

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**DÜŞÜK ENERJİLİ PLAZMA ODAK FÜZYON CİHAZI YAPIMI
VE NÖTRONİK ÖLÇÜMLER**

Yeşim AKGÜN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2010

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Yeşim AKGÜN tarafından hazırlanan “**Düşük Enerjili Plazma Odak Füzyon Cihazı Yapımı ve Nötronik Ölçümler**” adlı tez çalışması 14/10/2010 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. Ali Ulvi YILMAZER

Eş Danışman : Doç. Dr. Erol KURT

Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Sinan BİLİKMEN
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Akif ESENDEMİR
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı

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

Üye : Prof. Dr. Çelik TARIMCI
Ankara Üniversitesi , Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Haluk MUTLU
Ankara Üniversitesi , Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Orhan ATAKOL
Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

DÜŞÜK ENERJİLİ PLAZMA ODAK FÜZYON CİHAZI YAPIMI VE NÖTRONİK ÖLÇÜMLER

Yeşim AKGÜN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Eş Danışman: Doç. Dr. Erol KURT

Füzyon reaksiyonlarını gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan plazma odak (PF) cihazı tasarlanmış ve oluşturulmuştur. Mather tip olarak tasarlanan cihaz, 3 kJ maksimum enerjiye sahiptir. Oluşturulan plazma odak cihazında farklı basınç, gerilim ve elektrot geometrileri ile çalışılarak cihazın optimizasyonu için deneyler yapılmıştır. Döteryum-döteryum füzyon reaksiyonu gerçekleştirilmiştir. Reaksiyon sonucu ortaya çıkan nötron ve proton izlerinin ölçümü için CR-39 plastik iz detektörleri kullanılmıştır. $V=14$ kV giriş gerilimi değeri ve $P=11.5$ mbar basınçta çalışma gazı olarak Döteryum kullanıldığında yapılan deneylerde pik akımı $I_{\text{peak}}=39$ kA olarak bulunmuştur. CR-39 plastik iz detektörleriyle yapılan ölçümler sonucu nötron sayısı sistemin çalıştırılması başına 3.3×10^5 olarak hesaplanmıştır. Nötron verimliliği ile akım arasındaki bağıntıyı veren ölçekleme kanunu da $Y \propto I^{3.46}$ olarak bulunmuştur. Çalışmalar sonucunda elde edilen eşyönsüzlük (anisotropy) oranı $A=2.07$ olarak bulunmuştur. Farklı basınç değerleri için deneyler yapılmış ve en yüksek ürün verimi için en uygun çalışma basıncı 11.5 mbar olarak belirlenmiştir.

Ekim 2010, 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: Mather tipli plazma odak, füzyon, D-D reaksiyonu, CR-39, manyetik alan, plazmanın sıkıştırıldığı nokta

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

CONSTRUCTION AND NEUTRONIC MEASUREMENTS IN A LOW-ENERGY PLASMA FOCUS FUSION DEVICE

Yeşim AKGÜN

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

Supervisor: Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER
Co-Supervisor: Doç. Dr. Erol KURT

Plasma focus (PF) device, that is widely used to produce fusion reactions, is designed and constructed. The device, designed as Mather type, has maximal energy 3 kJ. Experiments have done with different pressures, voltages and electrode geometries in the constructed device for optimization of the plasma focus device. Deuterium-deuterium reactions are carried out. CR-39 plastic track detectors are used in order to diagnose the tracks of neutron and proton which are created after D-D reaction. The peak current is obtained as $I_{\text{peak}}=39$ kA in experiments carried out at $V=14$ kV input voltage and $P=11.5$ mbar pressure with deuterium as operating gas. Total neutron yield is calculated as 3.3×10^5 neutrons per shot using CR-39 plastic track detectors. The scaling law between the reaction yield and current is obtained as $Y \propto I^{3.46}$. The anisotropy rate is determined as $A=2.07$ after the studies. Some experiments have done for several pressures and $P=11.5$ mbar is determined as the optimal pressure rate, which gives the highest particle yield.

October 2010, 69 pages

Key Words: Mather Type Plasma focus, fusion, D-D reaction, CR-39, magnetic field, pinch

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca bana her konuda yardımcı ve destek olan danışmanım Prof. Dr. Ali Ulvi YILMAZER'e (Ankara Üniversitesi) ve eş danışmanım Doç. Dr. Erol KURT'a (Gazi Üniversitesi), bu konuda çalışmamı sağlayan ve çalışmalarımda bana yardımcı olarak beni yönlendiren hocalarım Prof. Dr. Sinan BİLİKMEN'e (Orta Doğu Teknik Üniversitesi), Dr. Ali ALAÇAKIR'a (TAEK), benden desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan hocam Prof. Dr. Fatma ERDOĞAN'a (Ankara Üniversitesi), çalışmalarım sırasında katkılarda bulunarak bana yardımcı olan Prof. Dr. Çelik TARIMCI'ya (Ankara Üniversitesi), çalışmalarımda her zaman yanımda olan ve yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarım Tolga ÖNCÜ'ye (TAEK) ve A. Seda BÖLÜKDEMİR'e (TAEK), manevi desteğini her zaman hissettiğim Sayın Sema ZARARSIZ (TAEK) ile laboratuvar çalışma arkadaşlarıma, her zaman yanımda olan, benden yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma, çalışmam süresince bana her zaman destek olan ve sabır gösteren canım aileme, babam Şemsettin AKGÜN' e, annem Münüre AKGÜN' e ve kardeşim Erdiç AKGÜN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Türkiye Atom Enerjisi Kurumu' nda III-B.06.TAEK.2. Kodlu "Hızlı Nötron Radyo-Görüntüleme İçin Plazma-Odak (Plasma-Focus) Cihazı Yapımı" isimli proje kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Yeşim AKGÜN
Ankara, Ekim 2010

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. PLAZMA.....	5
2.1 Plazma Kriterleri	5
2.2 Plazma Teşhis Yöntemleri	8
3. FÜZYON	11
3.1 Temel Füzyon Reaksiyonları	13
4. KURAMSAL TEMELLER	16
4.1 Plazma Odak Cihazı	16
4.2 Plazma Odak Cihazında Kullanılan Sistemler	20
4.2.1 Elektrot sistemi	20
4.2.2 Vakum odacığı	21
4.2.3 Vakum sistemi	21
4.2.4 Enerji yükleme sistemi	21
4.2.5 Ölçüm sistemi	22
4.3 Mather Tipi Plazma Odak Cihazının Çalışma İlkesi	23
4.3.1 Gaz boşalma fazı	25
4.3.2 Aksenal ivmelendirme fazı	26
4.3.3 Radyal faz	28
4.4 Plazma Odak Cihazının Elektriksel Eşdeğer Devresi ve Devre Eşitlikleri	30
4.4.1 Aksenal ivmelendirme fazı için elektriksel eşdeğer devre	31
4.4.2 Radyal faz için elektriksel eşdeğer devre	33
4.5 Plazmaya Enerji Aktarımı	36
5. MATERYAL VE YÖNTEM	39
5.1 ODAK-3K	39
5.1.1 Vakum odacığı	39
5.1.2 Elektrotlar	40
5.1.3 Vakum sistemi	42
5.1.4 Yükleme ve enerji sistemi	43
5.1.5 Ölçüm sistemi	44
5.2 ODAK-3K ile Yapılan Füzyon Çalışmaları	47
6. BULGULAR	50
6.1 Optimizasyon Çalışmaları	50
6.2 Akım Hesabı	52
6.3 ODAK-3K ile Yapılan Füzyon Çalışmaları Bulguları	55
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	59
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	69

SİMGELER DİZİNİ

I	Akım
J	Akım yoğunluğu
Al	Alüminyum
A	Anizotropi oranı
a	Anot yarıçapı
z_0	Anodun boyu
P	Basınç
k_B	Boltzman sabiti
ϵ_0	Boşluk elektrik geçirgenliği
λ_D	Debye uzunluğu
D	Döteryum
R_0	Direnç
T_e	Elektron sıcaklığı
n_e	Elektron yoğunluğu
e	Elektronun yükü
z	Eksenel fazda plazma tabakasının ilerleme yönünü
τ	Hapsetme zamanı
He	Helyum
H	Hidrojen
L_0	İndüktans
n_i	İyon yoğunluğu
Y_l	Kaçak direnci
C_0	Kapasitans
b	Katotun yarıçapı
SG	Kıvılcım aralığı (Spark Gap)
kJ	Kilo Joule
B	Manyetik alan
μ	Manyetik geçirgenlik
MJ	Mega Joule
N_D	Parçacık sayısı
I_p	Plazma akımı
L	Plazma boyutu
V_p	Plazmanın bulunduğu vakum odacığının gerilimi
R_p	Plazma direnci
v_p	Plazma hızı
L_p	Plazma indüktansı
PF	Plazma odak (Plasma Focus)
z_p	Plazma tabakası yüksekliği

ω	Plazma salınım frekansı
n	Plazma yoğunluğu
$NaOH$	Sodyum Hidroksit
T	Trityum
V_0	Yükleme gerilimi
τ	Yüklü parçacıklar ile nötr atomların çarpışmaları arasında geçen ortalama zaman

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1	Plazma çeşitleri	7
Şekil 3.1	Kütle numarası ile nükleon başına bağlanma enerjisinin değişimi	12
Şekil 3.2	Farklı füzyon reaksiyonları için $\langle \sigma v \rangle$ ' nin sıcaklığa bağlı olarak değişimi	14
Şekil 4.1	PF-400J plazma odak cihazının çalıştırılmasıyla elde edilmiş olan BNC T bağlantısının görüntüsü	16
Şekil 4.2	Trieste' de bulunan UNU/ICTP PFF plazma odak cihazı	17
Şekil 4.3.a	PF-1000 cihazının bağlantı görüntüsü, b. PF-1000 cihazı	19
Şekil 4.4	Mather tip PF cihazında elektrotların ve yalıtkanın görünümü	20
Şekil 4.5	Mather tip plazma odak cihazı, elektrik devresi ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumu	23
Şekil 4.6	Plazma odak cihazı çalışmasında elde edilen akım-gerilim karakteristiği	24
Şekil 4.7	Gaz boşalma fazının oluşumu	25
Şekil 4.8	Eksenel ivmelendirme fazı	26
Şekil 4.9	Gaz boşalması ve elektrotlar boyunca ilerleyen bölgeler	27
Şekil 4.10	Plazma odak cihazı için radyal faz, iyon ve elektronların hareket yönleri	29
Şekil 4.11	4 mbar basınçta döteryum gazı kullanılarak çalıştırılan UNU/ICTP PFF cihazından elde edilen plazmanın sıkıştırıldığı safhanın görüntüsü	29
Şekil 4.12	Plazma odak cihazının elektriksel eşdeğer devre gösterimi	30
Şekil 4.13	Eksenel ivmelendirme fazı için elektrotlar ve plazma tabakası	32
Şekil 4.14	Radyal faz için elektrotlar ve plazma tabakası	34
Şekil 4.15	Radyal faz için şematik gösterim	36
Şekil 5.1	3 kJ Mather tip plazma odak cihazı (ODAK-3K)	39
Şekil 5.2	Cam vakum odacığı	40
Şekil 5.3	Anot ve poliamid yalıtkan	40
Şekil 5.4	Katot	40
Şekil 5.5	Anot, katot, yalıtkindan oluşan elektrot sistemi	41
Şekil 5.6	Anot	42
Şekil 5.7	Payreks yalıtkan	42
Şekil 5.8	Mekanik pompa	42
Şekil 5.9	Turbo moleküler pompa	42
Şekil 5.10	Güç kaynağı, kapasitör, vakum sistemi	43
Şekil 5.11	Kıvılcım aralığı	43
Şekil 5.12	Rogowski bobini	44
Şekil 5.13	Plazma odak cihazı (ODAK-3K)	44
Şekil 5.14	CR-39	48
Şekil 5.15	CR-39 yerleştirme slaytları	48
Şekil 5.16	Slaytları taşıma tablası	48
Şekil 5.17	Radosys banyo ünitesi	48
Şekil 5.18	Radosys sayım sistemi	49
Şekil 6.1	Gerilim, akım karakteristikleri ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumu	50
Şekil 6.2	Boşalım ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) akım eğrileri	51
Şekil 6.3	Akım, gerilim karakteristikleri (V=14 kV ve P=11.5 mbar)	52

Şekil 6.4	10 mbar hava basıncında 10 kV gerilim değeri için osiloskopta gözlenen akım- gerilim karakteristiği	53
Şekil 6.5	10 mbar basınç altında elde edilen gerilim-akım karakteristiği	54
Şekil 6.6.a	Katot, b. Anot, Payreks yalıtkan, c. Kıvılcım aralığı elektrotu.....	55
Şekil 6.7	CR-39 takılı plazma odak cihazı	55
Şekil 6.8	Nötron ve proton izleri (400x)	56
Şekil 6.9	Nötron ve proton izleri (100x)	56
Şekil 6.10	Basınca göre ortalama nötron verimliliği grafiği	57
Şekil 6.11	Basınca göre anizotropi oranı	58
Şekil 7.1	Yeni oluşturulan plazma odak cihazı	61

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1	Çeşitli ülkelerde bulunmakta olan PF cihazları	18
Çizelge 5.1	Sistem elemanları	45
Çizelge 5.2	Çalışmada kullanılan cihazlar	46
Çizelge 5.3	Elektriksel devre bileşenleri	46
Çizelge 6.1	Farklı basınç ve gerilim değerleri için hesaplanan akım değerleri	54

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacı (aydınlatma, ısıtma, taşımacılık, iletişim, gıda sektörü, endüstri vb.) hızla artmakta ancak bu ihtiyacı karşılayacak doğal kaynaklar hızla tükenmektedir. Ayrıca kullanılmakta olan enerji kaynaklarının bir kısmı çevresel bakımdan dezavantajlara sahiptir. Enerji üretimi için kullanılan kömür, petrol ve doğal gaz kaynaklarının tümü, sera gazı salınımına sebep olmakta ve çevreye zarar vermektedir. Kömür, petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıt rezervlerinin dünyada gittikçe azalmasından dolayı, uzun vadede düşünüldüğünde bu kaynaklar enerji kaynağı olarak yeterli olmayacaktır (Freidberg 2007).

Dünyada, doğal kaynakların tükenmesinden dolayı bilim adamları farklı enerji kaynaklarının arayışına başlamışlardır. Doğal kaynaklara alternatif olarak 1930' lu yıllardan beri kontrollü nükleer füzyon konusu ele alınmış ve bu konuda yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Füzyon, nükleer reaksiyon sunucu iki hafif çekirdeğin birleşerek daha ağır bir çekirdek oluşturmasıdır. Bu reaksiyon sonucu enerji açığa çıkmaktadır (Chen 1974, Ongena ve Van Oost 2008).

Füzyon, doğaya sera gazı salınımının olmaması, güvenli olması ve yakıt rezervlerinin bol olması gibi avantajlara sahip olması nedeniyle enerji üretimi için önemli bir kaynak olarak görülmektedir (Bartlett 2006, Freidberg 2007).

Füzyon çalışmalarında önemli bir yere sahip olan plazma, ilk olarak 1920' li yıllarda çalışılmaya başlanmıştır (Dendy 1993, Chen ve Chang 2002, Boyd ve Sanderson 2003, Bittencourt 2004). Plazma, elektron, pozitif iyon ve nötrallerden oluşan parçacık bulutuna verilen isimdir. Plazma oluşumu, plazma sıcaklığı, plazma akımı, parçacık yoğunlukları, plazma hapsedilme süreleri gibi önemli plazma parametrelerinin belirlenmesi ve plazma cihazlarının tasarımları füzyon çalışmalarında çok önemli yer tutmaktadır (Chen 1974, Scholz ve Ivanova-Stanik 2000, Castillo vd. 2002).

Plazma; gaz deşarjı, uzay fiziği, astrofizik, katıhal plazmaları, gaz lazerleri, kontrollü

termonükleer füzyon, uçak türbin bıçakları ve otomobil parçalarında kullanılan metallerin sertleştirilmesi, paslanma ve çürümeye karşı yüzeylerin nitrürlenmesi gibi endüstriyel alanlarda, plazma tabanlı parçacık hızlandırıcıları, elektronik çip yapımı, optik, tekstil, kağıt teknolojisi, sterilizasyon gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır (Chen 1974, Gruner 1984, Oğuz 1988, Pfender 1988, Proud 1991, Dendy 1993, Demirkıran ve Avcı 1999, Hermann vd. 1999, Selwyn 1999-2000, Sanchez-Lopez vd. 2000, Chen ve Chang 2002, Fang ve Xu 2002, Höcker 2002, Özdemir ve Erten 2004, Soto 2005, Erdoğan vd. 2006, Karahan vd. 2007, National Research Council 2007, Verschuren vd. 2007, Yaman vd. 2009).

Bu çalışmada plazma cihazlarından bir tanesi olan plazma odak (PF) cihazı kullanılmıştır. Plazma odak cihazı ilk olarak 1960'lı yıllarda Mather ve Filippov tarafından çalışılmaya başlanmıştır (Liu 1996, Shan 2000, Soto 2005). Birbirinden bağımsız olarak yapılan iki çalışma arasındaki fark, cihazların geometri yapılarından kaynaklanmaktadır. 1960'lı yıllardan itibaren çok geniş enerji aralığına sahip plazma odak cihazları oluşturulmuştur. Ancak temel yapı olarak bu cihazlar, Mather tip ve Filippov tip olarak isimlendirilmektedirler.

Plazma odak cihazı, yüksek yoğunluk, yüksek sıcaklık ve kısa ömre sahip plazmanın oluşturulduğu cihazlardır ve plazma dinamiği ile termodinamik süreçleri çalışmak için çok uygundur (Szydlowski 2003, Yousefi vd. 2007a). Yoğun plazma fiziği ve darbeleri radyasyon kaynaklarının yenilikçi uygulamaları, plazma odak cihazlarının güncel ve temel uygulama alanlarıdır (Raspa vd. 2004). Ayrıca astrofizik, materyal bilimi ve füzyonla ilgili temel ve uygulamalı araştırmalar için de önemli bir çalışma alanıdır (Soto 2005).

Yoğun olmayan gazlarda elektriksel boşalma yoluyla yoğun manyetik sıkıştırma altında plazmaların oluşturulduğu darbeleri çalışma yapısına sahip olan plazma odak cihazlarıyla, elektron ve iyon demetleri, elektromanyetik ışımının geniş bir spektrumu (zayıf ve güçlü X-ışını, morötesi, görünür ve kızılötesi ışımaya) ve çalışma gazı olarak döteryum kullanılması durumunda da enerjisi 2.45 MeV civarında nötronlar ile enerjisi 3.04 MeV

civarında olan protonlar elde edilebilmektedir (Raspa vd. 2004, Soto 2005).

Plazma odak cihazlarının çalışma ilkesini, $J \times B$ ile verilen Lorentz kuvveti altında akım kılıfının (current sheath) ivmelendirilmesi oluşturmaktadır. Anot ve katot aralığında bu kuvvet etkisinde ivmelenen akım kılıfı, anodun açık ucunda manyetik alan etkisiyle plazmanın sıkıştığı noktayı (pinch) oluşturacak; bunun sonucu olarak da hücredeki gaza bağlı olarak nötron, elektron, proton ve elektromanyetik spektrum oluşacaktır (Yousefi vd. 2007b). Plazma odak cihazları yüksek darbe oranlı tekrarlanabilir modda çalışabilirler; bu da plazma odak cihazlarından enerji ve füzyon ürünleri elde etmek adına önem taşır (Angeli vd. 2006).

Füzyon çalışmalarında kullanılan plazma odak cihazında çalışma gazı olarak döteryum ve/veya trityum kullanıldığı zaman, gerçekleştirilen füzyon reaksiyonları sonucunda ortaya çıkan nötron ve protonlar ölçülebilmektedir. Bu füzyon ürünlerinin deteksiyonu için CR-39 plastik iz detektörlerinin kullanılması literatürde çok rastlanılan bir durumdur (Collopy vd. 1992, Morelli vd. 1999, Springham vd. 2002, Szydlowski 2003, Castillo vd. 2007). Nükleer iz detektörleri bilim ve teknoloji alanında çok geniş ve çeşitli uygulama alanlarına sahip olduğu gibi yüksek enerjili plazma deneylerinde de sıkça kullanılmaktadırlar. Ucuz olmaları, kolay kullanımları, değişik boyutlarda kullanılabilme özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler; ayrıca vakum ortamlarında kullanılma özelliğine de sahiptirler (Szydlowski 2003).

Plazma odak cihazları basit geometrileri, darbeleri karakterleri ve düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilmektedirler (Lee vd. 1978, Conrads 1990).

Bu cihazların tam anlamıyla verimli çalışabilmesi için elektrot ve yalıtkan geometrilerinin, çalışma gazının basınç ve cinsinin, boşalma akımının artışı oranı gibi faktörlerin doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Rapp 1973, Liu 1996, Yousefi vd. 2007a).

Bu çalışma yedi bölümden oluşmaktadır. Çalışmada, TAEK-SANAEM Plazma Fiziği Laboratuvarı'nda füzyon ve plazma çalışmalarında kullanılan ODAK-3K plazma odak cihazı ve bazı deneysel sonuçlar anlatılmıştır. İkinci bölümde plazma, plazma teşhis yöntemleri konusunda kısa bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde güvenli olması, yakıt rezervlerinin bol olması ve çevreye zarar veren ürünlerinin olmaması gibi avantajlarının yanında dünyada tükenmekte olan fosil yakıtlarına en güçlü alternatif enerji kaynağı olarak görülen füzyon ve temel füzyon reaksiyonları hakkında genel bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde plazma odak cihazının yapısı, plazma odak cihazında kullanılan sistemler, plazma odak cihazının çalışma prensibi ve elektriksel eşdeğer devresi ile devre eşitlikleri irdelenmiştir. Beşinci bölümde çalışmaların yapıldığı ODAK-3K cihazının tasarımı, sistemde kullanılan malzeme ve cihazlar, cihaz ile yapılan füzyon çalışmaları anlatılmıştır. Altıncı bölümde deneyler sonucu elde edilen akım ve gerilim karakteristikleri, nötron, proton izleri, ölçekleme kanunu (scaling law) değeri ve yapılan deneyler sonucu elde edilen bazı grafikler verilmiştir. Son bölümde ise tartışma, sonuç ve ileride yapılacak çalışmalar belirtilmiştir.

2. PLAZMA

Plazma konusunda yapılan çalışmalar ilk olarak, 1920' li yıllarda Tonks (Tonks 1929, Tonks ve Langmuir 1929), Amerikalı kimyacı ve fizikçi olan Irving Langmuir ve arkadaşları (Langmuir ve Jones 1928, Dendy 1993, Chen ve Chang 2002, Boyd ve Sanderson 2003, Bittencourt 2004) tarafından yapılmıştır. İlk deneyler gaz deşarjları konusunda yapılmıştır. Yüksek akım taşıyabilen vakum tüplerinin oluşturulmasına duyulan ihtiyaçtan dolayı yapılan çalışmalarda korunumlu (shielding) olayı keşfedilmiştir (Chen 1974, Chen ve Chang 2002). Daha sonra 1930'lu yıllarda kontrollü nükleer füzyon çalışmalarının başlamasıyla plazma çalışmaları hız kazanmıştır.

Maddenin dördüncü hali olarak da bilinen plazma, en genel tanımla iyonize olmuş gazdır. Gaz fazındaki maddenin çok yüksek sıcaklıklara ısıtılmasıyla atomlar iyonlaşarak, elektron ve pozitif iyonlar oluştururlar. Ancak atomlar tamamıyla iyonize olmamakta ve bir kısmı nötr kalmaya devam edebilmektedir. Oluşan bu parçacık bulutu plazma olarak adlandırılır (Proud 1991, Boyd ve Sanderson 2003). Plazma, soğuk ve sıcak plazma olarak isimlendirilebilmektedir. Soğuk plazmalarda, gaz fazındaki atomların sadece %1-10 kısmı iyonize olmakta geri kalan kısmı ise nötr kalmaya devam etmektedir. Sıcak plazmalarda gaz tamamen iyonize olmaktadır (Chen ve Chang 2002); ancak her iyonize gaz plazma değildir. İyonize gazın plazma olarak adlandırılabilmesi için bazı kriterleri sağlaması gerekmektedir.

2.1 Plazma Kriterleri

Plazma elektriksel olarak nötr olmasına rağmen çok iyi bir iletkenidir; elektrik alan ve manyetik alanla etkileşebilir. Elektrik ve manyetik alanlar plazma içerisindeki parçacıkların yörüngelerini kontrol ederler. Yüklü parçacıkların hareketleri parçacık demetleri, dolayısıyla da manyetik alan oluşturan akım veya elektrik alan yaratabilirler (Dendy 1993, Chen ve Chang 2002, Freidberg 2007).

İyonize gazın plazma olarak tanımlanabilmesi için, plazmanın elektrostatik özelliklerini belirleyen, uzunluk ölçüsü anlamına gelen, Debye uzunluğu (Krane 2002, Lieberman ve Lichtenberg 2005), Debye hacmi içerisinde yer alan parçacık sayısı ve plazma çarpışma frekansının sağlanması gereken koşullar vardır. Birinci koşul Debye uzunluğu ile plazma boyutu, ikinci koşul Debye hacmi ile parçacık yoğunluğu, üçüncü koşul ise çarpışma frekansı ile yüklü parçacıklar ve nötr atomların çarpışmaları arasında geçen ortalama zaman arasındaki bağıntılardan oluşmaktadır.

$$a) \quad \lambda_D = \left(\frac{k_B T_e \epsilon_0}{n_e e^2} \right)^{1/2} \quad \lambda_D \ll L \quad (2.1)$$

Burada; λ_D Debye uzunluğu (Dendy 1993, Chen ve Chang 2002, Boyd ve Sanderson 2003), k_B Boltzman sabiti, T_e elektron sıcaklığı, ϵ_0 boşluğun geçirgenliği, n_e elektron yoğunluğu, e ise elektronun yükünü göstermektedir. Debye uzunluğu, plazma içerisinde yüklü bir parçacık tarafından diğer bir yüklü parçacığın elektrik alanının etkisinin hissedildiği mesafeyi verir (Bittencourt 2004). İyonlaşmış bir gazın plazma olarak adlandırılabilmesi için plazma boyutunun (L), Debye uzunluğundan çok büyük olması gerekmektedir (Chen 1974, Dendy 1993).

Plazma karakteristiği için önemli olan bir kavram, plazma ortamında elektron yoğunluğu (n_e) ve iyon yoğunluğunun (n_i) hemen hemen birbirine eşit olması anlamına gelen, plazmanın yaklaşık olarak nötr kalma (quasineutrality) durumudur. Plazma bölgesinin çevresinde plazma kılıfı (plasma sheath) olarak adlandırılan ve plazmayı temas ettiği tüm yüzeylerden ayıran bir bölge meydana gelmektedir. Bu bölgede pozitif yük yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır (Chen ve Chang 2002, Lieberman ve Lichtenberg 2005).

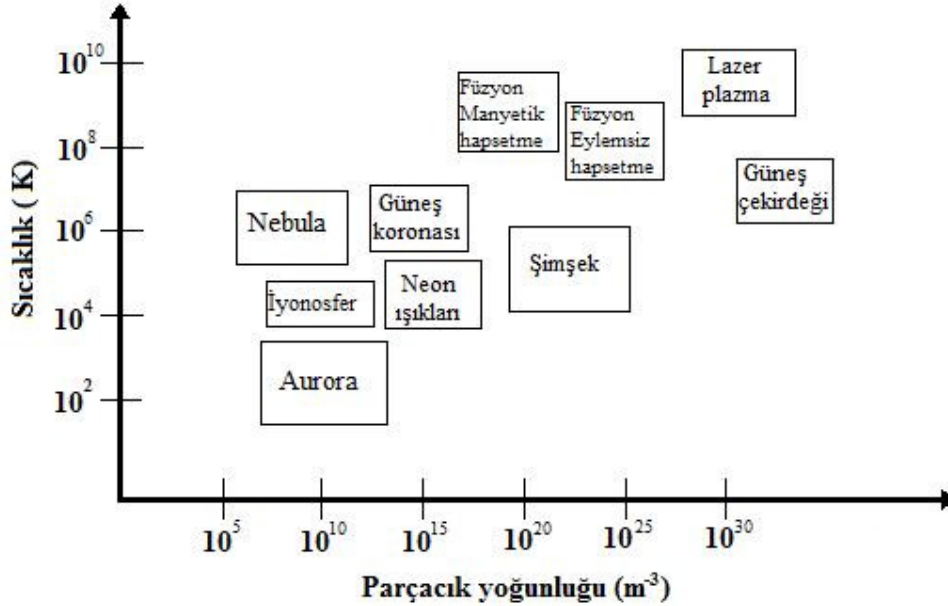
$$b) \quad N_D = \frac{4}{3} n \pi \lambda_D^3 \quad N_D \gg \gg 1 \quad (2.2)$$

Debye küresi olarak bilinen hacim içerisinde bulunan parçacık sayısı birden çok büyük olmalıdır (Chen 1974, Dendy 1993).

$$c) \quad \omega\tau > 1 \quad (2.3)$$

Yüklü parçacıklar ile nötr atomlar arasındaki ortalama çarpışma süresi τ ile ω plazma salınım frekansının çarpımı, birden büyük olmalıdır (Chen 1974, Bittencourt 2004).

Yoğunluk (n) ve sıcaklık (kT) plazma için iki önemli parametredir. Evrende farklı yoğunluk ve sıcaklıklara sahip olan bir çok plazma çeşidi vardır. Plazmaların bir kısmı laboratuvar ortamında oluşturulur; ancak yıldızlar ve uzay plazmaları gibi doğal plazmalar da vardır. En önemli plazma güneştir. Plazma çeşitlerinin bir kısmı, sahip oldukları yoğunluk ve sıcaklık aralıkları ile Şekil 2.1’de verilmiştir (Nishikawa ve Wakatani 2000, Anonymous 2010e).



Şekil 2.1 Plazma çeşitleri

2.2 Plazma Teşhis Yöntemleri

Plazma oluşumu, plazma sıcaklığı, elektron sıcaklığı, iyon sıcaklığı, plazma yoğunluğu, elektron yoğunluğu, iyon yoğunluğu, plazma akımı, plazma hapsedilme süreleri gibi önemli plazma parametrelerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli teşhis yöntemleri kullanılmaktadır. Kullanılan bu yöntemler ile uzaktan teşhis ve bölgesel teşhis yapılarak ölçümler alınmaktadır. Uzaktan teşhis yöntemlerinde, plazma ortamıyla temas etmesi gereken bir cihaz yoktur; ancak plazmayı gözleyebilmek ve ölçüm alabilmek için plazma sistemlerinde pencerelere ihtiyaç vardır. Bölgesel teşhis yöntemlerinde ise plazma ortamına sondalar sokularak ölçüm alınmaktadır. Ölçülen parametre özelliklerini değiştirmemesi için sondalar mümkün olduğunca küçük olmalıdır (Chen ve Chang 2002). Kullanılan plazma teşhis yöntemleri, nanometrelerden santimetre mertebelerine kadar değişen, çok geniş dalga boyu aralığına sahip fiziksel metotlara dayanmaktadır (Donne 2008).

- **Spektroskopi:** Bu yöntemle birçok plazma parametresi hakkında bilgi edinilebilir. İyon ve elektron sıcaklıkları, plazma içerisindeki alanlar hakkında bilgi veren plazma rotasyonu (plasma rotation), parçacık akıları ve hız dağılımları bu parametrelerden birkaçıdır (Pospieszczyk 2008). Spektroskopi yöntemlerinden olan optik emisyon spektroskopisinde (OES) görünür ışık bir lens yardımıyla toplanır ve spektrometrenin yarık levhası üzerinde odaklanır. Kullanılan detektörler fotodiyot, fotoçoğaltıcı veya optiksel çok kanallı analizör olabilir. Farklı spektral çizgilerin şiddetlerinin karşılaştırılmasıyla elektron sıcaklık ve yoğunluğu belirlenebilir (Chen ve Chang 2002).
- **Mikrodalga teşhisleri:** 1 GHz ile 3 THz frekans aralığında kullanılmaktadırlar. Reflektometre ve interferometre, bu grup altında bulunan teşhis yöntemleri arasındadır. Reflektometrede kesilme frekansı altında frekans değerine sahip olan dalga plazmaya gönderilir ve bu dalga kritik yoğunluk tabakası olarak adlandırılan bölgeden yansır. Bu dalgadaki faz değişimi ölçülerek tabakanın pozisyonu ölçülebilir. İnterferometrede, mikrodalga ışınları bir pencereden huni anten

yardımıyla plazma üzerine gönderilir ve plazma ortamında ilerlerler. Plazma yoğunluğu nedeniyle mikrodalga sinyallerinin fazı değişir. Dalganın polarizasyon düzlemindeki değişimleri ölçülerek plazmadaki manyetik alan, dolayısıyla da akım yoğunluğu hakkında bilgi edinilebilir. (Chen ve Chang 2002, Donne 2008).

- **Lazerle oluşturulan floresans (Laser induced fluorescence, LIF):** İyon sıcaklığını ölçmekte kullanılmaktadır. İyonlar, lazerle uyarılmış duruma geçirilirler. Uyarılmış iyonlar farklı bir frekansta ışımaya yaparlar ve bu ışık, bir lens yardımıyla toplanır. Ekipmanlarının büyük ve pahalı olması, ayrıca kurulumunun zor olması nedeniyle çok az laboratuvarında çalışılmaktadır (Chen ve Chang 2002).
- **Langmuir sondası (Langmuir probe):** Langmuir sondası kullanılarak plazma potansiyeli, iyon yoğunlukları, elektron enerjileri hesaplanabilir (Aflori ve Sullivan 2005). Plazma parametrelerinin ölçümünde kullanılan ve plazma ile doğrudan temas eden Langmuir sonda, plazma içerisine yerleştirilen izolasyonu sağlanmış bir iletkenidir. Sondanın ucu yüksek sıcaklıklara dayanıklı maddelerden, genellikle 0.1-1 mm çaplı tungsten çubuk veya telden yapılmaktadır. Çubuk, sondayı plazma etkisinden korumak için genellikle aluminadan yapılan, ince seramik bir tüp içerisine yerleştirilir. Ayrıca plazma karakteristiğini korumak için seramik tüp mümkün olduğu kadar ince olmalıdır. Sondanın ucuna gerilim uygulanarak buna karşılık gelen akım değerleri elde edilir ve akım-gerilim grafiği çizilerek plazma potansiyeli ve elektron sıcaklığı belirlenir (Chen ve Chang 2002).
- **Manyetik sonda:** Plazma içerisindeki RF manyetik alanlarının dalgalanmaları manyetik sonda ile ölçülebilmektedir. Manyetik sonda, telden sarılmış küçük (~2mm çapında) bir bobindir. Yüklü parçacıklara doğrudan maruz kalmaması için genellikle seramik ve cam ile kaplanmaktadır (Chen ve Chang 2002).
- **Thomson saçılması:** Thomson saçılması yöntemiyle plazmadaki elektron yoğunluk (n_e) ve sıcaklıkları (T_e) ölçülebilir. Darbeli plazma cihazlarında ve tokamaklarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Lazer demetinin plazma üzerine gönderilerek

saçılan ışının spektrumunun alınması ve incelenmesi ilkesine dayanır. Lazer olarak genellikle Ruby ve Nd:YAG lazerler, detektör olarak foto çoğaltıcılar (PMT) kullanılmaktadır (Campos vd. 1998, Rajesh vd. 2000, Warner ve Hieftje 2002).

3. FÜZYON

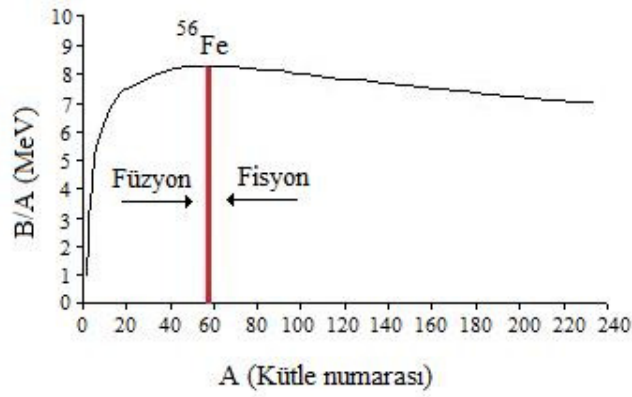
Geleceğin enerji ihtiyacını karşılama gereksinimi nedeniyle füzyon çalışmaları, enerji araştırma konularında önemli bir yer tutmaktadır. Füzyon, güvenli olması, yakıt rezervlerinin bol olması ve çevreye zarar veren ürünlerinin olmaması nedeniyle dünya çapında geçerli olarak görülen bir enerji kaynağıdır (Bartlett 2006, Freidberg 2007). Özellikle Avrupa ülkeleri son yıllarda kaynaklarının büyük bir kısmını füzyon çalışmalarına ayırmaktadır.

Dünyada füzyon çalışmaları ilk olarak 1930' lu yıllarda başlamıştır. Bu tarihten itibaren hemen hemen her sanayileşmiş ülkede, füzyon fizik laboratuvarları kurulmaya başlanmıştır. 1950' li yılların ortalarında Sovyetler Birliği, İngiltere, Amerika, Fransa, Almanya ve Japonya' da füzyon makineleri oluşturulmaya ve çalıştırılmaya başlanmıştır. Füzyon konusunda yapılan ilk büyük buluş, 1968 yılında Sovyetler Birliği' nde oluşturulan tokamak cihazıdır. Bu cihazda füzyon çalışmalarında önemli yer tutan iki temel kriter olan, plazma hapsedilmesi ve gerekli sıcaklık seviyesine ulaşılmıştır. Bu aşamadan sonra tokamaklar, füzyon çalışmalarında yer alan en önemli cihazlar olmuştur (Anonymous 2010b). 1981 yılında Almanya' da kurulan TEXTOR, 1983 yılında İngiltere' de kurulan JET, 1984 yılında Amerika' da kurulan TFTR, 1986 yılında Japonya' da kurulan JT-60 dünyada çalışılan tokamaklardan birkaçıdır (Krane 2002, Bartlett 2006, Anonymous 2007).

Füzyon (nükleer kaynaşma), iki hafif çekirdeğin, nükleer reaksiyon sonucunda dışarıya enerji açığa çıkararak daha ağır bir çekirdek oluşturması olayıdır. Fisyon ise füzyonun tersi olarak, bir nötronun, uranyum gibi ağır bir element atomunun çekirdeğine çarparak yutulması, bunun sonucunda bu atomun kararsız hale gelerek daha küçük iki ayrı çekirdeğe bölünmesi reaksiyonudur. Bir çekirdeğin bölünmesinde enerji bakımından öncelik, nükleon başına bağlanma enerjisinden anlaşılabilir. Birçok çekirdeğin ortalama bağlanma enerjisi, nükleon başına 8 MeV civarındadır (Krane 2002).

Kütle numarası ile nükleon başına bağlanma enerjisinin değişimini gösteren grafik,

Şekil 3.1 ile verilmektedir. Eğri $A=56$ yakınlarında bir maksimum değere ulaşır; burada çekirdekler çok sıkı bağlıdır. Grafikte de belirtildiği gibi füzyon olayı, $A=56$ ' dan daha küçük çekirdek bölgesinde, fisyon ise $A=56$ 'dan daha büyük çekirdek bölgesinde meydana gelir (Krane 2002).



Şekil 3.1 Kütle numarası ile nükleon başına bağlanma enerjisinin değişimi

Füzyon ile fisyon karşılaştırıldığında, füzyon için gerekli hafif çekirdeklerin bol miktarda bulunmaları ve kolayca elde edilebilir olmaları, füzyon ürünlerinin genellikle hafif çekirdek olmaları ve radyoaktif ağır çekirdeklerden daha kararlı olmaları nedeniyle füzyon daha avantajlıdır. Füzyonun fisyonu göre dezavantajı ise hafif çekirdeklerin, füzyon olayını gerçekleştirebilmek için Coloumb engelini aşmak zorunda olmalarıdır (Krane 2002). Termonükleer füzyonda, ısı enerjisi kullanılarak bu problem aşılmaktadır. Bu nedenle sıcaklık, füzyon başlangıcı için önemli bir parametredir. Füzyon için önemli problemlerden bir tanesi de plazmanın sıkıştırılması olayıdır. Günümüzde plazma sıkıştırılması iki yöntemle yapılmaktadır. Birinci yöntem olan eylemsizlik hapsedilmesinde lazer ve parçacık demetleri kullanılarak yakıt peletleri sıkıştırılmaktadır. İkinci yöntem olan manyetik hapsedmede ise manyetik alanlar kullanılarak plazma sıkıştırılması yapılmaktadır (Chen 1974, Dendy 1993).

Füzyon, karbondioksit ve sera gazı salınımının olmaması, hava kirliliğine sebep olmaması, yakıtının limitsiz olması ve güvenli olması nedeniyle günümüz enerji gereksinimi karşılama avantajlı bir yöntemdir (Freidberg 2007). Ayrıca kömür, petrol

veya doğal gazın yanması gibi kimyasal reaksiyonlara oranla dört milyon kat daha güçlü bir enerji kaynağıdır (Anonymous 2010b).

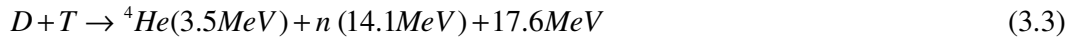
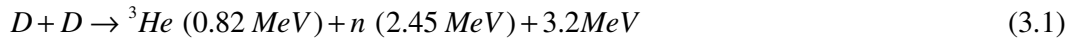
3.1 Temel Füzyon Reaksiyonları

Temel füzyon reaksiyonları döteryum-döteryum (D-D) ve döteryum-trityum (D-T) füzyon reaksiyonlarıdır. Döteryum füzyon reaksiyonları, deneysel olarak 1934 yılında Rutherford, Oliphant ve Harteck tarafından gerçekleştirilmiştir (Dendy 1993).

Döteryum, hidrojen çekirdeğinin kararlı izotopu olup bir proton ve bir nötrondan meydana gelmektedir ve deniz suyunda bol miktarda bulunmaktadır (Freidberg 2007). Döteryum radyoaktif değildir dolayısıyla zararsızdır; simgesel olarak ^2H şeklinde gösterilmektedir.

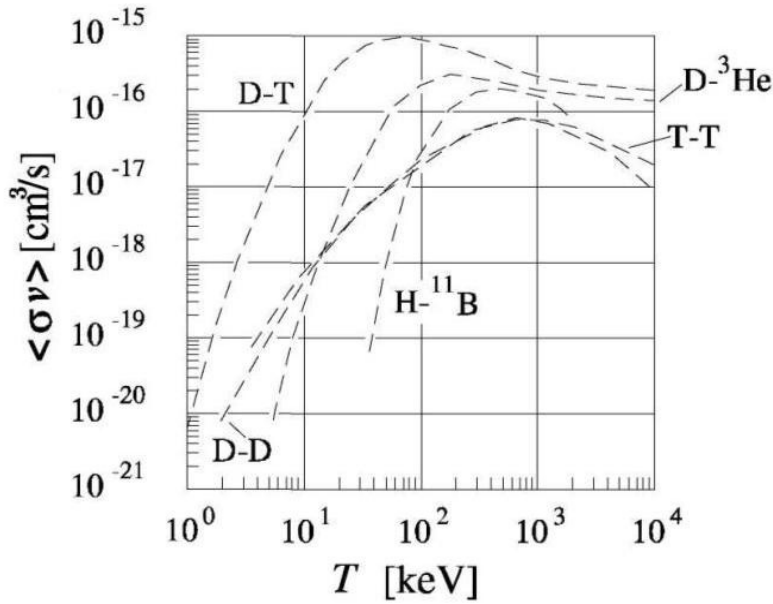
Hidrojen çekirdeğinin diğer bir izotopu olan trityum ise bir proton ve iki nötrondan meydana gelmektedir ve Lityumdan elde edilmektedir. Trityum radyoaktiftir ve β bozunması yaparak Helyum-3'e dönüşür. Trityumun yarılanma ömrü 12.3 yıldır (Freidberg 2007, Anonymous 2010d); simgesel olarak ^3H şeklinde gösterilmektedir.

Temel füzyon reaksiyonları denklem (3.1, 3.2, 3.3) ile verilmiştir (Chen 1974, Boyd ve Sanderson 2003, Ongena ve Van Oost 2008).



Füzyon reaksiyonlarının gerçekleşebilmesi için belirli sıcaklıklara ulaşılabilmesi gereklidir. Bu sıcaklıklar D-T reaksiyonu için 4 keV ve D-D reaksiyonu için 40 keV mertebesi civarındadır (Krane 2002).

D-T reaksiyonu sonucu açığa çıkan enerji, D-D reaksiyonuna göre daha yüksektir ve D-T reaksiyonu daha hızlı oranda gerçekleşir. D-T reaksiyonun tesir kesiti D-D reaksiyonun tesir kesitinden daha yüksektir. Bu avantajlardan dolayı D-T reaksiyonu, D-D reaksiyonuna göre daha üstündür. Ancak trityum kaynakları kısıtlı olduğundan yakıt olarak döteryum kullanılmaktadır (Freidberg 2007). Şekil 3.2’de bazı füzyon reaksiyonları için reaksiyon oran katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Burada σ füzyon reaksiyonları tesir kesitlerini, v ise bağıl hızı göstermektedir (Van Oost ve Rebhan 2008). Şekil 3.2’de görüldüğü gibi düşük sıcaklıklarda (~10 keV) D-T reaksiyonu, diğer reaksiyonlardan daha elverişlidir (Krane 2002, Van Oost ve Rebhan 2008).



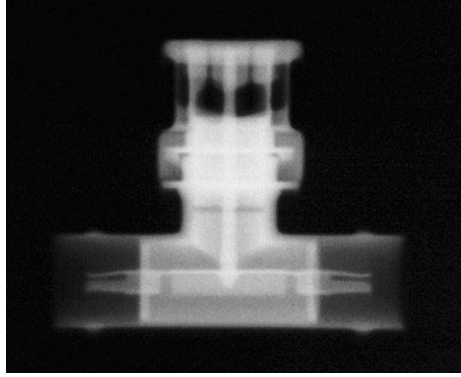
Şekil 3.2 Farklı füzyon reaksiyonları için $\langle \sigma v \rangle$ nin sıcaklığa bağlı olarak değişimi (Van Oost ve Rebhan 2008)

Füzyon enerjisinden daha verimli olarak yararlanılabilmesi için sıcaklığın yanında n (plazma yoğunluğu) ve τ (hapsetme zamanı) için de uygun koşulların sağlanması gerekmektedir. İyon yoğunluğu ile hapsetme zamanının çarpımı, Lawson kriteri olarak adlandırılır. $n\tau$ çarpımının minimum değeri D-D reaksiyonu için $10^{16} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ ve D-T reaksiyonu için $10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ tür (Chen 1974, Bittencourt 2004).

4. KURAMSAL TEMELLER

4.1 Plazma Odak Cihazı

Plazma odak, eksen boyunca kısa süreli, yüksek yoğunluklu plazma bölgesi oluşturan eş-eksenli silindirik elektrotlar arasında bulunan, düşük basınçlı gazda plazmanın sıkıştırıldığı nokta (pinch) oluşturan bir cihazdır. Bu cihazlarla yüksek parçacık yoğunluğu, yoğun radyasyon yayımı, yüklü ve nötr parçacık üretimi gerçekleştirilir. Bu nedenle nötron, proton üretimi, x-ışını üretimi, elektron demeti hızlandırılması, nötron ve röntgen ışını görüntülemesi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Conrads 1990, Soto 2005). Astrofizik, materyal bilimi ve füzyonla ilgili temel ve uygulamalı araştırmalar için de önemli bir çalışma alanıdır (Soto 2005). Şekil 4.1'de Şili'de bulunan CCHEN' de (Comisi'on Chilena de Energ'ia Nuclear) yapılmış olan PF-400J plazma odak cihazının çalıştırılmasıyla elde edilmiş olan BNC T bağlantısının görüntüsü verilmiştir (Soto 2005).



Şekil 4.1 PF-400J plazma odak cihazının çalıştırılmasıyla elde edilmiş olan BNC T bağlantısının görüntüsü (Soto 2005)

Plazma odak cihazı ilk olarak 1960'lı yıllarda birbirinden bağımsız olarak Mather ve Filippov tarafından çalışılmaya başlanmıştır. 1960'lı yıllardan itibaren enerjileri 1 kJ mertebesinde 1 MJ mertebesine kadar değişen birçok plazma odak cihazı oluşturulmuştur (Shan 2000, Soto 2005). Şekil 4.2'de Trieste'de bulunan UNU/ICTP PFF (United Nations University/International Center for Theoretical Physics Plasma

Fusion Facility) plazma odak cihazı gösterilmiştir. Darbeli yüksek yoğunluklu plazmaları çalışmak amacıyla kurulmuş olan bu cihaz daha sonra ışınım verimi ve uygulamaları için geliştirilmiştir (Lee 1998a).



Şekil 4.2 Trieste’de bulunan UNU/ICTP PFF plazma odak cihazı (Lee 1998a)

Plazma odak cihazlarında yapılan çalışmalarda 50 ns varolabilen, yaklaşık olarak 1 keV sıcaklığa ve 10^{19} cm^{-3} yoğunluğa sahip olan plazma üretilmiştir (Bernstein vd. 1969, Liu 1996).

Mather tip ve Filippov tip cihazlar, akım kılıfı, nötron salınımındaki ölçekleme kanunu, iyon ve elektron demetleri, x- ışını salınımı nedeniyle benzerlikler göstermektedir. İki cihaz arasındaki fark ise elektrot boyut oranlarından kaynaklanmaktadır. Elektrot boyut oranı, iç elektrotun çapının, uzunluğuna (anot çapı/anot boyu) bölünmesiyle elde edilir. Bu oran Filippov Tip plazma odak cihazı için genellikle 5’den büyük, Mather Tip plazma odak cihazı için 0.25’den küçüktür (Shan 2000). Plazma odak cihazlarının verimli bir şekilde çalışabilmesi için elektrot boyutları uygun bir şekilde seçilmelidir.

Her iki tip PF cihazı, çalışmaları sırasında temel olarak üç safha içerir (Liu 1996, Lee vd. 1998, Scholz ve Ivanova-Stanik 2000, Shan 2000, Castillo vd. 2002, Stepniewski vd. 2006):

- Birinci safha, akım kılıfının oluşumunu sağlayan gaz boşalma (gas breakdown) fazıdır.
- İkinci safha, plazmanın oluştuğu ve Lorentz kuvvetiyle plazmanın, elektrotların açık uçlarına doğru itildiği aksel ivmelendirme fazıdır.
- Üçüncü safha ise akım kılıfının, plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) haline dönüştüğü radyal fazdır.

Plazma odak cihazlarının çalışma performanslarını artırmak için literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Çalışma performansını artırmak için yalıtkanın cinsi, uzunluğu, anot ve katodun şekilleri, konumları, uzunlukları gibi parametrelerin doğru olarak belirlenmesi gereklidir (Zakaulah vd. 1997, Yousefi vd. 2007a, Lee vd. 2008). Çalışılan gaz basıncı, uygulanan gerilim ve akım değerleri, verimli bir nükleer reaksiyon gerçekleşmesi için uygun plazma ortamının elde edilmesinde büyük rol oynamaktadır (Kurt vd. 2009).

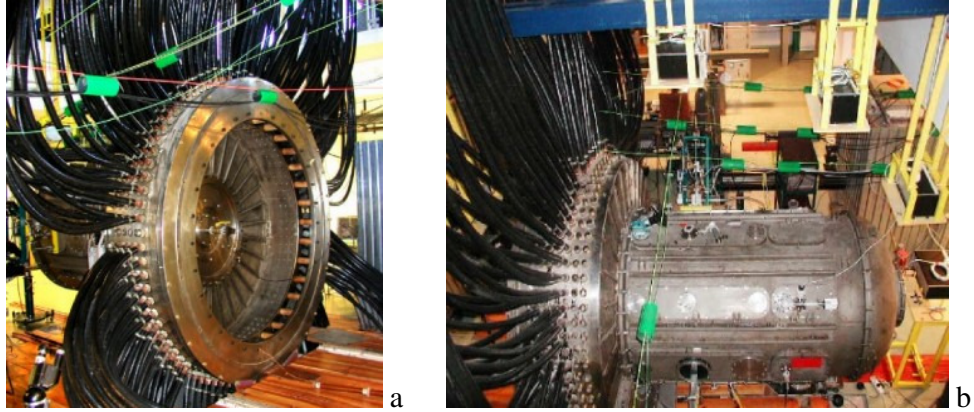
Günümüze kadar farklı boyut ve enerjilerde birçok plazma odak cihazı oluşturulmuştur. Oluşturulan cihazlar çoğunlukla Mather Tip geometriye sahiptir. Çeşitli ülkelerde bulunmakta olan cihazların bir kısmı Çizelge 4.1 ile verilmiştir (Soto 2005).

Çizelge 4.1 Çeşitli ülkelerde bulunmakta olan PF cihazları

Plazma odak cihazı	Enerji	Ülke
PF-1000	1 MJ	Polonya
PF-360	360 kJ	Polonya
SPEED2	70-100 kJ	Almanya-Şili
NG1 ve PACO	2-7 kJ	Arjantin
PF-400	400 J	Şili
UNU/ICTP PFF	3 kJ	İtalya
NX2	3.2 kJ	Singapur

Ayrıca İran'da 5.5 kJ, Japonya'da 7 kJ, İngiltere'de 4 kJ, Hindistan'da 3.3 kJ, Pakistan'da 2.3 kJ enerjilere sahip olan PF cihazları bulunmaktadır (Zakaulah 1997, Srivastava 1998, Soto 2005).

Dünyada mevcut olan en büyük plazma odak cihazı, 1MJ enerji kapasitesine sahip olan PF-1000 plazma odak cihazıdır ve Polonya'da bulunmaktadır. Bu cihaz ile çalışma gazı olarak döteryum kullanılarak gerçekleştirilen füzyon çalışmalarında, sistemin çalışmasına başına elde edilen nötron sayısı 5×10^{11} olarak elde edilmiştir. Sistemde 2.5 m uzunluğunda ve 1.4 m çapında vakum odacığı, 60 cm uzunluğunda ve 23 cm çapında bakır malzemeden yapılmış olan anot, 60 cm uzunluğunda ve 40 cm çapında 24 adet paslanmaz çelik malzemeden oluşan katot ve 288 adet yükleme kapasitörü kullanılmıştır. Şekil 4.3a,b' de PF-1000 cihazı ve bağlantı görüntüleri verilmiştir (Anonymous 2010c, 2010, Lee ve Saw 2010).



Şekil 4.3.a PF-1000 cihazının bağlantı görüntüsü, b. PF-1000 cihazı

İtalya'da bulunan UNU/ICTP PFF cihazı ile yapılan füzyon çalışmalarında nötron verimi cihazın çalışması başına 10^8 nötron olarak bulunmuştur (Lee 1998a).

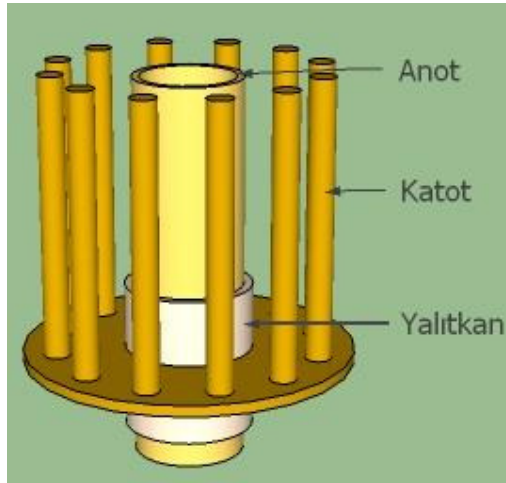
4.2 Plazma Odak Cihazında Kullanılan Sistemler

Anot ve katottan oluşan elektrot sistemi, vakum sistemi, enerji yükleme sistemi ve ölçüm sistemi, plazma odak cihazlarında kullanılan temel sistemlerdir.

4.2.1 Elektrot sistemi

Plazma odak cihazında eşeksenli silindirik iki elektrot kullanılmaktadır. Elektrotlar genellikle paslanmaz çelik, bakır ve pirinç malzemeden oluşturulmaktadır (Toepfer vd. 1971, Kies 1986, Feugeas 1989, Zakaulah vd. 1997). İç elektrot olan anot silindirik tüp şeklinde, dış elektrot olan katot ise, sayısı altı ile yirmi dört arasında değişen silindirik çubuklardan yapılmaktadır (Liu 1996).

Elektrotlar birbirinden payreks, cam, Al_2O_3 (alümina), PVC (Polivinil klorür), teflon veya seramik malzemelerden yapılan yalıtkan ile ayrılmaktadır (Toepfer vd. 1971, Donges vd. 1980, Krompholz vd. 1980, Kies 1986, Feugeas 1989). Şekil 4.4'de Mather Tip plazma odak cihazı için elektrotların ve yalıtkanın görünümü verilmektedir.



Şekil 4.4 Mather tip PF cihazında elektrotların ve yalıtkanın görünümü

Yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan plazma odak cihazlarında, ivmelendirilen plazma tabakasının homojen olması gerekmektedir. Bu nedenle elektrotlar arasına yerleştirilen yalıtkan, akımın simetrik yapıya sahip olarak elektrotlar arasında akmasını sağlamak açısından plazma odak cihazı çalışmalarında önemli bir yer tutar (Donges vd. 1980).

4.2.2 Vakum odacığı

Anot, katot ve yalıtkindan oluşan elektrot sistemini içermektedir. Genellikle paslanmaz çelik ve cam malzemeden oluşturulmaktadır (Toepfer vd. 1971, Feugeas 1989); ancak alüminyum gibi metal vakum odacığı da yapılan çalışmalarda kullanılmıştır (Bernstein vd. 1969); çok çeşitli boyutlarda olabilmektedir.

4.2.3 Vakum sistemi

Mekanik ve turbo vakum pompaları, vakum vanaları ve sistemde kullanılacak olan çalışma gazını içermektedir. Sistemde çalışma gazı olarak hidrojen, döteryum, azot, neon, argon veya bu gazların karışımları kullanılmaktadır (Toepfer vd. 1971, Bernard vd. 1975, Donges vd. 1980, Kies 1986, Feugeas 1989, Liu 1996, Soto 2005). Plazma odak cihazlarında, çalışılan gaz basıncı genellikle 0.5 mbar ile 20 mbar aralığında olmaktadır (Bernstein vd. 1969, Rapp 1973, Krompholz vd. 1980, Conrads 1990).

4.2.4 Enerji yükleme sistemi

Plazma odak cihazına enerji aktarımı, kapasitörler yardımıyla yapılmaktadır. Kapasitörleri seri ve paralel şekilde bağlayarak farklı enerji değerlerinde farklı deney düzenekleri ile çalışmak mümkün olmaktadır (Bernstein vd. 1969, Toepfer vd. 1971, Conrads 1990). Kapasitörde enerji depolamak için ise yüksek gerilim güç kaynakları kullanılmaktadır. Güç kaynağı yardımıyla kapasitörde depolanan enerji, tetikleme ünitesi (trig pulse generator) ve füzyon plazma çalışmalarında kullanılan yüksek gerilim-yüksek akım anahtarları olarak bilinen kıvılcım aralıkları (spark gap)

kullanılarak elektrot sistemine aktarılmaktadır (Feugeas 1989, Bruzzone vd. 1990, Conrads 1990).

Yüksek gerilim emniyeti, yüksek akım kapasitesi, geniş gerilim çalışma aralığı, düşük indüktans ve uzun süre kullanılabilme özelliklerine sahip olmalarından dolayı ise kıvılcım aralıkları kullanılmaktadır (Hussain ve Zakaullah 2007).

Kıvılcım aralıkları genellikle bakır malzemeden yapılan iki elektrottan oluşmaktadır. Aralarında birkaç milimetre mesafe olacak şekilde iki elektrot karşılıklı olarak yerleştirilmektedir ve iki elektrot arasında hava bulunmaktadır. Elektrotlara gerilim uygulandığında iki elektrot arasında bulunan hava iyonize olmakta, yüksek sıcaklıklara ısıtılmakta ve iyi bir iletken olmaktadır. Oluşan bu iyonize hava ortamı boyunca akım akar ve iletkenlik sağlanır.

İki elektrot arasındaki mesafe ile kıvılcım aralığı ateşleme oranı ters orantılı olarak değişmektedir. Elektrotlar arası mesafe arttıkça boşalma gerilimi de (breakdown voltage) artmaktadır. Dolayısıyla kapasitörü yüklemek için daha yüksek gerilim kullanılmalıdır. Kapasitörün yüklenmesi için geçen süre artmakta, bu da kıvılcım aralığının ateşlenme oranını azaltmaktadır (Anonymous 2010a).

4.2.5 Ölçüm sistemi

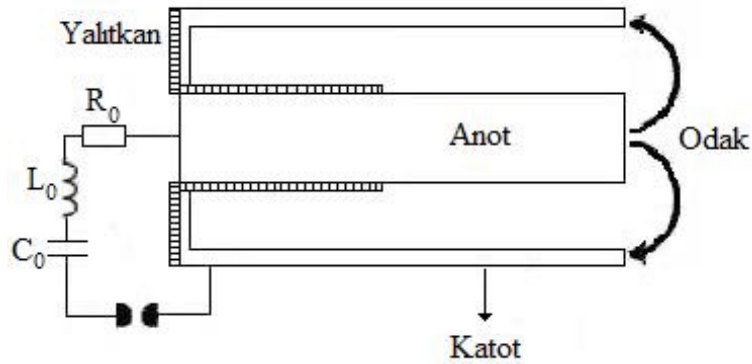
Plazma odak cihazında yapılan çalışmaların sonuçlarını elde edebilmek için Rogowski bobinleri, yüksek gerilim sondaları ve osiloskoplar kullanılmaktadır.

Plazma odak cihazındaki boşalma ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) akımlarını ölçmek için Rogowski bobinleri kullanılmaktadır (Feugeas 1989). Rogowski bobini, bakır telin manyetik olmayan bir çekirdek üzerine sarılmasıyla elde edilir. Hava çekirdekli bobin olan Rogowski bobini teorisi 1912 yılında tanımlanmıştır (Ward ve Exon 1993). Halka şeklinde olup, sert veya esnek yapıda olabilmektedir. Rogowski

bobininin şekli ölçüm değerlerinde etkili olmadığından, çok farklı konumlardaki akım değerlerini ölçmek için kullanılmaktadır (Murgatroyd vd. 1991). Amper mertebesinden milyon amper mertebesine kadar olan geniş akım aralıklarında, alternatif akım değerlerini ölçmek için kullanılabilir (Ramboz 1996). Üzerinden akım geçen bir iletken çevresine Rogowski bobini yerleştirildiğinde bobin, akım değişimiyle orantılı olarak bir gerilim meydana getirir (Ramboz 1996). Bu gerilimin integrali ile ölçülecek olan akım değeri orantılıdır (Donne 2008). Gerilim değerini ölçmek için yüksek gerilim sondası (gerilim bölücü) ve çalışmalarda elde edilen akım gerilim karakteristiklerini gözlemek için osiloskop kullanılmaktadır.

4.3 Mather Tipi Plazma Odak Cihazının Çalışma İlkesi

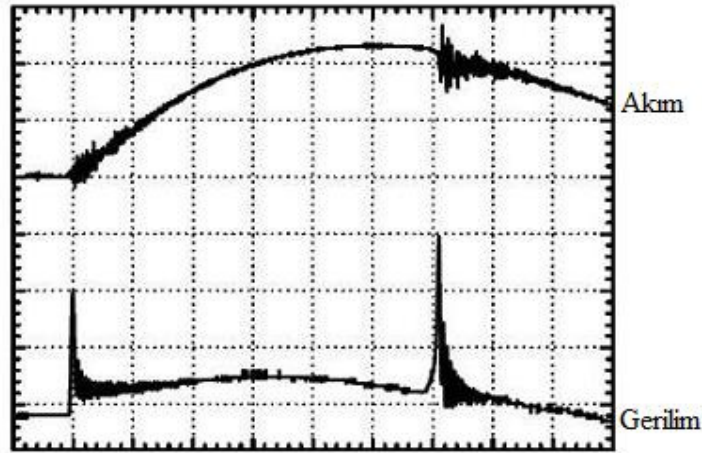
Bu çalışmada Mather tip plazma odak cihazı incelenecektir. Şekil 4.5’de Mather tip plazma odak cihazı, elektrik devresi ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) yani odak oluşumu gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Mather tip plazma odak cihazı, elektrik devresi ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumu (Soto 2005’den değiştirilerek alınmıştır)

Cihaz, iç elektrot olan anot tabanından itibaren eş-eksenli yalıtkan ile kaplanmıştır. Kapasitörde depolanan enerji kıvılcım aralığı yardımı ile elektrotlara aktarılır. Boşalma yalıtkan yüzeyinin üzerinde başlar ve plazma tabakası ilk olarak burada oluşur. Akım tarafından oluşturulan manyetik alan etkisiyle plazma tabakası, elektrotların ucuna

doğru eksenel olarak ivmelendirilir. Akım kılıfı iç elektrotun açık ucuna ulaştıktan sonra, anodun önünde küçük bir bölgede (odak) plazma sıkıştırılır. Kısa bir süre sonra kararsızlıklardan dolayı plazma kolonu bozulur. Plazma odak cihazlarının birçoğunda bu safhaların hepsi birkaç mikro saniyede tamamlanır; ancak son zamanlarda çalışılan hızlı plazma odak cihazlarında bu süre 500 ns'den daha kısadır. En iyi çalışma performansının sağlanabilmesi için plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) ile akım tepe değeri çakışmalıdır. Güç kaynağının enerjisine ve cihazın boyutlarına bağlı olarak, (pinch) akım değeri kiloamper mertebesinde mega amperler mertebesine kadar değişim göstermektedir (Soto 2005). Şekil 4.6'da Mather tip plazma odak cihazı çalışmasında elde edilen akım-gerilim karakteristiği ve plazmanın sıkıştığı nokta oluşumu gösterilmiştir.

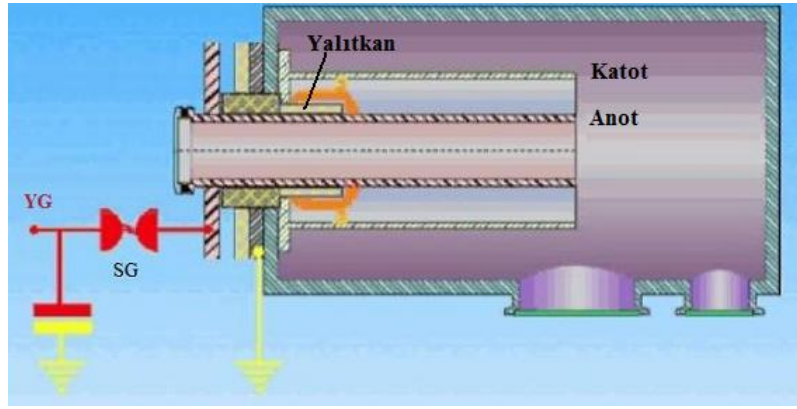


Şekil 4.6 Plazma odak cihazı çalışmasında elde edilen akım-gerilim karakteristiği (Liu 1996' den değiştirilerek alınmıştır)

Mather tip plazma odak cihazında yapılan çalışmalarda oluşan temel üç faz daha ayrıntılı olarak üç alt bölümde incelenmiştir.

4.3.1 Gaz boşalma fazı

Plazma odak cihazı, uygun bir basınçta istenilen çalışma gazı ile doldurulur. Sisteme güç kaynağından yüksek gerilim uygulandığında vakum odacığındaki elektrotlar arasında simetrik elektriksel bir boşalma başlar ve boşalma akımının ilerleyebileceği plazma ortamı oluşur (Shan 2000). Gaz boşalma fazının oluşumu Şekil 4.7 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.7 Gaz boşalma fazının oluşumu

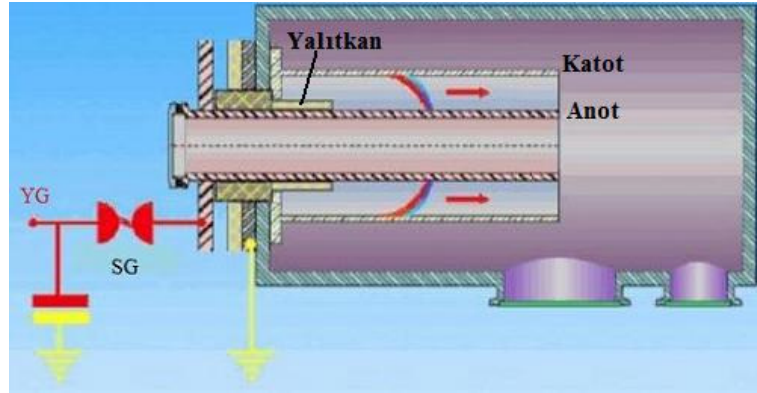
Sisteme yüksek gerilim uygulanmadan önce serbest yüklü parçacıklar elektrot ve yalıtkan yüzeylerine doğru sürüklenirler. Yalıtkan civarında bulunan serbest elektronlar, kullanılan malzemenin dielektrik sabiti ve yüksek yüzey özdirencinden dolayı yalıtkan yüzeyinde negatif potansiyel oluşturma eğilimindedirler. Elektrotlara yüksek gerilim uygulandığında yalıtkan yüzey boyunca boşalma başlamadan önce nanosaniye mertebesinde zaman gecikmesi gözlenmektedir (Donges vd. 1980). Bu süre boyunca ortamdaki gazın iyonizasyonu ve metal kenarlardan yayılan alanlardan dolayı elektronlar oluşturulurlar ve bu elektronlar uygulanan gerilim polaritesine bağlı olarak, radyal şekilde yöneltilmiş olan elektrik alan çizgileri boyunca iç elektrot ve yalıtkan yüzeyine veya dış elektrota doğru hızlandırılırlar. Boşalma geliştiğinde yüksek elektrik alan boşalmanın önünde kalırken, yüzey kapasitansı aşamalı olarak yüklenir ve bu durum da yalıtkan boyunca iyonizasyonun önde yayılmasına yardım eder. Boşalma yalıtkanın sonuna ulaştığında her iki elektrot ile etkileşmiş olur. Belirli bir zamandan

sonra boşalma iletkenliği yeterli seviyeye ulaşır ve boşalma plazma tabakasına dönüşür (Liu 1996).

Plazma odak cihazında oluşan yüksek akım boşalması, çalışma gazına, elektrot ve yalıtkan parametrelerine, akım artış oranına bağlı olarak değişim göstermektedir (Donges vd. 1980, Krompholz vd. 1980, Kies 1986, Feugas 1989).

4.3.2 Eksenel ivmelendirme fazı

Eksenel ivmelendirme fazında, manyetik olarak sürülen plazma tabakası elektrotların açık uçlarına doğru elektrot eksenini boyunca ivmelendirilir ve anodun uç noktasına ulaştığı anda bu faz sona erer. Bu faz, boşalma süresinin $T/4$ kadarlık dilimi kadar zaman almaktadır ve genellikle $1\sim 4\ \mu s$ kadar sürmektedir (Shan 2000). Eksenel ivmelendirme fazı Şekil 4.8 ile gösterilmektedir.



Şekil 4.8 Eksenel ivmelendirme fazı

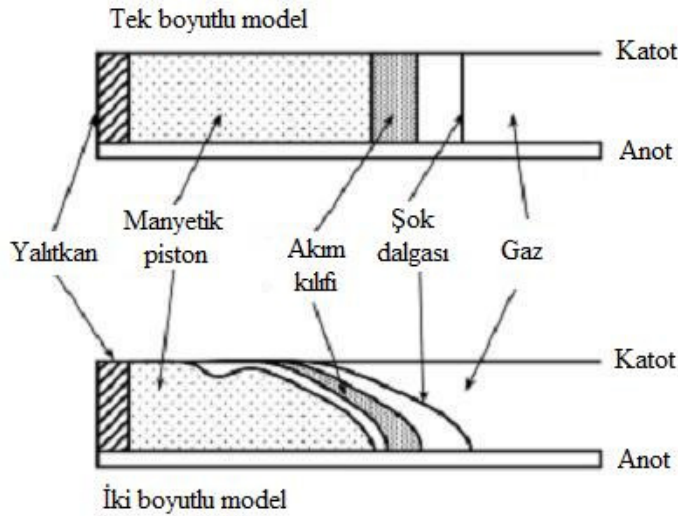
Eksenel ivmelendirme fazı sıcak ve yoğun plazma oluşumu için iki bakımdan önemlidir (Liu 1996):

- Plazma odak cihazlarında maksimum çalışma verimiminin sağlanması için güç kaynağı tarafından yüklenen kapasitördeki enerji, tamamıyla elektrot sistemine

aktarılmalıdır. Bu durumunun göstergesi ise akım kılıfının, boşalma akımının ilk maksimumu veya yakınlarında elektrot eksenlerine ulaşmasıdır.

- Plazma odak cihazlarında odaklamanın maksimum olması için plazma tabakasının ince, düzenli bir yapıya ve eksenel simetriye sahip olması gerekmektedir.

Boşalma akımının yüksek değerleri ve çalışma gazının düşük basınç değerleri nedeniyle elektrotlar arası bölgede akım kılıfı durağan nötr gaza doğru hareket eden Lorentz kuvveti etkisiyle itilir. Bu süreçte iyon yükleri değişimi ve esnek çarpışmalar için ortalama serbest yol çok küçüktür; bu nedenle hareketli yapı önündeki nötr gazı ısıtıp sıkıştırarak şok dalgası oluşur. Akım kılıfı sıkıştırılmış ve sıcak nötr katmanıyla kompleks bir yapıya sahiptir. Akım kılıfını iyonizasyon bölgesi ve vakum bölgesi takip eder (Shan 2000). Eksenel ivmelendirme fazı sonunda akım kılıfının iç kısmı anodun uç kısmına ulaşır; dış kısmı ise elektrot boyunca hareketine ve eksenel yönde plazmayı toplamaya devam eder (Liu 1996). Şekil 4.9’da tek ve iki boyutta gaz boşalması ve elektrotlar boyunca ilerleyen bölgeler verilmiştir.



Şekil 4.9 Gaz boşalması ve elektrotlar boyunca ilerleyen bölgeler (Masoud vd. 2007’den değiştirilerek alınmıştır)

4.3.3 Radyal faz

Radyal faz, plazma odak cihazının çalışma evrelerinin sonuncu ve en önemli fazıdır. Bu fazda sıcak ve yoğun plazma oluşumu ile oluşan plazmanın minimum çapta sıkıştırıldığı nokta (pinch), yani odak noktasının oluşumu gözlenmektedir. Manyetik sıkıştırma işlemi, plazma kolonu minimum çapa ve plazma yoğunluğu maksimum değerine ulaşıncaya son bulur. Radyal faz evresi plazma odak cihazlarının karakteristiğine bağlı olarak genellikle 50-200 ns arasında değişim göstermektedir (Toepfer vd. 1971, Shan 2000).

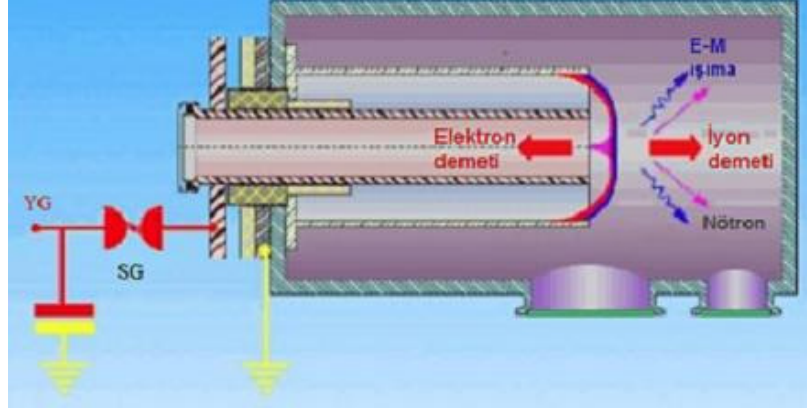
Radyal fazda plazma tabakasının ısıtılması ve iç elektrot olan anodun uç kısmında plazma tabakasının sıkıştırılması sağlanır. Eksenel ivmelendirme fazının sonunda akım kılıfı anodun uç noktasında ulaşır ve anodun iç kısmına doğru olan kuvvet etkisiyle radyal olarak toplanır. Bu işlem sırasında plazmanın ısıtılmasındaki ilk işlem şok ısıtmasıdır. Akım kılıfı radyal olarak anodun uç kısmında elektrot eksenine ulaşmadan önce şok dalgası ulaşır ve eksenel yansıtılır. Bu durumda iyon sıcaklıkları elektron sıcaklıklarından daha yüksektir (Toepfer vd. 1971). Plazma yapısı plazma kolonuna dönüştükten sonra temel ısıtma mekanizması Joule ısıtması olmaktadır (Shan 2000).

Plazmanın sıkıştırıldığı fazın sonuna doğru manyetik alan plazma kolonuna nüfuz eder ve yüksek plazma direncine sebep olur. Sistem indüktansı artar (Bernstein vd. 1969, Liu 1996). Plazma kolonu minimum çapa ulaşır.

Plazma kolonu minimum çapa ulaştıktan sonra tekrar eksenel ve radyal yönde genişlemeye başlar. Manyetik basınç etkisiyle radyal yöne doğru olan genişleme engellenir ancak eksenel şok dalgasının ivmelendirilmesinden dolayı eksenel yönde genişleme engellenemez (Liu 1996).

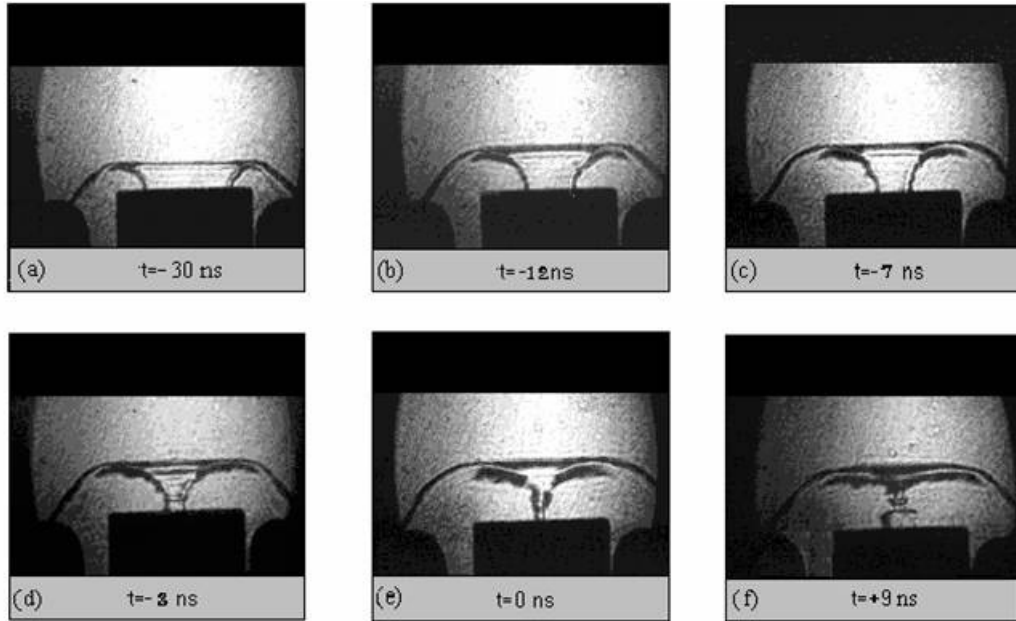
Plazma indüktansındaki ani değişimlerden dolayı plazma kolonunda elektrik alan oluşur (Bernstein vd. 1969). Bu alanın etkisiyle iyonlar ve elektronlar ters yönde ivmelenirler. Elektronlar anoda doğru, iyonlar ise anottan dışarıya doğru hareket ederler (Shan 2000).

Şekil 4.10'da plazma odak cihazı için radyal faz, iyon ve elektronların hareket yönleri gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Plazma odak cihazı için radyal faz, iyon ve elektronların hareket yönleri

Şekil 4.11'de UNU/ICTP PFF cihazında 4 mbar basınçta döteryum gazı ile yapılan çalışmada elde edilen plazmanın sıkıştırılma safhaları gösterilmektedir.

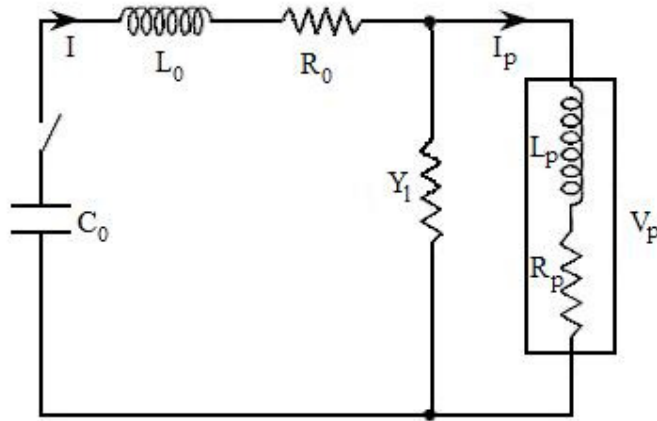


Şekil 4.11 4 mbar basınçta döteryum gazı kullanılarak çalıştırılan UNU/ICTP PFF cihazından elde edilen plazmanın sıkıştırıldığı safhanın görüntüsü (Lee 1998b)

Anoda doğru ivmelendirilen elektronların bombardımanından dolayı plazma kolonunda kirlilikler meydana gelir. Bu işlem plazma kolonu boyunca art arda devam eder ve tüm plazma kolonu bozulur. Plazma yoğunluğu ise bu işlem sonunda azalır. Bu yüzden özellikle ardıl çalıştırmada, 10-20 defa çalıştırmadan sonra elektrotların temizlenmesi gerekmektedir. Plazma kolonunun bozulmasının tamamlanmasından dolayı büyük, sıcak ve ince plazma bulutu oluşur ve Bremsstrahlung ışınması yayar (Liu 1996).

4.4 Plazma Odak Cihazının Elektriksel Eşdeğer Devresi ve Devre Eşitlikleri

Plazma odak cihazının elektriksel eşdeğer devresi standart LCR devresidir ve Şekil 4.12 ile verilmektedir.



Şekil 4.12 Plazma odak cihazının elektriksel eşdeğer devre gösterimi (Shan 2000'den değiştirilerek alınmıştır)

Şekil 4.12 ile verilen plazma odak cihazı sistemi için devre eşdeğerindeki semboller ve tanımları aşağıdaki şekildedir.

I = boşalma akımı

C_0 = kapasitörün kapasitansı

L_0 = boşalma devresinin indüktansı (plazma odak hariç)

R_0 = boşalma devresinin direnci (plazma odak hariç)

V_0 = başlangıç yükleme gerilimi

R_p = plazma direnci

L_p = plazmanın bulunduğu vakum odacığının indüktansı

I_p = plazma boyunca akan akım

V_p = plazmanın bulunduğu vakum odacığının gerilimi

Y_1 = kaçak direnci

Şekil 4.12 ile gösterilen devrede kapasitör (C_0) yüksek gerilim (V_0) ile yüklenir. Kapasitörde depolanan yük, anahtar (kıvılcım aralığı) kapatıldığında devre üzerine aktarılır. Kirchoff yasasına göre devre eşitliği yazılacak olursa denklem 4.1 elde edilir (Shan 2000, Soto 2005).

$$\frac{1}{C_0} \int I dt - V_0 + R_0 I + \frac{d}{dt} (L_0 I) + V_p = 0 \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de bulunan V_p , plazmanın oluşturulduğu vakum odacığının gerilimidir ve denklem 4.2 ile tanımlanır:

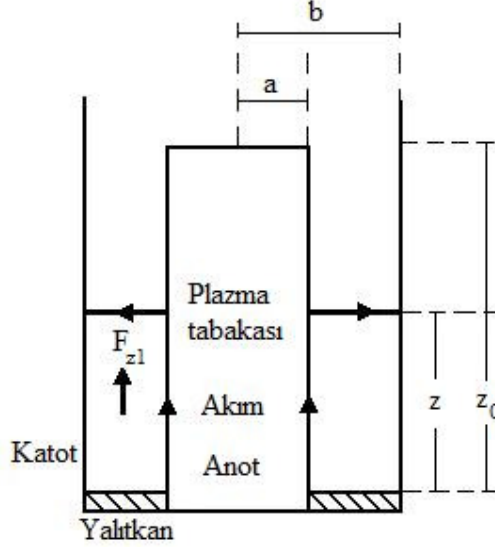
$$V_p = R_p I_p + \frac{d}{dt} (L_p I_p) \quad (4.2)$$

Plazma odak cihazına maksimum akımın iletilebilmesi, sistemdeki kapasitans, indüktans, direnç ve yükleme gerilimine bağlıdır (Rapp 1973, Conrads 1990). Kapasitans ve gerilimin yüksek, indüktans ve direnç değerinin düşük olması, akım değerinin yüksek olmasına sebep olmaktadır (Conrads 1990).

4.4.1 Eksenel ivmelendirme fazı için elektriksel eşdeğer devre

Eksenel ivmelendirme fazında, oluşan plazma tabakası elektrotlar boyunca ilerleyerek akımın iletkenliğini sağlar ve elektrotların ucuna ulaşır. Şekil 4.13'de eksenel

ivmelendirme fazı için elektrotlar ve plazma tabakası gösterilmiştir. Burada a anodun yarıçapı, b katodun yarıçapı, z_0 anodun boyu ve z eksenel fazda plazma tabakasının ilerleme yönünü göstermektedir.



Şekil 4.13 Eksenel ivmelendirme fazı için elektrotlar ve plazma tabakası (Shan 2000' den değiştirilerek alınmıştır)

Eksenel ivmelendirme fazı, plazma tabakasının elektrotların başlangıcı olan $z=0$ noktasından başlayarak anodun bitimi olan $z=z_0$ noktasına kadar z eksenini boyunca ilerlemesini kapsar. Bu nedenle eksenel ivmelendirme fazı için elektriksel sistem, eşeksenli silindirik iletken bir tüpün elektriksel sistemi olarak ele alınır. Anot ve katot arasındaki indüklenmiş manyetik alan denklem 4.3 ile verilmektedir (Shan 2000):

$$B = \frac{\mu}{2\pi} \times \frac{I_p}{r} \quad (4.3)$$

Bu alandan dolayı anodun ucuna doğru ilerleyen plazma tabakası üzerindeki kuvvet,

$$F_{z1} = \int_a^b I_p \times B dr \quad (4.4)$$

şeklindedir. Denklem 4.3, denklem 4.4'te yerine yazıldığında kuvvet eşitliği, denklem 4.5 haline gelir:

$$F_{z1} = \frac{\mu I_p^2}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.5)$$

Denklem 4.6 ile verilen aksenal yöndeki plazma indüktansı denklem 4.1'de yerine yazıldığında aksenal faz için devre eşitliği denklem 4.7 olarak elde edilir:

$$L_{p1} = \frac{\mu}{2\pi} z \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.6)$$

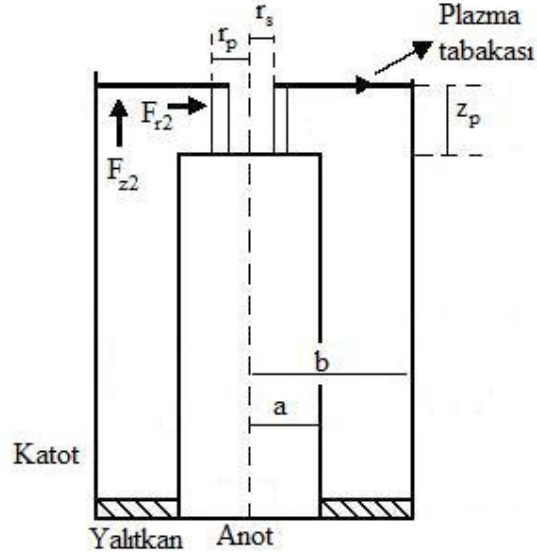
$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_0 - \frac{1}{c_0} \int_0^t I dt - (R_0 + f_c R_p) I - \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) f_c I \frac{dz}{dt}}{L_0 + \frac{\mu}{2\pi} f_c z \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7' de verilen f_c akım değiştirme faktörü olarak isimlendirilmektedir ve I_p/I olarak tanımlanır (Shan 2000).

4.4.2 Radyal faz için elektriksel eşdeğer devre

Radyal fazda, plazma tabakası yüksekliği z_p , dış yarıçapı r_p (manyetik piston) ve iç yarıçapı r_s (şok dalgası) olan silindirik bir hacim (slug) şeklindedir. Plazma tabakası manyetik piston etkisiyle radyal olarak içeriye doğru sıkıştırılır. Şok dalgası anot yarıçapından ($r_s=a$) başlayarak anot merkezine ($r_s=0$) doğru radyal yönde ilerler ve anot merkezine ulaştığında parçacıklar çarpışmalar nedeniyle kinetik enerjilerinin büyük bir kısmını plazma iç enerjisine aktarırlar. Böylece elektrotların merkezindeki plazma kolonu sıcak ve yoğun, dış kısımlar ise daha düşük sıcaklık ve yoğunluğa sahip olan plazma silindirik hacmini oluşturur. Bu iki durumu ayıran sınır, yansıyan şok dalgası

olarak tanımlanır. Tüm parçacıklar plazma kolonun merkezine toplandığında, yansıyan şok dalgası ve manyetik piston çakıştığında plazma kolonu, kararsızlıklar nedeniyle bozulana kadar sıkıştırılmaya devam eder (Shan 2000). Şekil 4.14’de radyal faz için elektrotlar ve plazma tabakası gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Radyal faz için elektrotlar ve plazma tabakası (Shan 2000’den değiştirilerek alınmıştır)

Denklem 4.8 ve denklem 4.9 ile verilen plazmanın silindirik hacmi ve plazma tabakası üzerindeki kuvvet denklemlerinde manyetik alan (denklem 4.3) yerine yazıldığında denklem 4.10 ve denklem 4.11 elde edilir:

$$F_{r2} = \int_0^{z_p} I_p \times B dz \quad (4.8)$$

$$F_{z2} = \int_{r_p}^b I_p \times B dr \quad (4.9)$$

$$F_{r2} = \frac{\mu I_p^2 z_p}{2\pi r_p} \quad (4.10)$$

$$F_{z2} = \frac{\mu I_p^2}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \quad (4.11)$$

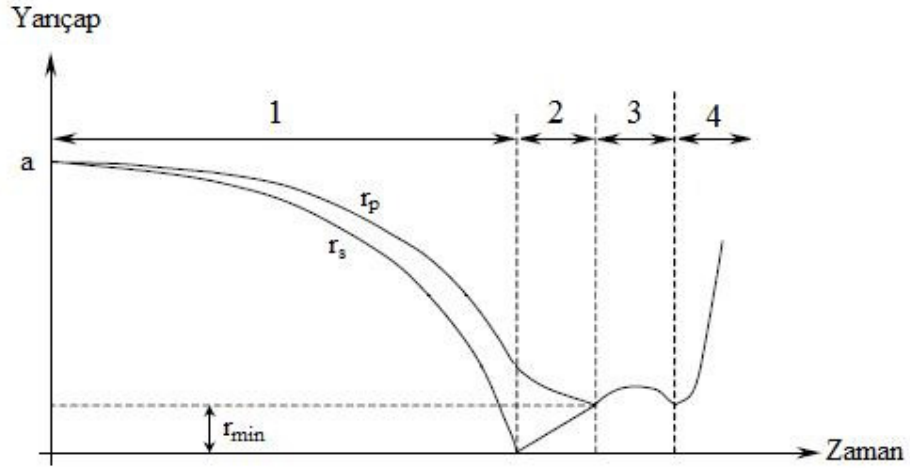
Radyal faz için plazma indüktansı ise denklem 4.12 ile verilir:

$$L_{p2} = \frac{\mu}{2\pi} \left(z_0 \ln\left(\frac{b}{a}\right) + z_p \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \right) \quad (4.12)$$

Denklem 4.1 ve denklem 4.12 kullanılarak radyal faz için devre eşitliği, denklem 4.13 olarak elde edilir:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_0 - \frac{1}{c_0} \int_0^t I dt - (R_0 + f_c R_p) I + \frac{\mu}{2\pi} f_c I \left(\frac{z_p}{r_p} \frac{dr_p}{dt} - \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \frac{dz_p}{dt} \right)}{L_0 + \frac{\mu}{2\pi} f_c \left(z_0 \ln\left(\frac{b}{a}\right) + z_p \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) \right)} \quad (4.13)$$

Lee, elektriksel devre ve eşitlikleri kullanarak plazma odak cihazı için nümerik çalışmalar yapmış ve Lee modelini tanımlamıştır (Lee 1998a,b, Lee ve Saw 2010). Şekil 4.15’de Lee tarafından oluşturulmuş olan modelden elde edilen ve zamana bağlı olarak yarıçap değişimini gösteren grafik verilmiştir. Şekil 4.15’de a anodun yarıçapını, r_p manyetik piston yarıçapını ve r_s şok dalgasının yarıçapını göstermektedir. Grafikte 1 ile gösterilen bölge, plazma tabakasının radyal olarak içeriye doğru sıkıştırıldığını göstermektedir. Bu bölge şok dalgasının anot yarıçapından ($r_s=a$) başlayarak anot merkezine ($r_s=0$) ulaşmasıyla son bulur. 2 ile gösterilen bölgede, anoda ulaşan şok dalgası radyal olarak anottan dışarıya doğru yansır; ancak manyetik piston anoda doğru olan hareketine devam eder. 3 numaralı bölge, yansıyan şok dalgası ve manyetik piston çakıştığına, plazmanın sıkıştırıldığı nokta (pinch) oluşumunun gerçekleştiği fazı göstermektedir. 4. bölgede ise plazma kolonu yayılır ve bozulur (Lee 1998a,b, Lee ve Saw 2010).



Şekil 4.15 Radyal faz için şematik gösterim (Lee ve Saw 2010'dan değiştirilerek alınmıştır)

4.5 Plazmaya Enerji Aktarımı

Güç kaynağı tarafından kondansatörde depolanan enerji, denklem 4.14 ile verilmektedir:

$$E = \frac{1}{2} C_0 V_0^2 \quad (4.14)$$

Tüm plazma sistemi için güç ise, denklem 4.15 ile verilmektedir:

$$P_{toplama} = I_p V_p \quad (4.15)$$

Denklem 4.2 ile verilen plazmanın bulunduğu vakum odacığının gerilimi denklem 4.15'te yerine yazıldığında güç denklemini denklem 4.17 halini alır:

$$P_{toplama} = I_p \left(R_p I_p + \frac{d}{dt} (L_p I_p) \right) \quad (4.16)$$

$$P_{toplama} = L_p I_p \frac{dI_p}{dt} + I_p^2 \left(R_p + \frac{dL_p}{dt} \right) \quad (4.17)$$

Denklem 4.17 ile verilen toplam güç ifadesinden plazma vakum odacığı içerisinde depolanan güç çıkarılarak plazmaya aktarılan güç elde edilir:

$$P_{plazma} = P_{toplama} - \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L_p I_p^2 \right) \quad (4.18)$$

$$P_{plazma} = L_p I_p \frac{dI_p}{dt} + I_p^2 \left(R_p + \frac{dL_p}{dt} \right) - \frac{1}{2} I_p^2 \frac{dL_p}{dt} - L_p I_p \frac{dI_p}{dt} \quad (4.19)$$

$$P_{plazma} = I_p^2 \left(R_p + \frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt} \right) \quad (4.20)$$

Denklem 4.20 güç ifadesi kullanılarak plazmaya aktarılan toplam enerji, denklem 4.21 olarak elde edilir:

$$E_{plazmaya\ aktarilan} = \int_0^t I_p^2 \left(R_p + \frac{1}{2} \frac{dL_p}{dt} \right) dt \quad (4.21)$$

Eksenel ivmelendirme ve radyal fazlar için denklem 4.6 ve denklem 4.12 ile verilen indüktans ifadeleri, plazmaya aktarılan enerji denkleminde yerlerine yazılarak $z=t$ dönüşümü yapıldığında plazmaya aktarılan enerji, eksenel ivmelendirme fazı için, denklem 4.22 ve radyal faz için denklem 4.23 olarak elde edilir(Shan 2000):

$$E_{plazmaya\ aktarilan} = \int_0^t I_p^2 \left(R_p + \frac{\mu}{4\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \frac{dz}{dt} \right) dt \quad (4.22)$$

$$E_{plazmaya\ aktarilan} = \int_{t_{rad}}^t I_p^2 \left(R_p + \frac{\mu}{4\pi} \ln \left(\frac{b}{r_p} \right) \frac{dz_p}{dt} - \frac{\mu}{4\pi} \frac{z_p}{r_p} \frac{dr_p}{dt} \right) dt \quad (4.23)$$

Denklem 4.5 ile verilen aksel ivmelendirme fazındaki kuvvet denklem 4.24'de yerine yazılarak aksel fazda yapılan iş elde edilir:

$$W_{eksenel} = \int_0^z F_{z1} dz \quad (4.24)$$

$$W_{eksenel} = \int_0^z \frac{\mu I_p^2}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) dz \quad (4.25)$$

$z=t$ değişken değiştirmesi yapılır ve denklem 4.6 göz önüne alınırsa yapılan iş denklem 4.26 olarak elde edilir:

$$W_{eksenel} = \int_0^t I_p^2 \frac{dL_{p1}}{dt} dt \quad (4.26)$$

Radyal fazdaki kuvvetler (denklem 4.10 ve denklem 4.11) tarafından yapılan iş,

$$W_{radyal} = \int_0^{z_p} F_{z2} dz_p + \int_0^{r_p} F_{r2} dr_p \quad (4.27)$$

şeklindedir. Kuvvet değerleri denklem 4.27'de yerine yazılarak ve denklem 4.12 dikkate alınarak radyal fazda yapılan iş denklem 4.29 olarak elde edilir:

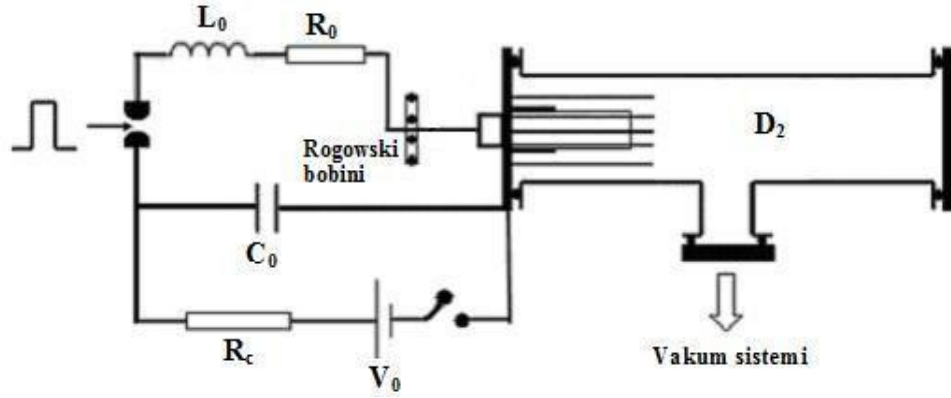
$$W_{radyal} = \int_0^{z_p} \frac{\mu I_p^2}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{r_p}\right) dz_p + \int_0^{r_p} \frac{\mu I_p^2}{2\pi} \frac{z_p}{r_p} dr_p \quad (4.28)$$

$$W_{radyal} = \int_{t_{rad}}^t I_p^2 \frac{dL_{p2}}{dt} dt \quad (4.29)$$

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 ODAK-3K

Bu çalışmada 3 kJ enerjiye sahip Mather tip plazma odak cihazı (ODAK-3K) kullanılmıştır. ODAK-3K'nın devre şeması Şekil 5.1'de gösterilmektedir.



Şekil 5.1 3 kJ Mather tip plazma odak cihazı (ODAK-3K) (Akgün vd. 2009)

ODAK-3K, yüksekliği 120 cm, boyutları 70x35 cm olan demir profil üzerine yerleştirilmiş olan 60 cm boyunda 40 cm eninde dikdörtgen şeklindeki ahşap tabla üzerine yerleştirilmiştir.

5.1.1 Vakum odacığı

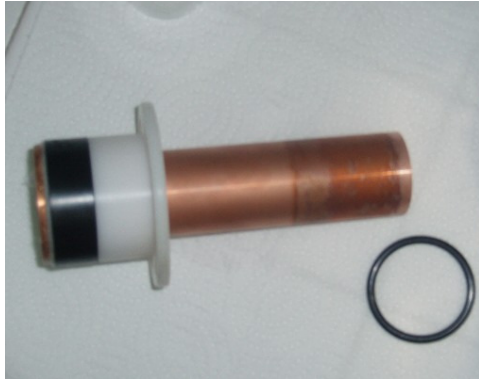
İçerisinde plazmanın oluşturulacağı 246 mm uzunluğunda ve 120 mm çapında "T" şeklinde silindirik cam vakum odacığı tasarlanmıştır. Cam vakum odacığı Şekil 5.2' de gösterilmektedir:



Şekil 5.2 Cam vakum odacığı

5.1.2 Elektrotlar

Eksen boyunca eş-eksenli silindirik elektrotlar yapılarak cam vakum odacığı içerisine yerleştirilmiştir. İ elektrot olarak bakır malzemeden (iyi iletken olması sebebiyle) silindir şeklinde, 88 mm uzunluğunda ve 37 mm çapında anot oluşturulmuştur. Anot ve katot arasına 25 mm kalınlığında ve 36.3 mm uzunluğunda poliamid yalıtkan yerleştirilmiştir. Yalıtkan, boşalma sırasında oluşabilecek titreşim ve sarsıntılardan kaynaklanan hasarlara engel olması açısından anot ve katot arasına sıkıca yerleştirilmiştir. Anot ve poliamid yalıtkan Şekil 5.3’de gosterilmektedir.

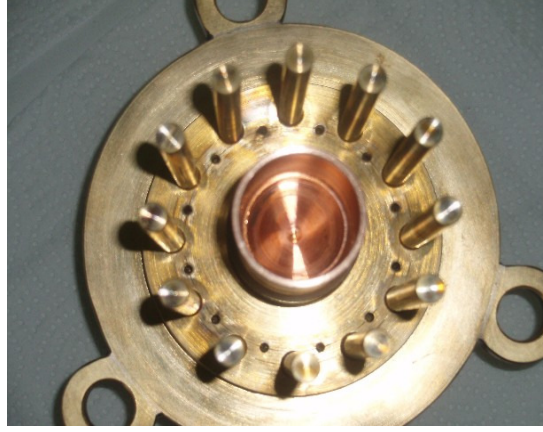


Şekil 5.3 Anot ve poliamid yalıtkan



Şekil 5.4 Katot

Dış elektrot olarak 102 mm uzunluğunda ve 8 mm çapında 12 adet pirinç (Cu-Zn) çubuk şeklinde katot kullanılmıştır. Katot Şekil 5.4’de gösterilmektedir. Bu çubuklar 85 mm çapta anot çevresine yerleştirilmiştir. Anot, katot ve yalıtkindan oluşan birinci elektrot sistemi Şekil 5.5’de gösterilmektedir.



Şekil 5.5 Anot, katot, yalıtkindan oluşan elektrot sistemi

Plazma odak cihazının en uygun şekilde çalışması ve etkili bir plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumunun sağlanması için dış devre empedansı ile plazma odak cihazının empedansının uyumlu olması gerekmektedir. Bu nedenle devre elemanları ve sistem basıncı değiştirilerek bir dizi deney yapılmıştır. İç elektrot olan anodun boyutları ve şekli, buna bağlı olarak da yalıtkanın boyutları değiştirilerek ikinci grup elektrot sistemi deneysel çalışmalara eklenmiştir.

İkinci grup elektrot sisteminde yine bakır malzemeden yapılmış olan 95 mm uzunluğunda ve 19.9 mm çapında anot kullanılmıştır. Anot, Şekil 5.6’da gösterilmektedir. Yalıtkan olarak 16 mm çapında ve 47 mm uzunluğunda payreks kullanılarak ikinci grup elektrot sistemi oluşturulmuş ve deneyler tamamlanmıştır. Payreks yalıtkan Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Anot



Şekil 5.7 Payreks yalıtkan

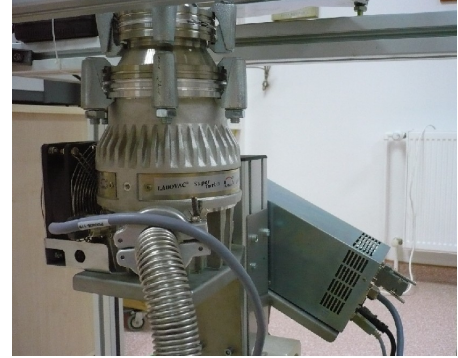
5.1.3 Vakum sistemi

Vakum seviyesini sağlamak için ILMVAC turbomoleküler vakum sistemi ve vakum elemanları kullanılmıştır. Mekanik pompa ile 10^{-3} mbar vakum seviyesinde ön basınç sağlanmıştır. Turbo moleküler pompa ile 10^{-6} mbar vakum seviyesine ulaşılmıştır.

Sistemde kullanılan mekanik pompa Şekil 5.8, turbo moleküler pompa Şekil 5.9 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.8 Mekanik pompa



Şekil 5.9 Turbo moleküler pompa

Sistemde çalışma gazı olarak hava ve döteryum gazı kullanılmıştır.

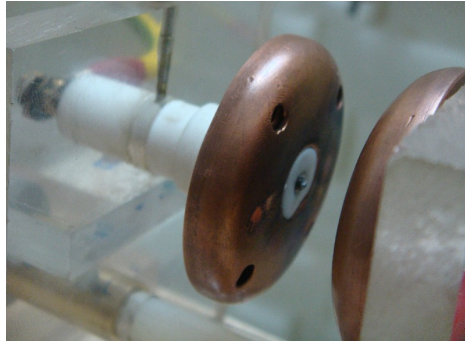
5.1.4 Yükleme ve enerji sistemi

Sistemde enerji depolamak için $15\mu\text{F}$ kapasiteye sahip kapasitör kullanılmıştır. Kapasitör 20 kV' luk güç kaynağı tarafından yüklenmiştir. Güç kaynağı, kapasitör, vakum sistemi Şekil 5.10' da gösterilmektedir (Akgün vd. 2010).



Şekil 5.10 Güç kaynağı, kapasitör, vakum sistemi

Kapasitörde depolanan enerjinin elektrotları içeren vakum odacığına iletimi, kıvılcım aralığı ile sağlanmıştır. Sistemde kullanılan kıvılcım aralığı Şekil 5.11' de gösterilmiştir.

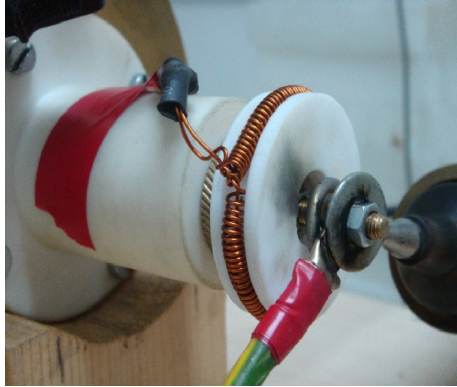


Şekil 5.11 Kıvılcım aralığı

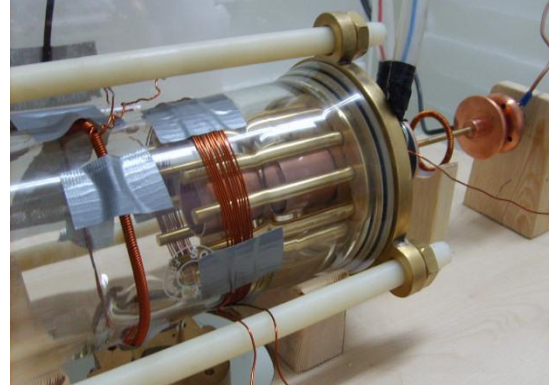
Kıvılcım aralığı bakır malzemeden 50 mm çapında 10 mm kalınlığında karşılıklı iki elektrot olarak yapılmıştır. İki elektrot arasındaki mesafe 0.9 cm olarak ayarlanmıştır. Elektrotlar yalıtkan pleksiglas üzerine yerleştirilerek sabitlenmiştir.

5.1.5 Ölçüm sistemi

Boşalma akımını ölçmek için Rogowski bobini kullanılmıştır. Bakır tel 44 mm çapında olmak üzere 117 kez sarılmıştır. Rogowski bobini, hareket etmemesi ve sisteme daha sağlam monte edilmesi amacıyla teflon üzerine sabitlenmiştir. Sistemde kullanılan Rogowski bobini Şekil 5.12’de, plazma odak cihazının (ODAK-3K) genel görüntüsü Şekil 5.13’de verilmektedir.



Şekil 5.12 Rogowski bobini



Şekil 5.13 Plazma odak cihazı (ODAK-3K)

Gerilim değerini ölçmek için yüksek voltaj sondası, akım-gerilim karakteristiklerini elde etmek için Tektronix TDS 5104 B marka osiloskop kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan sistem elemanları Çizelge 5.1, kullanılan cihazlar Çizelge 5.2 ve elektriksel devre bileşenleri Çizelge 5.3 ile özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 Sistem elemanları

Vakum odacığı	Malzeme: Cam Uzunluk: 246 mm Çap: 120 mm
Katot	Malzeme: 12 adet pirinç (Cu-Zn) çubuk (8mm çapında) Uzunluk: 102 mm Çap: 85 mm
Anot (birinci)	Malzeme: Bakır Uzunluk: 88 mm Çap: 37 mm
Yalıtkan (birinci)	Malzeme: Poliamid Kalınlık: 25 mm Uzunluk: 36.3 mm
Anot (ikinci)	Malzeme: Bakır Uzunluk: 95 mm Çap: 19.9 mm
Yalıtkan (ikinci)	Malzeme: Payreks Uzunluk: 47 mm Çap: 16 mm
Kıvılcım aralığı	Malzeme: Bakır Çap: 50 mm Kalınlık: 10 mm Mesafe: 0.9 cm
Rogowski bobini	Çap: 44 mm Sarım sayısı: 117

Çizelge 5.2 Çalışmada kullanılan cihazlar

Vakum pompası	230 V, 50 Hz, 5×10^{-7} mbar
Güç kaynağı	20 kV 10 MA
Kapasitör	20 kV 15 μ F 5 nH
Yüksek gerilim sondası	Tektronix P6015A 20 kV DC 40 kV Pulse AC 75 MHz
Osiloskop	TDS 5104 B 1 GHz

Çizelge 5.3 Elektriksel devre bileşenleri

İndüktans (L_0)	1.28 μ H
Toplam dış direnç (R_0)	121 m Ω
Yükleme direnci (R_c)	1 M Ω
Kapasitans (C_0)	15 μ F
Yükleme gerilimi (V_0)	20 kV

5.2 ODAK-3K ile Yapılan Füzyon Çalışmaları

Plazma odak cihazı, füzyon çalışmaları için vakum odacığına döteryum gazı basılarak D-D füzyon reaksiyonunun gerçekleştirilmesi amacıyla oluşturulmuş bir sistemdir. Genel olarak D-D reaksiyonu %50 olasılıkla aşağıdaki gibi oluşur:



Bu füzyon reaksiyonu sonucunda 2.45 MeV enerjiye sahip nötronlar ve 3.02 MeV enerjiye sahip protonlar çıkmaktadır. D-D reaksiyonu sonucu çıkacak olan nötron ve proton izlerinin ölçümü için CR-39 plastik iz detektörleri kullanılmaktadır (Collopy vd. 1992, Zakaulah vd. 1997, Jakubowski vd. 2001, Springham vd. 2002, Castillo vd. 2007, Yousefi vd. 2007b, Lee vd. 2008). ODAK-3K sisteminde reaksiyon ürünlerinin ölçümü için CR-39 detektörleri kullanılarak, Radosys sisteminde izlerin okuması gerçekleştirilmiştir.

D-D reaksiyonu sonucu çıkacak olan nötronların ölçümü için 1x1 cm² boyutlarında ve 980 µm kalınlığında CR-39 (C₁₂H₁₆O₇) plastik iz detektörleri kullanılmıştır. Plastik madde ile esnek olmayan çarpışmalar sonucu detektörde yavaşlatılan parçacık, kırılan molekül bağlarının gözle görünmeyen izlerini oluşturur. Oluşan bu izler, kimyasal çözeltiler yardımıyla büyütülerek optik mikroskoplarda gözlenebilmektedir (Akgün vd 2009).

14 kV' luk gerilim uygulanarak farklı basınç değerleri (5-13.5 mbar) için sistem yirmişer defa çalıştırılmıştır. Deneylede kullanılan CR-39 plastik iz detektörleri Radosys sistemine ait yerleştirme slaytlarına takılmıştır. CR-39 plastik iz detektörü Şekil 5.14, CR-39 yerleştirme slaytları Şekil 5.15'de gösterilmiştir.



Şekil 5.14 CR-39



Şekil 5.15 CR-39 yerleştirme slaytları

Taşıma tablasına simetrik olarak yerleştirilen slaytlar, Radosys banyo ünitesine koyularak 90 ± 1 °C'de NaOH çözeltisi içerisinde dört saat süre ile CR-39 plastik iz detektörlerinin banyo işlemi yapılmıştır. Taşıma tablası ve slaytların yerleşimi Şekil 5.16, Radosys banyo ünitesi Şekil 5.17 ile göstermiştir.



Şekil 5.16 Slaytları taşıma tablası



Şekil 5.17 Radosys banyo ünitesi

İzlerin büyütülerek daha belirgin hale gelmesi için yapılan banyo işleminde kullanılacak çözelti için 1 kg NaOH öğütülerek toz haline getirilmiştir. Çözelti 4 litre saf suya 1 kg NaOH yavaş yavaş eklenerek hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti banyo ünitesine yerleştirilmiştir. Sistem için çalışma sıcaklık 90 °C'ye ayarlanarak sabit tutulmuştur.

Slaytlar banyo ünitesine yerleştirilerek dört saat süreyle sistem çalıştırılmıştır. Dört saat sonunda banyo ünitesinden NaOH çözeltisi boşaltılarak %5' lik seyreltide sirkeli su banyo ünitesine koyulmuş ve sistem 10 dakika daha çalıştırılmıştır. 10 dakika sonra sirkeli su boşaltılarak saf su banyo ünitesine koyulmuş ve sistem saf su ile 10 dakika çalıştırılmıştır. Bu işlemin ardından slaytlar banyo ünitesinden çıkartılarak kurutma kağıtlarının üzerine 1 saatlik kuruma işlemi için bırakılmıştır.

Banyo işleminin ardından CR-39 plastik iz detektörlerini taşıyan slaytlar Radosys sayım sistemine yerleştirilerek okuma işlemi gerçekleştirilmiştir. Radosys sayım sistemi Şekil 5.18' de gösterilmektedir.



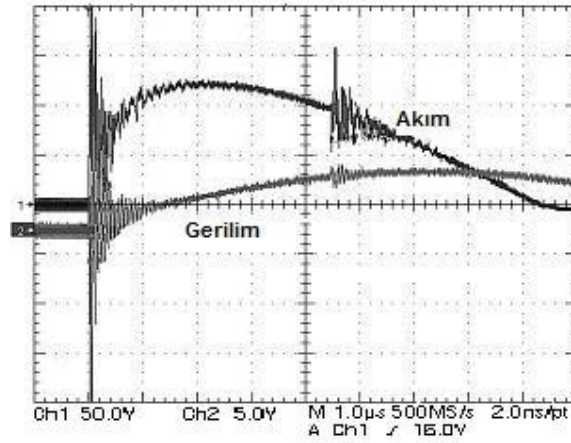
Şekil 5.18 Radosys sayım sistemi

Füzyon reaksiyonu sonucu çıkan nötronlardan korunmak amacıyla zırhlama hesabı yapılmıştır. Nötronları termal hale getirmek için plazma odak cihazı çevresine 40 cm kalınlığında parafin duvarlar yerleştirilmiştir.

6. BULGULAR

6.1 Optimizasyon Çalışmaları

Sistem oluşturulduktan sonra optimizasyon için farklı basınç ve farklı devre elemanları ile çalışmalar yapılmıştır. Birinci grup elektrot sistemi ile yapılan deneylerde Rogowski bobini ve yüksek gerilim sondası kullanılarak voltaj ve akım karakteristikleri elde edilmiştir. 17 mbar hava basıncı için 15 kV gerilim altında 40 kA'lık pik akımı elde edilmiştir. Osiloskop kullanılarak elde edilen akım, gerilim karakteristikleri ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumu Şekil 6.1'de verilmektedir.



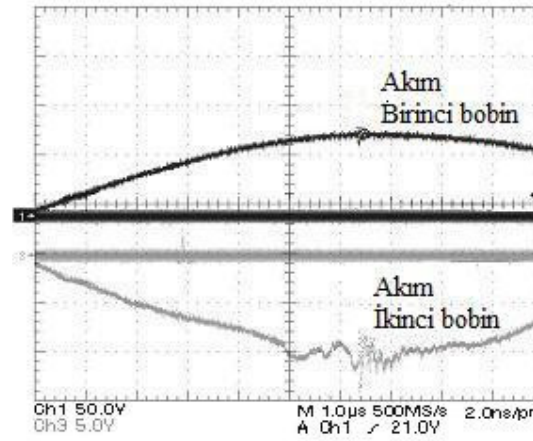
Şekil 6.1 Gerilim, akım karakteristikleri ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumu

Bu eğri plazma odak cihazında kırılma ile başlayıp plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumuna kadar olan plazma sürecini göstermektedir. Grafikte başlangıçta 1 μ s'lik süreç boyunca gerilim eğrisinde görülen dalgalanmaların sebebi anot ve katot arasındaki boşalma sonucu ortaya çıkan ani gerilim artışlarıdır.

Boşalma yalıtkan yüzeyinde başlar ve bu safhadan sonra plazma tabakası oluşur ve akım tarafından oluşturulan manyetik alanla aksel olarak anodun uç noktasına doğru Lorentz kuvveti aracılığıyla ivmelendirilir. Bu süre deneylerimizde 3 μ s olarak ölçülmüştür.

Akım eğrisindeki azalma ise elektrotlar arasında oluşan plazmanın artan indüktansının sonucudur. Plazma hızı $v_p=1.12$ cm/ μ s olarak bulunmuştur. İvmelendirilen plazma tabakası anodun uç noktasında sıkıştırılarak plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) oluşumu sağlanmıştır. Sıkışma safhasının oluşumu ise akım ve gerilim eğrilerindeki pik değerlerinden gözlenmektedir ve 0.4-0.7 μ s olarak ölçülmüştür.

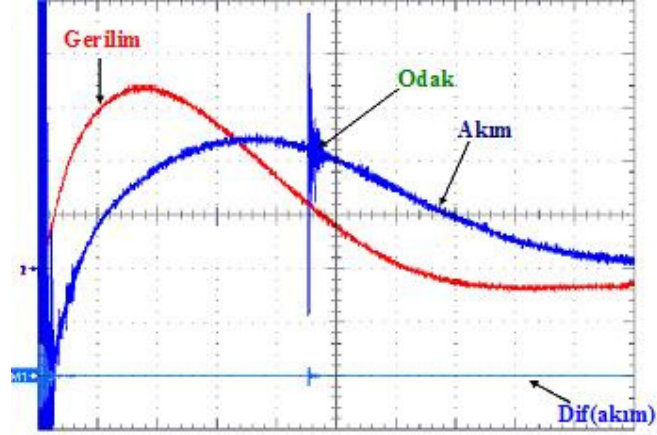
Cam vakum odacığı dışına yerleştirilen Rogowski bobini ile plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) akımı ve katodun ucuna yakın konuma yerleştirilen manyetik sonda ile sıkıştırma safhasında plazma dinamiği incelenmiştir. Şekil 6.2 ile verilen bu ölçümlerde, iyonların ve yüklü parçacıkların maksimum ivmelenme oranlarına sahip olmalarından dolayı sıkıştırma safhasında güçlü manyetik alan değişimleri gözlenmiştir.



Şekil 6.2 Boşalım ve plazmanın sıkıştığı nokta (pinch) akım eğrileri

Şekil 6.2’de ikinci Rogowski bobini ile elde edilen ölçümlerde benzer akım ve manyetik alan eğrileri gözlenmiştir. Akım arttıkça ölçülen manyetik alan da artmaktadır.

İkinci grup elektrot sistemi ile 11.5 mbar basınç ve 14 kV gerilim değerlerinde deneyler yapılmıştır. Bu değerler için pik akımı $I_{peak}=39$ kA olarak bulunmuştur (Akgün vd. 2009). Elde edilen akım ve gerilim karakteristikleri Şekil 6.3’de gösterilmektedir.

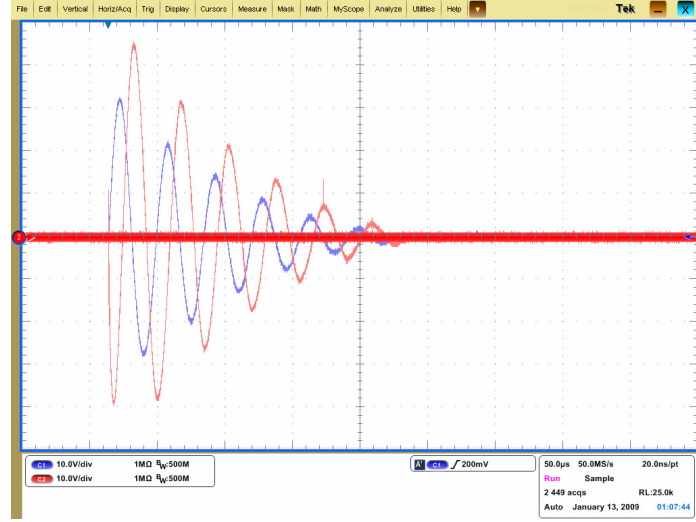


Şekil 6.3 Akım, gerilim karakteristikleri ($V=14$ kV ve $P=11.5$ mbar)

Şekil 6.3’de verilen akım-gerilim karakteristiğinde akımın maksimum değerine yakın bir noktada akım eğrisinde dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu dalgalanmalar plazmanın sıkıştırıldığı noktanın (pinch) yani odaklanmanın olduğunun göstergesidir. Kırılma fazı 100ns zaman aralığında gerçekleşmiştir. Eksenel faz sonunda oluşan radyal faz ise $4\mu s$ ’de başlamakta ve odak olayının oluşumuyla 300ns sürmektedir. Deney sistemi ve çalışma parametrelerine bağlı olarak odak süresi genellikle 50ns ile 400ns arasında değişmektedir (Gribkov 2007).

6.2 Akım Hesabı

ODAK-3K cihazının empedans uyumunun sağlanması ve elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesi amacı ile sistem farklı basınç ($P=1-15$ mbar) ve gerilim ($V=5-11$ kV) değerleri için hava ortamında çalıştırılmıştır. 10 mbar hava basıncında 10 kV gerilim değeri için osiloskopta gözlenen akım-gerilim karakteristiği Şekil 6.4 ile gösterilmiştir (Bölükdemir vd. 2009).



Şekil 6.4 10 mbar hava basıncında 10 kV gerilim değeri için osiloskopta gözlenen akım-gerilim karakteristiği

Şekil 6.4 ve aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak akım değerleri hesaplanmıştır (Hussain ve Zakaullah 2007).

$$f_1 = \frac{V_2}{V_1} \quad (6.1)$$

$$f_2 = \frac{V_3}{V_2} \quad (6.2)$$

$$f_n = \frac{V_{n+1}}{V_n} \quad (6.3)$$

$$f = \frac{1}{n}(f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n) \quad (6.4)$$

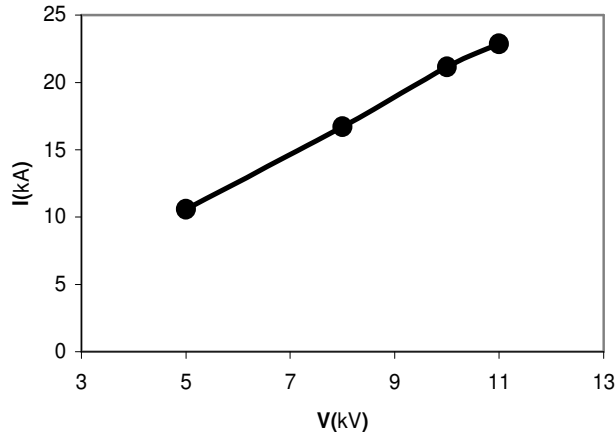
$$I_0 = \frac{(1+f)}{T} \pi C_0 V_0 \quad (6.5)$$

$C_0=15 \mu\text{F}$ sığa değeri, $P=1-10$ mbar basınç değerleri ve $V=5-11$ kV gerilim değerleri için hesaplanan akım değerleri Çizelge 6.1 ile verilmiştir.

Çizelge 6.1 Farklı basınç ve gerilim değerleri için hesaplanan akım değerleri

P (mbar)	V (kV)	T (μ s)	I (kA)
1	10	36	21.6
5	11	36	23.7
10	5	35.6	10.58
10	8	36	16.7
10	10	35	21.15
10	11	37	22.85

10 mbar basınç altında elde edilen gerilim-akım karakteristiği Şekil 6.5’de verilmektedir. Grafikten, gerilim değeri artıkça, akımdaki artış oranının daha az miktarda arttığı görülmüştür.



Şekil 6.5 10 mbar basınç altında elde edilen gerilim-akım karakteristiği

Sistemin çalıştırılması aşamasında iyon ve yüklü parçacıkların bombardımanı nedeniyle Şekil 6.6.a,b,c’de gösterildiği gibi elektrotlarda kirlilikler meydana gelmektedir. Bu nedenle sistemin, belli periyotlarla temizleme işlemi gerçekleştirilmektedir.



a



b



c

Şekil 6.6.a Katot, b. Anot, Payreks yalıtkan, c. Kıvılcım aralığı elektrotu

6.3 ODAK-3K ile Yapılan Füzyon Çalışmaları Bulguları

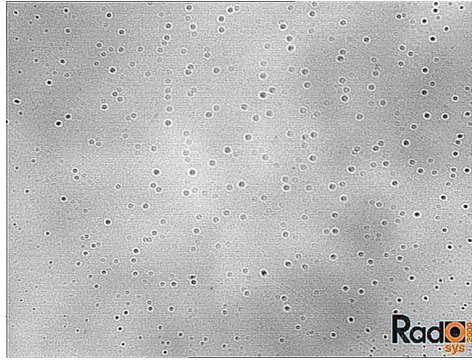
Füzyon sonucunda oluşan ürünlerin detekte edilebilmesi için CR-39 detektörlerinin plazma odak cihazı içerisine yerleştirilmesi Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



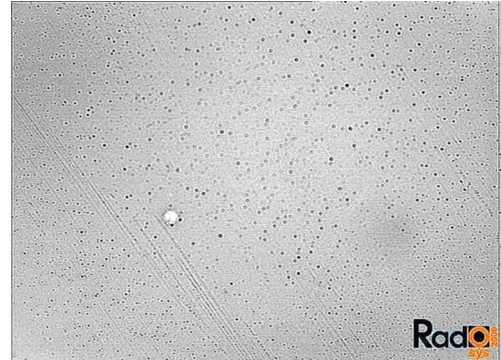
Şekil 6.7 CR-39 takılı plazma odak cihazı

Plazma odak cihazı içerisine bir tanesi anodun içinde, iki tanesinin önüne proton ve nötronları termal hale getirmek amacıyla 1 cm kalınlığında parafin yerleştirilmek üzere beş adet CR-39 detektörü anottan 34 mm uzaklıkta mesafelere yerleştirilmiştir. İyon etkisini ortadan kaldırmak için 15 µm Al folyo ile kaplanan detektörler teflon tablaya yerleştirilmiştir. Çalışmalarda ikinci grup elektrot sistemi ve çalışma gazı olarak döteryum kullanılmıştır. V=14 kV gerilim uygulanarak ve P=11.5 mbar basınç altında plazma odak cihazı çalıştırılmıştır.

Sistem 20 defa çalıştırdıktan sonra, detektörlerin NaOH çözeltisi içinde dört saatlik banyo işlemi gerçekleştirilerek Radosys sisteminde detektör okumaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda 15 µm Al folyo ile sarılı detektörden elde edilen nötron ve proton izleri 400 kat büyütme ile Şekil 6.8 ve 100 kat büyütme ile Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Nötron ve proton izleri (400x)



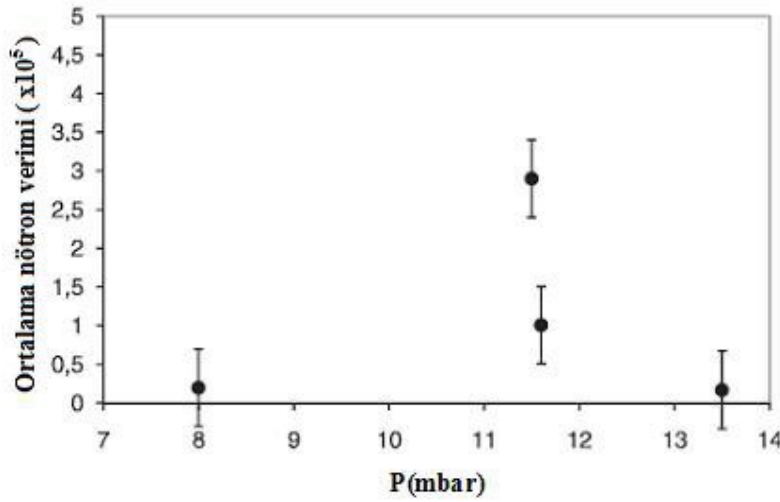
Şekil 6.9 Nötron ve proton izleri (100x)

Detektör üzerindeki milimetrekaire başına ortalama iz yoğunluğu 2583 olarak bulunmuştur. $4\pi d^2$ katı dikkate alındığında ve detektörün yerleştirilme mesafesi $d=34$ mm için yapılan hesaplamalar sonucunda sistemin çalıştırılması başına elde edilen nötron sayısı 3.3×10^5 olarak hesaplanmıştır.

Reaksiyon verimi ve akım ($Y\alpha I^n$) (Lee ve Saw 2008) arasındaki bağıntıyı veren ölçekleme kanunu $Y\alpha I^{3.46}$ olarak bulunmuştur.

Ayrıca farklı basınç değerleri için sistem 14 kV'da çalıştırılmıştır. 5 mbar, 8 mbar, 11.6 mbar ve 13.5 mbar basınç değerlerinde deneyler yapılarak nötron verimi için en uygun basınç değerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Her bir basınç değeri için sistem içerisine CR-39 detektörleri yerleştirilerek sistem 20 kez çalıştırılmış ve deneyler tekrarlanmıştır.

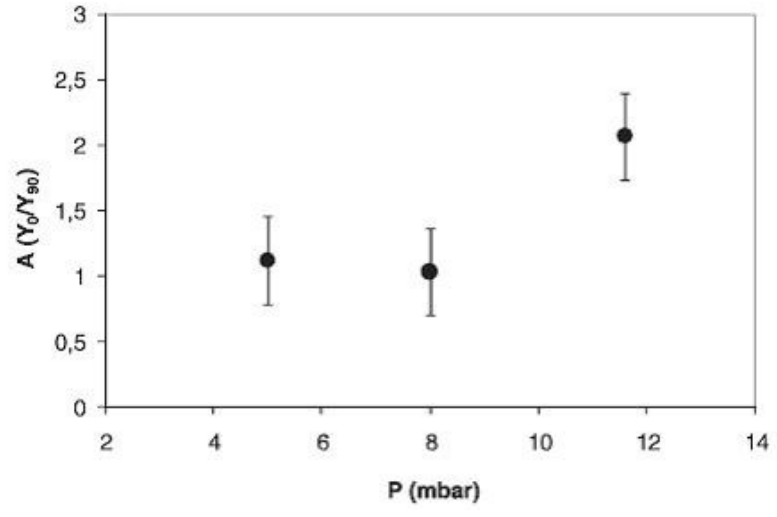
Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre plazma odak cihazında ortaya çıkan maksimum nötron verimliliği için en uygun çalışma basıncı $P = 11.5$ mbar olarak belirlenmiştir. Şekil 6.10'da basınca göre ortalama nötron verimliliği grafiği gösterilmiştir.



Şekil 6.10 Basınca göre ortalama nötron verimliliği grafiği

CR-39 detektörlerindeki izlerden yararlanılarak anizotropi oranı ($A=Y_0/Y_{90}$) belirlenmiştir. Şekil 6.11' de basınç ile anizotropi oranı değişimi verilmiştir.

Çalışmalar sonucunda elde edilen anizotropi oranı yapmış olduğumuz deneylerle $A=2.07$ olarak bulunmuştur. Literatürde yapılan çalışmalar sonucunda anizotropi oranının elektrot geometrisine bağlı olduğu ve $A=2.3$ civarında olduğu bilinmektedir (Castillo vd. 2002).



Şekil 6.11 Basınca göre anizotropi oranı

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yedi bölümden oluşan bu çalışmada füzyon ve plazma fiziği çalışmalarında kullanılan plazma odak cihazı incelenmiştir. Çalışmada füzyon ve plazma konularında kısa bilgiler verilmiştir.

Dördüncü bölümde plazma cihazlarından bir tanesi olan plazma odak cihazı, plazma odak cihazının yapısı, plazma odak cihazında kullanılan sistemler, çalışma prensibi ve plazma odak cihazının elektriksel eşdeğer devresi incelenmiştir. Yüksek yoğunluk, yüksek sıcaklık ve kısa ömre sahip plazmanın oluşturulduğu cihaz olan plazma odak cihazı, plazma dinamiği çalışmanın yanında astrofizik, materyal bilimi ve füzyonla ilgili temel ve uygulamalı araştırmalar için de önemli bir çalışma alanıdır. Bu cihazlarla, elektron ve iyon demetleri, elektromanyetik ışımanın geniş bir spektrumu ve çalışma gazı olarak döteryum kullanılması durumunda nötron ve protonlar elde edilebilir. Bu nedenle önemli ve geniş bir çalışma alanına sahip olan plazma odak cihazları konusunda çalışmalar yapmak bilime katkısı yanında dünyada mevcut birçok plazma odak cihazı çalışmalarını takip etmek açısından da önemlidir.

Beş ve altıncı bölümlerde çalışmaların yapıldığı ODAK-3K cihazının tasarımı, sistemde kullanılan malzeme ve cihazlar, cihaz ile yapılan füzyon çalışmaları anlatılmıştır.

Sistemde iki farklı elektrot sistemi kullanılarak sistemin optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yüksek gerilim sondası ve Rogowski bobinleri kullanılarak akım-gerilim karakteristikleri elde edilmiş ve plazmanın sıkıştığı nokta yani odak oluşumu gözlenmiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen akım ve gerilim karakteristiklerinin literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu gözlenmiştir. İkinci tip elektrot sistemi kullanılarak yapılan deneylerde sistemin empedans uyumunun daha iyi ve odak noktasının akımın maksimum değerine daha yakın olduğu gözlenmiştir. İkinci tip elektrot sistemi ile 11.5 mbar basınç ve 14 kV gerilim değerlerinde yapılan deneylerde pik akımı $I_{\text{peak}}=39$ kA olarak bulunmuştur.

İkinci tip elektrot sisteminde, elektrotlar arasında yalıtkan olarak kullanılan payreks anot üzerine tam olarak oturtularak yalıtkan yüzeyde oluşmaya başlayan akım kılıfının elektrotlar arasında simetrik bir yapıya sahip olarak ilerlemesi sağlanmıştır ve payreksin iyi bir yalıtkan malzemesi olduğu gözlenmiştir.

ODAK-3K cihazında çalışma gazı olarak döteryum kullanılmış ve farklı basınç değerleri için füzyon çalışmaları yapılmıştır. CR-39 plastik iz detektörleri kolay kullanımları, vakum ortamlarında kullanılma özelliğine sahip olmaları nedeniyle plazma odak cihazlarında füzyon reaksiyonları sonucu çıkan ürünlerin deteksiyonunda tercih edilmektedirler. ODAK-3K füzyon deneylerinde de CR-39 plastik iz detektörleri kullanılmıştır. Detektörlerin okuma işlemi ise Radosys sisteminde yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu nötron verimi için en uygun çalışma basıncının 11.5 mbar olduğu belirlenmiştir.

İkinci tip elektrot sistemi ile 11.5 mbar basınçta çalışma gazı olarak döteryum kullanılarak yapılan çalışmalarda nötron sayısı sistemin çalıştırılması başına 3.3×10^5 olarak hesaplanmıştır. Akım ile nötron verimliliği arasındaki bağıntıyı veren ölçekleme kanunu $Y \propto I^{3.46}$ olarak bulunmuştur. Bulunan bu değer literatürdeki değerlerle uyumlu olduğu gözlenmiştir (Conrads 1990, Soto 2005).

Çalışmalar sonucunda elde edilen anizotropi oranı $A=2.07$ olarak bulunmuştur. Bu değer literatürde yapılan çalışmalarla uyum içindedir (Castillo vd. 2002, Soto 2005).

Odak-3K cihazı ile füzyon çalışmaları yapılmıştır. Darbeli ve çok kısa ömürlü plazma oluşturulduğu için plazma parametreleri Langmuir sondası ile ölçülememiştir. İleriki çalışmalarda füzyon çalışmalarına ek olarak plazma yoğunluğu ve sıcaklığı gibi plazma parametreleri ölçülmeye çalışılacaktır. Bu amaçla paslanmaz çelikten oluşan vakum odacığı kullanılarak yeni bir plazma odak cihazı oluşturulmuştur. Oluşturulan yeni sistem Şekil 7.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 7.1 Yeni oluşturulan plazma odak cihazı

Oluşturulan plazmanın gözlenebilmesi, gerekli ölçümlerin alınabilmesi ve plazma parametrelerinin incelenebilmesi için vakum odacığına 10 adet giriş (port) yapılmıştır. Yeni sistemde spektroskopi ve Thomson saçılması yöntemleri kullanılarak plazma parametreleri (sıcaklık, yoğunluk) ölçümleri yapılacaktır. Ayrıca gaz analizörü kullanılarak füzyon reaksiyonu sonrası ortaya çıkacak olan helyum ölçülecektir.

KAYNAKLAR

- Aflori, M. and Sullivan, J. L. 2005. Langmuir probe measurements in an asymmetrical RF discharge. Romanian Reports in Physics, 57 (1), 71-77.
- Akgün, Y., Bölükdemir, A. S., Kurt, E., Öncü, T. and Alaçakır, A. 2009. Preliminary plasma focus studies at ODAK-3K device using track detectors. Plasma Devices Oper., 17 (4), 293-300.
- Akgün, Y., Bölükdemir, A. S., Kurt, E., Öncü, T. ve Alaçakır, A. 2010. Odak-3K cihazıyla plastik iz dedektörleri kullanılarak yapılan plazma odak ölçümleri. TAEK TR 2010-1, 19 s., Ankara.
- Angeli, E., Frignani, M., Mannucci, S., Rocchi, F., Sumini, M. and Tartari, A. 2006. The heating of plasma focus electrodes. Plasma Sources Sci Technol, 15, 91-98.
- Anonymous. 2007. National Research Council (U.S.) Plasma 2010 Committee. Plasma Science: Advancing Knowledge in the National Interest, 262, United States of America.
- Anonymous. 2010. Web sitesi: <http://www.richieburnett.co.uk/static.html>, Erişim tarihi: 25.07.2010.
- Anonymous. 2010. Web sitesi: <http://www.iter.org/>, Erişim tarihi: 13.08.2010.
- Anonymous. 2010. Web sitesi:
http://www.ifpilm.waw.pl/IPPLM/index.php?option=com_content&view=article&id=19:pf-1000&catid=9:science&Itemid=38, Erişim Tarihi: 17.08.2010
- Anonymous. 2010. Web sitesi:
http://www.ncnr.nist.gov/safety/memo/lithiated_shield.html, Erişim tarihi: 17.08.2010.
- Anonymous. 2010. Web sitesi: <http://www.plasma-universe.com/Plasma-Universe.com>, Erişim tarihi: 22.08.2010
- Bartlett, D. 2006. The European fusion programme. Transactions of Fusion Science and Technology, 49, 27-35.
- Bernard, A., Coudeville, A., Jolas, A., Launspach, J. and De Mascureau, J. 1975. Experimental studies of the plasma focus and evidence for nonthermal processes. Phys. Fluids, 18 (2), 180-194.

- Bernstein, M. J., Meskan, D. A. and Van Paassen, H. L. L. 1969. Space, time, and energy distributions of neutrons and X-rays from a focused plasma discharge. *The Physics of fluids*, 12 (10), 2193-2202.
- Bittencourt, J. A. 2004. *Fundamentals of Plasma Physics*. Springer-Verlag publish, 678, New York.
- Boyd, T. J. M. and Sanderson, J. J. 2003. *The Physics of Plasmas*. Cambridge University Press, 532, Cambridge, United Kingdom.
- Böyükdemir, A. S., Akgün, Y., Kurt, E., Öncü, T. and Alaçakır, A. 2009. D-D fusion studies at ODAK-3K plasma focus device. *International Journal of Electrical Energy Systems*, 1(2), 65-69.
- Bruzzone, H., Kelly, H. and Moreno, C. 1990. The effect of transmission lines and switching action on the electrical signals in a powerful capacitive discharge. *IEEE T. Plasma Sci.*, 18 (4), 689-694.
- Campos, D. O., Berni, L. A., Machida, M. and Moshkalyov, S. A. 1998. Low-angle Thomson scattering experiment for determination of plasma electron density and temperature. *Astrophys. Space Sci.*, 256, 437-441.
- Castillo, F., Herrera, J. J. E., Rangel, J., Alfaro, A., Maza, M. A., Sakaguchi, V., Espinosa, G. and Golzarri, J. I. 2002. Neutron anisotropy and x-ray production of the FN-II dense plasma focus devic. *Braz. J. Phys.*, 32(1), 3-12.
- Castillo, F., Herrera, J. J. E., Gamboa, I., Rangel, J., Golzarri J. I. and Espinosa, G. 2007. Angular distribution of fusion products and x-rays emitted by a small dense plasma focus machine. *J. Appl. Phys.*, 101,013303,1-7.
- Chen, F.F. 1974. *Introduction to Plasma Physics*. Plenum Press, 329, New York.
- Chen, F. F. and Chang, J. P. 2002. *Lecture Notes on Principles of Plasma Processing*. Plenum/Kluwer Publishers, 208, New York.
- Collopy, M. T., Carpender, P., Harmon, C. D., Vandenberg, J., Cooper, G. W., Ruiz, C. L., Reyes, P., Stygar, W. A., Schmidlapp, A., Malbrough, D. J. and Becker, R. 1992. Callibration of CR-39 for detecting fusion neutrons. *Rev. Sci. Instrum.*, 63, 4892-4894.
- Conrads, H. 1990. Denssec plasma focus as a neutron source for fusion research. *Nucl. Sci.Eng.*, 106, 299-307.

- Demirkıran, A. and Avcı, E. 1999. Evaluation of functionally gradient coatings produced by plasma-spray technique. *Surf. Coat. Tech.*, 116-119, 292-295.
- Dendy, R. 1993. *Plasma Physics: An Introductory Course*. Cambridge University Press, 513, United Kingdom.
- Donges, A., Herziger, G., Krompholz, H., Rühl, F. and Schönbach, K. 1980. The breakdown phase in a coaxial plasma gun. *Phys. Lett.*, 76A (5,6), 391-392.
- Donne, A. J. H. 2008. Introduction to plasma diagnostics. *Transact. of Fusion Sci. Techn.*, 53, 379-386.
- Erdoğan, M., Güneş, İ. ve Develi, F. 2006. Plazma sprej ve kullanım alanları. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 61-66.
- Fang, J. C. and Xu, W. J. 2002. Plasma spray forming. *J. Mater. Process. Tech.*, 129 (1-3), 288-293.
- Feugas, J. N. 1989. The influence of the insulator surface in the plasma focus behavior. *J. Appl. Phys.*, 66 (8), 3467-3471.
- Freidberg, J. P. 2007. *Plasma Physics and Fusion Energy*. Cambridge University Press, 671, United Kingdom.
- Gribkov, V. A. 2007. Current and perspective applications of dense plasma focus devices. 17th IAEA Technical Meeting on Research Using Small Fusion Devices, Lisbon.
- Gruner, H. 1984. Vacuum plasma spray quality control. *Thin Solid Films*, 118 (4), 409-420.
- Herrmann, H. W., Henins, I., Park, J. and Selwyn, G. S. 1999. Decontamination of chemical and biological warfare (CBW) agents using an atmospheric pressure plasma jet (APPJ). *Phys. Plasmas*, 6 (5), 2284-2289.
- Höcker, H. 2002. Plasma treatment of textile fibers. *Pure Appl. Chem.*, 74 (3), 423-427.
- Hussain, S. and Zakaullah, M. 2007. Reliable field distortion spark gap for plasma focus. *Plasma Sci. Technol.*, 9 (4), 504-507.
- Jakubowski, L., Sadowski, M. and Zebrowski, J. 2001. Measurements of charged particle beams from plasma focus discharges. *Nucl. Fusion*, 41(6), 755-759.
- Karahan, A., Yaman, N., Demir, A., Özdoğan, E., Öktem, T. ve Seventekin, N. 2007. Tekstilde plazma teknolojisinin kullanım olanakları: plazma teknolojisinin doğal liflerde kullanımı. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 17 (1).

- Kies, W. 1986. Power limits for dynamical pinch discharges. *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, 28 (11), 1645-1657.
- Krane, K. S. 2002. *Nükleer Fizik 2*. Palme Yayıncılık, 378-839, Ankara.
- Krompholz, H., Neff, W., Rühl, F., Schönbach, K. and Herziger, G. 1980. Formation of the plasma layer in a plasma focus device. *Phys. Lett.*, 77A (4), 246-248.
- Kurt, E., Kurt, H. ve Bayhan, U. 2009. Ionization effects and linear stability in a coaxial plasma device. *Cent. Eur. J. Phys.*, 7(1), 123-129.
- Langmuir, I. and Jones, H. A. 1928. Collisions between electrons and gas molecules. *Phys. Rev.*, 31, 357-404.
- Lee, J.H., McFarland, D.R. and Harries, W.L. 1978. Investigation of a staged plasma focus apparatus. *Plasma Phys.*, 20, 1025-1038.
- Lee, S., Lee, P., Zhang, G. X., Feng, X., Gribkov, V. A., Liu, M. H., Serban, A. and Wong, T. K. 1998. High rep. rate high performance plasma focus as a powerful radiation source. *IEEE T. Plasma Sci.*, 26, 1119-1126.
- Lee, S. 1998. Twelve Years of UNU/ICTP PFF-A Review. *Proceedings of Satellite Meeting of the International Meeting on Frontiers of Physics, ICTP Preprint IC/98/231*, 5-34.
- Lee, S. 1998. Radiation enhancement and applications scaling from the UNU/ICTP PFF. *Proceedings of Satellite Meeting of the International Meeting on Frontiers of Physics, ICTP Preprint IC/98/231*, 35-47.
- Lee, S., Lee, P., Saw, S. H. and Rawat, R. S. 2008. Numerical experiments on plasma focus pinch current limitation. *Plasma Phys. Contr. F.*, 50, 065012, 1-8.
- Lee, S. and Saw, S. H. 2008. Neutron scaling laws from numerical experiments. *J. Fusion Energy*, 292-295.
- Lee, S. and Saw, S. H. 2010. The plasma focus and Lee model. *Second International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER) 2010, Workshop on Fusion Energy Plasma Focus Numerical Experiments*, 2-18.
- Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J. 2005. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. Published by John Wiley & Sons, Inc., 757, New Jersey.
- Liu, M. 1996. Soft X-rays from compact plasma focus. Ph.D. thesis (unpublished), Nanyang Technological University, 225 p., Singapore.

- Masoud, M. M., El-Gamal, H. A., El-Tayeb, H. A., Hassouba, M. A. and Abd Al-Halim, M. A. 2007. Magnetohydrodynamic simulation for plasma focus devices. *Plasma Devices Oper.*, 15(4), 263-281.
- Morelli, B., Vilela, E. and Fantuzzi, E. 1999. Dosimetric performance of the fast neutron dosimeter for enea personal dosimetry service. *Radiat. Prot. Dosim.*, 85 (1-4), 105-108.
- Murgatroyd, P. N., Chu, A. K. Y., Richardson, G. K., West, D., Yearley, G. A. and Spencer, A.J. 1991. Making Rogowski coils. *Meas. Sci. Technol*, 2, 1218-1219.
- Nishikawa, K. and Wakatani, M. 2000. *Plasma physics: basic theory with fusion applications* Springer, 342, Germany.
- Oğuz, B. 1988. Plasma arklı kaynak ve kesme. *Kaynak Bilimi*, Oerlikon Yayını, Sayı 2.
- Ongena, J. and Van Oost, G. 2008. Prospects for fusion power as a future energy source. *Transact. of Fusion Sci. Techn.*, 53, 3-15.
- Özdemir, U. ve Erten, M. 2004. Plazma nitrürlemenin sert metal plakelerde sürtünme katsayısına etkisi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1 (3), 29-38.
- Pfender, E. 1988. Fundamental studies associated with the plasma spray process. *Surf. Coat. Tech.*, 34 (1), 1-14.
- Pospieszczyk, A. 2008. Spectroscopy. *Transact. Of Fusion Sci. Techn.*, 53, 417-424.
- Proud, J. 1991. *Plasma Processing of Materials: Scientific Opportunities and Technological Challenges*. National Academy Press, 75, Washington.
- Rajesh, R., Kumar, B. R., Varshney, S. K., Kumar, M., Chavda, C., Thakkar, A., Patel, N. C., Kumar, A. and Team, A. 2000. Electron temperature (T_e) measurements by Thomson scattering system. *Pramana-J. Phys.*, 55 (5&6), 733-740.
- Ramboz, J. D. 1996. Machinable Rogowski coil, design, and calibration. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 45(2), 511-515.
- Rapp, H. 1973. Measurements referring to plasma focus scaling laws. *Phys. Lett.*, 43A (5), 420-422.
- Raspa, V., Sigaut, L., Llovera, R., Cobelli, P., Knoblauch, P., Vieytes, R., Clausse, A., and Moreno, C. 2004. Plasma focus as a powerful hard X-ray source for ultrafast imaging of moving metallic objects. *Braz. J. Phys.*, 34(4B), 1696-1699.

- Sanchez-Lopez, J. C., Donnet, C., Fontaine, J., Belin, M., Grill, A., Patel, V. and Jahnes, C. 2000. Diamond-like carbon prepared by high density plasma. *Diam. Relat. Mater.*, 9 (3-6), 638-642.
- Scholz, M. and Ivanova-Stanik, I.M. 2000. Initial phase in plasma focus device – model and computer simulation. *Vacuum*, 58, 287-293.
- Selwyn, G. S., Herrmann, H. W., Park, J. and Henins I. 1999-2000. Materials processing using an atmospheric-pressure plasma jet. *Physics Division Progress Report*, 189-197.
- Shan, B. 2000. Comparative study of dynamics and X-ray emission of several plasma focus devices. Ph.D. thesis (unpublished), School of Science Nanyang Technological University, 206 p., Singapore.
- Soto, L. 2005. New trends and future perspectives on plasma focus research. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 47, A361-A381.
- Springham, S. V., Lee, S. and Moo, S. P. 2002. Deuterium plasma focus measurements using solid state nuclear track detectors. *Braz. J. Phys.*, 32(1), 172-178.
- Srivastava, M. P. 1998. Studies on dense plasma focus at Delhi University. *Proceedings of Satellite Meeting of the International Meeting on Frontiers of Physics, ICTP Preprint IC/98/231*, 58-66.
- Stepniewski, W., Scholz, M., Bienkowska, B., Ivanova-Stanik, I. M., Paduch, M. and Sadowski, M. J. 2006. Theoretical and experimental study of plasma dynamics in PF1000 facility. *Czech. J. Phys.*, 56(2), 401-405.
- Szydlowski, A. 2003. Application of CR-39 track detectors for corpuscular diagnostics of high-temperature plasmas. *Radiat. Meas.*, 36, 35-42.
- Toepfer, A. J., Smith, D. R. and Beckner, E. H. 1971. Ion heating in the dense plasma focus. *Phys. Fluids*, 14 (1), 52-61.
- Tonks, L. 1929. Two energy types in wave motion and their relation to group and wave velocity. *Phys. Rev.*, 33, 239-242.
- Tonks, L. and Langmuir, I. 1929. Oscillations in ionized gases. *Phys. Rev.*, 33, 195-210.
- Van Oost, G. and Rebhan, E. 2008. Thermonuclear burn criteria. *Transact. of Fusion Sci. Techn.*, 53, 16-26.
- Verschuren, J., Kiekens, P. and Leys, C. 2007. Textile-specific properties that influence plasma treatment, effect creation and effect characterization. *Text. Res. J.*, 77

(10), 727-733.

- Ward, D. A. and Exon J. La T. 1993. Using Rogowski coils for transient current measurements. *Engineering Science and Education Journal*, 105-113.
- Warner, K. and Hieftje, G. M. 2002. Thomson scattering from analytical plasmas. *Spectrochimica Acta Part B*, 57, 201-241.
- Yaman, N., Özdoğan, E. ve Seventekin, N. 2009. Atmosferik plazma işlemi kullanılarak poliamid kumaşların özelliklerinin değiştirilmesi üzerine bir araştırma. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3 (1), 1-10.
- Yousefi, H.R., Aghamir, F.M. and Masugata, K. 2007. Effect of the insulator length on Mather-type plasma focus devices. *Phys. Lett. A*, 361, 360–363.
- Yousefi, H.R., Nakata, Y., Ito, H. and Masugata, K. 2007. Characteristic observation of the ion beams in the plasma focus device. *Plasma Fusion Res.*, 2, S1084, 1-4.
- Zakaulah, M., Ahmad, I., Shafique, M., Khanam, S., Omar, A. R., Mathuthu, M., Murtaza, G. and Beg, M. M. 1997. Plasma focus characteristics using stainless steel anode. *Phys. Scrip.*, 56, 649-654.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Yeşim AKGÜN
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 24.02.1978
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ankara Atatürk Anadolu Lisesi (1996)
Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği
Bölümü (2001)
Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (2004)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü (2002-2006)
Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (2006-)

Yayımları (SCI ve diğer)

1. **Akgün, Y.**, Erdoğan, F., and Tezcan, C. 2006. Milne problem for isotropic and linearly anisotropic scattering for specular and diffuse reflecting boundary conditions solved with the H_N method. Kerntechnik, 71(5-6), 297-305.
2. **Akgün, Y.**, Bölükdemir, A. S., Kurt, E., Öncü, T. and Alaçakır, A. 2009. Preliminary plasma focus studies at ODAK-3K device using track detectors. Plasma Devices Oper., 17 (4), 293-300.
3. Bölükdemir, A. S., **Akgün, Y.**, Kurt, E., Öncü, T. and Alaçakır, A. 2009. D-D fusion studies at ODAK-3K plasma focus device. International Journal of Electrical Energy Systems, 1(2), 65-69.