forno, M.D. 2011. Cavity Beam Position Monitors. Proceedings of CAS-CERN Accelerator School Course, Erice, Italy.
- Jackson, J. D. 1962. Classical Electrodynamics, John Willey & Sons Inc. Ch. 11, p. 555.
- Jolly, S. 2003. An Intra-Pulse Fast Feedback System for a Future Linear Collider. PhD Thesis, Exeter College, Oxford.
- Keil, B., Behrmann, G., Dehler, M., Kramert, D., Marinkovic, G. and Pollet, P. 2007. Design of an Intra-bunch-Train Feedback System for the European X-Ray

FEL. Proceedings of DIPAC07, WEBB02, Venice, Italy.

- Kwon, H.J., Kim, H.S., Ryu, J.Y., Jang, J.H. and Cho, Y.S. 2013. Design and Fabrication of The Beam Position Monitor for the PEPF Linac. Nuclear Engineering and Technology. V.45. 523-528.
- Lorenz, R. 1998. Cavity Beam Position Monitors. AIP Conference Proceedings, p. 451-453, Stanford, California, USA.
- Lunde, R. 2014. Collective effects and experimental verification of the CLIC drive beam and decelerator. Ph. D. Thesis. University of Oslo. Norway.
- McGinnis, D.P. 1994. The Design of Beam Pickup and Kickers, 6th Beam Instrumentation Workshop, AIP Conference Proceedings, 333, p. 64-85, Vancouver, Canada.
- Molaei, A. 2014. General Consideration for Button- BPM, Proceedings of IPAC2014 3637-3540, Dresden, Germany.
- Nosych, A. A., Iriso, U. and Olmos, A. 2014. Overview of the Geometrical Non-linear Effects of Button BPMs and Methodology for Their Efficient Suppression. Proceedings of the IBIC2014, 298- 302, Monterey, CA, USA.
- Nergiz, Z., Aksoy, A. and Özkorucuklu, S. 2011. Diagnostic System of TAC IR FEL Facility. Proceedings of DIPAC11, p.536, Hamburg, Germany.
- Özkorucuklu, S. and Aksoy, A. (Eds.), 2015. The Technical Design Report of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara (TARLA), Ankara Üniversitesi, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü, Gölbaşı, Ankara.
- Ruf, M., Martius, S., Setzer, S. and Müller, S. 2009. Beam Position Monitoring in Electron Accelerators. Journal of RF-Engineering and Telecommunications. Volume 63, p. 97-101.
- Shafer, R.E. 1989. Beam Position Monitoring, AIP Conference Proceedings on Accelerator Instrumentation, p. 26-55, New York.
- Sargsyan V. 2004. Comparison of Stripline and Cavity Beam Position Monitors, TESLA Report 2004-03. DESY, Hamburg, Germany.
- Soby, L. 2007. BPM Design. FP420 BPM Workshop. Cern, Switzerland.
- Swinson, C.J. 2010. Development of Beam Position Monitors for Final Focus Systems at the International Linear Collider. Ph. D. Thesis, Wolfen College, Oxford, UK.
- Tobiyama, M., Fukuma, H., Shibata, K., Hiramatsu, S., Mori, K., Ishii, H. and Obina, T. 2010. Development of Button Electrodes for SUPERKEKB Rings, BIW10,

TUPSM041, 223, Santa Fe, New Mexico, US.

Vafa E. 2012. Beam Position Monitoring System in Accelerators. Ph. D. Thesis, Lund University, Lund, Sweden.

Vismara, G. 2000. Signal Processing for Beam Position Monitors. CERN- SL- 2000-056 BI. Geneva, Switzerland.

Wendt, M. 2001. BPM Readout Electronics Based on the Broadband AM/PM Normalisation Scheme. Proceedings DIPAC 2001- ESRF, Contributed Talks 63. Grenoble, France.

Yavaş, Ö. Turkish Accelerator Center Project: The Results of 3rd Stage and Vision of the Project. 6th UPHUK Congress, 29-30 August 2016, Bodrum Türkiye. Balkan Physics Letters, 24, 241023, p. 191-202 (2016)



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Müge TURAL GÜNDOĞAN

Doğum Yeri : Kayseri

Doğum Tarihi : 27.05.1981

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Çankaya Anadolu Lisesi (1999)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü (2005)

Yüksek Lisans :Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (2008)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

MTA Genel Müdürlüğü Deniz Araştırmaları Dairesi Başkanlığı, 2009 - ...

Yayınları (SCI ve diğer):

Tural Gundogan, M., Kaya, Ç and Yavas, Ö. 2016. Design and Production Considerations on a Button Type Beam Position Monitor For Use of TAC-TARLA Facility. Acta Physica Polonica A 132 (2017) 1333-1339. doi:10.12693/A physPolA.132.1333

Tural Gundogan, M., Yavas, Ö., Aydın, A., Kasap, E., and Kaya, Ç. 2016. Design, Production and Tests of Button Type BPM for TAC-TARLA IR FEL Facility. 5th International Beam Instrumentation Conference (IBIC16), September 11-15, 2016, Barcelona, Spain. Proceedings of IBIC16, pp.27-30 (2016). doi: 10.18429/JACOW-IBIC2016-MOPG01.

- Tural Gundoğan, M.**, Kaya, Ç. and Yavaş, Ö. Design of Stripline Beam Position Monitor for TARLA Facility. *Balkan Physics Letter*, 24, 241018, pp. 151 – 158, (2016).
- Kaya, Ç. , Aksoy, A., Aydın, A., Karakılıç, V., Karşlı, Ö., Kazancı, E., **Tural Gündoğan, M.** and Yavaş, Ö. Electron Beam Diagnostics of Injector Line in TARLA Facility. *Balkan Physics Letter*, 24, 241015, pp. 131 – 138, (2016).
- Tural, M.**, Yavaş, Ö. and Arıkan, P. Research Potential of TAC IR FEL Facility. *Balkan Physics Letter*, 16 (1), pp. 260 - 263, 161043 (2009).
- Tural Gundoğan, M.**, Kaya, Ç. and Yavaş, Ö. A Button - Type Beam Position Monitor.Design for TARLA Facility. 9th International Physics Conference of Balkan Physical Union (BPU-9). August 24-27, 2015, Istanbul, Turkey (2015). *AIP Conference Proceedings* 1722, 140010 (2016); doi: 10.1063/1.4944200.
- Ketenoglu, B., Yavas, O., **Tural, M.**, Ozkorucuklu, S., Tapan, I., Sahin, O. and Arıkan, P. Technical Design Studies of TAC SASE FEL Proposal. 31st Free Electron Laser Conference (FEL09), August 23-28, 2009, Liverpool, England. *Proceedings of FEL09*, pp.325-328 (2009).
- Aksoy, A., Aksakal, H. P. Arıkan., Bilen, B., Karsli, O., Ketenoglu, B., Ozkorucuklu, S.,Tapan, I., **Tural, M.**, Yavas, O. ve Yildiz, H. D. The TAC IR FEL Oscillator Facility Project. 31st Free Electron Laser Conference (FEL09), August 23-28, 2009, Liverpool, England. *Proceedings of FEL09*, pp. 580-582 (2009).