

HAVA HARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ ENSTİTÜSÜ

**MİKRODALGA ELEKTROTERMAL İTKİ SİSTEMİ:
TASARIMI, ÜRETİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Mehmet Serhan YILDIZ

Uzay Bilimleri Anabilim Dalı Başkanlığı

Uzay Bilimleri Programı

KASIM 2016



**HAVA HARP OKULU
HAVACILIK VE UZAY TEKNOLOJİLERİ
ENSTİTÜSÜ**



**MİKRODALGA ELEKTROTERMAL İTKİ SİSTEMİ:
TASARIMI, ÜRETİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

**Mehmet Serhan YILDIZ
(511202)**

Uzay Bilimleri Anabilim Dalı Başkanlığı

Uzay Bilimleri Programı

**Tez Danışmanı: Doç.Dr. Murat ÇELİK
Eş Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.Hv.Müh.Alb. İbrahim KOÇ**

KASIM 2016

Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü'nün 511202 numaralı Doktora Öğrencisi **Mehmet Serhan YILDIZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**MİKRODALGA ELEKTROTHERMAL İTKİ SİSTEMİ: TASARIMI, ÜRETİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ**" başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç.Dr. Murat ÇELİK**
Boğaziçi Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Mehmet Fevzi ÜNAL**
MEF Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Ahmet ÖNCÜ
Boğaziçi Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr.Hv.Müh.Alb. Mustafa Emre AYDEMİR
Hava Harp Okulu

Doç.Dr.Hv.Müh.Yb. Zafer KAZANCI
Hava Harp Okulu

Teslim Tarihi : **1 Kasım 2016**
Savunma Tarihi : **30 Kasım 2016**

Bu tez çalışmasında belirtilen görüş ve yorumlar yazara aittir. Türk Silahlı Kuvvetleri'nin ya da diğer kamu kuruluşlarının görüşlerini yansıtmaz. Ayrıca bu tez çalışması bilimsel ahlak ve etik değerlere uygun olarak yazılmış olup, yararlanılan tüm eserler kaynaklarda gösterilmiştir.

Kasım 2016

Mehmet Serhan YILDIZ

Şehitlerimizin aziz hatırasına,

ÖNSÖZ

1995 yılında Işıklar Askeri Lisesine girerek Türk Silahlı Kuvvetleri saflarına katıldığım günden beri "*Bir ulusun asker ordusu ne kadar güçlü olursa olsun, kazandığı zafer ne kadar yüce olursa olsun, bir ulus ilim ordusuna sahip değilse, savaş meydanlarında kazanılmış zaferlerin sonu olacaktır. Bu nedenle bir an önce büyük, mükemmel bir ilim ordusuna sahip olma zorunluluğu vardır.*" diyen Başkomutan Mustafa Kemal Atatürk'ün bir neferi olarak 2011 yılında başladığım doktora çalışmasını bu tez ile nihayetine erdirmiş bulunuyorum. Doktora sürecinde edindiğim bilgi ve tecrübelerin bundan sonra başta yapacağım akademik çalışmalar olmak üzere hayatımın her safhasında bana yol gösterici olacağına inanıyorum. Bu süreçte bana, tecrübe, bilgisi, öğreticiliği ve desteği ile yol gösteren başta tez danışmanım sayın Doç.Dr. Murat Çelik ve eş danışmanım Yrd.Doç.Dr.Hv.Müh.Alb. İbrahim Koç olmak üzere tez ilerleme jürimde bulunan tüm saygıdeğer hocalarımı sonsuz teşekkür ederim. Tez çalışmam boyunca bana tecrübe ve bilgisiyle destek olan sayın Doç.Dr. Hüseyin KURT'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimin esasını oluşturan deney düzeneğinin kurulması ve projenin yürütülmesi için maddi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkürü bir borç bilirim.

Doktoraya başladığım günden beri beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan ve ne zaman sıkıntıyla düşsem yardımına koşan Ali Nadi Ünal, Funda Seçkin, Çağlar Utku Güler ve Mehmet Bayram'a sonsuz şükran ve sevgilerimi sunarım. Doktora tezim boyunca bana destek olan Boğaziçi Üniversitesi yüksek lisans öğrencileri Uğur Kokal ve Nazlı Turan'a akademik hayatları boyunca başarılar diler ve teşekkür ederim. Ayrıca doktora serüvenim sürecinde benden desteklerini esirgemeyen HUTEN Müdürlüğündeki sevgili mesai arkadaşlarına teşekkür ederim.

Doktora eğitimi sürecinde hep yanmda bana destek olan ve bu süreçte, birlikte geçireceğimiz zamanlardan fedakarlıkta bulunan hayat arkadaşım ve biricik eşim Serap'a ve canım oğlum Göktuğ Kaan'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2016

Mehmet Serhan YILDIZ
Hv.İkm.Yzb.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Elektrikli İtki Sistemlerine Genel Bir Bakış.....	2
1.2 Literatür Araştırması	6
1.3 Tezin Amacı.....	9
2. MİKRODALGA ELEKTROTERMAL İTKİ SİSTEMİ KAVRAMI.....	11
2.1 Mikrodalga Elektrotermal İtki Sisteminin Ana Bileşenleri ve Çalışma Prensibi	12
2.2 MET Sisteminin Elektromanyetik İncelemesi.....	13
2.2.1 Rezonans kavite içerisinde elektrik alan dağılımı	14
2.2.2 Rezonans kavite boyutlarının belirlenmesi.....	16
2.2.3 Rezonans kavitenin elektromanyetik analizi	17
2.2.3.1 Silindirik rezonant kavite içerisinde elektrik alan dağılımı	18
2.2.3.2 Plazmanın elektrik alan üzerindeki etkisi	20
3. MET SİSTEMİ PROTOTİPİ VE TESTLERİ.....	25
3.1 Mikrodalga Üreteci ve İletim Hattı	31
3.2 Ölçme Sistemleri	32
3.3 MET Sistemi Tasarımı.....	33
3.4 Sonuçlar ve Analiz.....	35
4. BOYUTSUZ ENERJİ TRANSFER MODELİ.....	43
4.1 Elektromanyetik Dalga ve Plazma Etkileşimi	45
4.2 Parçacık Denge Denklemi	47
4.3 Elektronlar İçin Enerji Denge Denklemleri.....	49
4.4 Ağır Parçacıklar ve Plazma Etrafında Akan Gaz İçin Enerji Dengesi Denklemleri	50
4.5 Roket Denklemleri.....	52
4.6 Analiz Sonuçları	52
5. SONUÇ	59
5.1 Gelecek Dönemde Yapılacak Çalışmalar ve Öneriler	62
KAYNAKLAR.....	67

EKLER	75
EK A.....	77
Rezonans Kavite için Elektromanyetik Denklem Çözümleri.....	77
TM_{011} Modda Çalışan Bir Silindirik Rezonans Kavite için Dalga Denklemi Çözümü.....	77
Manyetik Vektör Potansiyeli A	79
Elektrik Alan Potansiyeli F	79
TE modu	80
TM modu	81
TM_{011} Modu için Örnek Çözüm	83
Rezonans Kavite Kalite Faktörü.....	84
EK B	87
Elektron Sürekllilik ve Akı Denklemleri.....	87
EK C	91
BUSTLab MET Teknik Resimleri.....	91
ÖZGEÇMİŞ	106

KISALTMALAR

BUSTLab	: Bogazici University Space Technologies Laboratory
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EEDF	: Electron Energy Distribution Function
MET	: Microwave Electrothermal Thruster
MFR	: Mass Flow Rate
RF	: Radio Frequency
SCCM	: Standard Cubic Centimeter per Minute
SLM	: Standard Liter per Minute
TM	: Transverse Magnetic
TE	: Transverse Electric
TEM	: Transverse Electromagnetic

SEMBOL LİSTESİ

a	: Kavite yarıçapı (m)
A_e	: Lüle çıkış kesit alanı (m^2)
A_t	: Lüle boğaz kesit alanı (m^2)
D	: Difüzyon katsayısı (m^2/s)
e	: Elektron yükü ($1.60217662 \times 10^{-19} C$)
E	: Elektrik alan (V/m)
E_z	: Elektrik alan doğrusal bileşeni (V/m)
E_ρ	: Elektrik alan radyal bileşeni (V/m)
E_ϕ	: Elektrik alan açısal bileşeni (V/m)
f_c	: Kesme frekansı ($1/s$)
f_r	: Rezonans frekansı ($1/s$)
g	: Yerçekimi ivmesi (m/s^2)
h	: Kavite yüksekliği (m)
I_{sp}	: Özgül impuls (s)
J_0	: Birinci türden sıfırıncı mertebeden Bessel fonksiyonu
J_1	: Birinci türden birinci mertebeden Bessel fonksiyonu
m_e	: Elektron kütlesi ($9.1093826 \times 10^{-31} kg$)
m_p	: Yakıt kütlesi (kg)
m_0	: Toplam kütle (kg)
n_e	: Plazma yoğunluğu ($\#/m^3$)
n_0	: Merkezdeki plazma yoğunluğu ($\#/m^3$)
N	: Nötr atom yoğunluğu ($\#/m^3$)
p_a	: Dış ortam basıncı (Pa)
p_c	: Soğuk gaz akışında kavite içi basınç (Pa)
p_e	: Lüle çıkış basıncı (Pa)
p_h	: Sıcak gaz akışında kavite içi basınç (Pa)
P_{abs}	: Plazma tarafından emilen güç (W)
P_d	: Kavite içinde emilen güç (W)
P_I	: Kavite içerisine gönderilen güç (W)
P_R	: Geri yansıyan güç (W)
P_{Cond}	: İletimle ısı geçisi (W)
P_{Conv}	: Taşınımla ısı geçisi (W)
$P_{Mekanik}$: Mekanik güç (W)
$P_{Elektrik}$: Elektriksel güç (W)
$P_{elastic}$: Elastik çarpışmalarda aktarılan güç (W)
$P_{inelastic}$: Elastik olmayan çarpışmalarda aktarılan güç (W)
Q	: Kalite faktörü
R_c	: Kavite yarıçapı (m)
R_p	: Plazma yarıçapı (m)
T_c	: Soğuk gaz akışında kavite içi sıcaklık (K)
T_e	: Elektron sıcaklığı (K)
T_{eV}	: Elektron sıcaklığı (eV)

T_g	: Gaz sıcaklığı (K)
T_h	: Sıcak gaz akışında kavite içi sıcaklık (K); Ağır parçacıkların sıcaklığı (K)
T_i	: İnlet giriş sıcaklığı (K)
T_{ex}	: Lüle çıkış sıcaklığı (K)
u_{ext}	: Roket çıkış hızı (m/s)
W_s	: Kavite içinde depolanan enerji (J)
z	: Kavite boyutu doğrusal bileşeni
β	: Faz sabiti
ϵ	: Dielektrik sabiti (F/m)
ϵ_p	: Plazma dielektrik sabiti
ϵ_r	: Relatif dielektrik sabiti
ϵ_0	: Serbest uzay dielektrik sabiti ($8.854187817 \times 10^{-12} F/m$)
η	: Sistem verimi
η_c	: Bağlanma verimi
η_τ	: İtki verimi
μ	: Manyetik geçirgenlik (H/m)
μ_0	: Serbest uzayın manyetik geçirgenliği ($4\pi \times 10^{-7} H/m$)
v_m	: Elastik çarpışma frekansı ($1/s$)
v_{iz}	: İyonizasyon frekansı ($1/s$)
ρ	: Kavite boyutu radyal bileşeni
σ	: Elektrik iletkenliği ($1/\Omega m$)
τ	: İtki (N)
χ_{01}	: Bessel fonksiyonunun birinci kökü
ω	: Electromanyetik dalga radyal frekansı ($1/s$)
ω_p	: Plazma frekansı ($1/s$)
Γ	: Yansıma katsayısı
\dot{m}	: KütleSEL debi (kg/s)
\dot{m}_p	: Harcanan yakıt debisi (kg/s)
\forall_p	: Plazma hacmi (m^3)

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: İtki sistemleri performans parametreleri. [1–3].....	4
Çizelge 2.1: Boyutlar Tablosu	18
Çizelge 3.1: MET Üretiminde Kullanılabilen Malzemeler.....	35
Çizelge 3.2: 400 W Mikrodalga güç seviyesinde performans parametreleri.....	40
Çizelge 3.3: 500 W Mikrodalga güç seviyesinde performans parametreleri.....	41
Çizelge 4.1: Modelenen MET Konfigürasyonları	53

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 : Uzay İtki Sistemleri.....	1
Şekil 1.2 : Elektrikli İtki Sistemleri	5
Şekil 2.1 : Mikrodalga Elektrotermal İtki Sistemi şeması.....	12
Şekil 2.2 : Rezonans kavite koordinat sistemi	15
Şekil 2.3 : TM_{011} rezonans kavite içerisinde elektrik alan dağılımı.....	16
Şekil 2.4 : Elektromanyetik model.....	18
Şekil 2.5 : Kavite içerisindeki elektrik alan dağılımı (a)Boş kavite, (b)Ayırma levhası yerleştirilmiş kavite, (c)Ayırma levhası ve anten yerleştirilmiş kavite.....	19
Şekil 2.6 : Elektromanyetik alan analizi için çözüm ağı ve plazma modeli.	21
Şekil 2.7 : En iyi anten uzunluğu için analiz sonuçları.....	23
Şekil 2.8 : En iyi kavite uzunluğu için analiz sonuçları.....	24
Şekil 3.1 : Kavite üzerine magnetron bağlı MET prototipi. [4]	25
Şekil 3.2 : Deney düzeneği şeması.	26
Şekil 3.3 : MET sisteminin vakum odası içine yerleştirilmiş halinin üç boyutlu gösterimi.	27
Şekil 3.4 : Vakum odası içi deney düzeneği.	28
Şekil 3.5 : MET sisteminin vakum odası dışına asılmış halinin üç boyutlu gösterimi.	29
Şekil 3.6 : Vakum odası dışı deney düzeneği.....	30
Şekil 3.7 : Kuvarz tüp kullanan MET sistemi prototipi. [5]	34
Şekil 3.8 : Mikrodalga İtki Sistemi.....	35
Şekil 3.9 : Mikrodalga İtki Sistemi kesit hörünümü.	36
Şekil 3.10 : Soğuk Gaz, 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile kavite basıncı değişim grafiği.	38
Şekil 3.11 : 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile kavite içi sıcaklık değişim grafiği.	39
Şekil 3.12 : 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile itki değişim grafiği.	39
Şekil 3.13 : 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile özgül impuls değişim grafiği.	40
Şekil 4.1 : Plazma modeli şeması	44
Şekil 4.2 : Ağır parçacıklar ve plazma etrafında akan gaz için enerji modeli şeması.....	51
Şekil 4.3 : Farklı R_c/R_p değerleri için kütlesel debi ile özgül impuls değişimi grafiği.	53
Şekil 4.4 : MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile özgül impuls değişimi.....	54

Şekil 4.5	: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile itki değişimi.....	55
Şekil 4.6	: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile elektron sıcaklığı değişimi.....	56
Şekil 4.7	: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile elektron yoğunluğu değişimi.....	57
Şekil 4.8	: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile ağır parçacıkların sıcaklıkları değişimi.....	58
Şekil 4.9	: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile gaz sıcaklıkları değişimi.....	58
Şekil 5.1	: İtki ölçüm sistemleri	62
Şekil 5.2	: Çan Kavanozu vakum sistemi.....	63
Şekil 5.3	: Farklı frekanslarda MET tasarımları [6–8].....	64
Şekil 5.4	: BUSTLab MET egzoz gazı	64

MİKRODALGA ELEKTROTERMAL İTKİ SİSTEMİ: TASARIMI, ÜRETİMİ VE PERFORMANS ANALİZİ

ÖZET

Uzay itki sistemleri uzay araçlarının görev isterlerini doğrultusunda gerekli olan itki ihtiyacını karşılamak için kullanılan sistemlerdir. 1960'lı yillardan itibaren birçok uzay itki sistemi konsepti geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Resistojetler ve arkjetler bu sistemler arasında yaygın olarak kullanılan ve elektrotermal sistemler alt sınıfında olan sistemlerdir. Bu iki sistem birçok uzay platformunda kullanılmasına rağmen ömürlerini sınırlayan yapısal limitler halen aşılabilmiş değildir. Bu limitler arkjetlerde elektrot erozyonu problemi, resistojetlerde ise ısıtıcı elemanın termal dayanım limiti olarak ortaya çıkmaktadır. Bu iki sistemi limitleyen faktörler bilim adamlarını bu sistemlerin ikamesi olan ve yaklaşık itki ve özgül impuls seviyesinde performans gösterecek yeni bir sistem arayışına itmiştir. Mikrodalga Elektrotermal İtki (MET) sistemi de bu alternatiflerden birisi olarak ileriye sürülmüştür. MET konseptinde arkjet ve resistojetlerin zayıf yönleri elektrot ya da ısıtıcı eleman yerine serbest yüzey plazma kullanılarak aşılmaya çalışılmıştır. Bu kavram ortaya atıldığından sistemi tek limitleyecek faktörün sistem duvarlarının termal dayanım limiti olacağı düşünülmüştür. Duvarların sıcak gaza en az şekilde maruz kalması için yakıt gazının duvarlara teget olarak püskürtülmesi önerilmektedir.

Bir MET sisteminde yukarıda da belirtildiği gibi gazı ısıtmak için mikrodalga radyasyonu kullanılarak oluşturulan serbest yüzey plazma kullanmaktadır. Yakıt gazı sıcak plazma etrafında akarken ısınmaktadır. Dolayısıyla plazmanın aslında resistojetlerdeki ısıtma elamanının yaptığı işi üstlendliğini söylemek uygun olacaktır. Sistemde itki üretmek için diğer elektrotermal sistemlerde de olduğu gibi yakınsak-ıraksak bir lüle kullanılmaktadır. Isınan gaz lüleden geçerken gazın termal enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülerek lüle çıkışında yüksek hızlara ulaşan gazın atılmasıyla itki üretilmektedir. MET sisteminin çalışma prensibi tez kapsamında detaylı olarak anlatılmıştır.

MET konsepti ilk olarak Michigan State ve PennState üniversitesinden bilim adamları tarafından ortaya atılmıştır. Bu kavram ilk olarak ortaya çıktıığı günden bugüne kadar farklı freksnlarda çalışan prototipler üzerinde deneyler yapılmıştır. Sistem henüz hiç bir uzay aracı üzerinde denenmemesine rağmen uydu araçlarının boyutlarının küçülmesi yönündeki eğilim nedeniyle daha kompakt ve küçük MET sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bir mikrodalga elektrotermal itki sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Sistemin performans özelliklerinin anlaşılmasına yönelik olarak deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar; (i) 2-B eksenel simetrik bir elektromanyetik bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde tasarlanan kavite içerisindeki elektrik alan dağılımı simülle edilmiş ve plazma tarafından güç emilimi üzerine anten uzunluğu ve kavite uzunluğunun etkisi parametrik olarak çalışılmıştır.

(ii) Sistemin performans parametrelerini (itki, özgül impuls ve verimlilik) ölçmek için deneysel çalışma yapılmıştır. (iii) 0-B bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile sistemin performans parametreleri yanı sıra plazma özelliklerini (elektron sıcaklığı, yoğunluğu, ağır parçacıkların sıcaklıklarını) de hesaplanmıştır.

MET sistemi kavite boyutları 2.45 GHz ve TM_{011} modunda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. 2-B model sonuçları, tasarlanan bu kavite içerisindeki elektrik alan yoğunluğunun en yüksek değerine kavitenin iki uç duvarında ulaştığını göstermiştir. Simülasyon sonuçlarına göre dielektrik ayırma levhası ve anten uzunluğunun geri yansımaları artırdığı görülmüştür. Ayrıca kavite içerisinde plazma oluştuktan sonra güç emiliminin kavite uzunluğu azaldıkça arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Bir diğer simülasyon ise optimum anten uzunluğunun saptanması için yapılmıştır ve plazma şartlarında optimum anten uzunluğunun çeyrek dalga boyundan farklı bir değerde olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra optimum anten uzunluğunun değişen elektron yoğunluğu ile nasıl değiştigini anlamaya yönelik olarak bir parametrik çalışma yapılmıştır. Bunun sebebi değişen elektron yoğunluğu ile ortamın iletkenliğinin değişimidir.

Sistemin performans özelliklerini ölçmek için 400 ve 500 W mikrodalga güç seviyelerinde ve 84 mg/s 'a kadar akış debilerinde deneysel çalışma yapılmıştır. Yakıt gazı olarak Helyum gazı kullanılmıştır. Soğuk gaz akışında ve sıcak gaz akışında kavite içi basıncı ölçülmüş ve bu değerler roket denklemleri içerisinde kullanılarak performans parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplama yönteminden deneysel analiz bölümde detaylı olarak bahsedilmiştir. Sistemin ulaşabildiği en yüksek özgül impuls seviyesi olarak 348 s ve itki seviyesi olarak ise 266 mN değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerin resistojetlerin performans özelliklerine yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca gönderilen mikrodalga gücünün artmasının performans özelliklerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmanın yanı sıra, 2.45 GHz 'de ve 1200 W güç seviyesinde çalışan bir MET sistemi için enerji transfer mekanizmalarını anlamaya yönelik olarak bir global model geliştirilmiştir. Modelde elektron yoğunluğu, elektron sıcaklıkları, ağır parçacıkların sıcaklıkları ve gaz sıcaklığı farklı akış debileri için hesaplanmıştır. Plazma özelliklerine ek olarak sistem performans parametreleri de hesaplanmıştır. Çalışmada yakıt gazı olarak Helyum gazı seçilmiştir. Simülasyonlar 60 ile 165 mg/s aralığındaki akış debileri için yapılmıştır. İki akışkan modeli ile plazma parametreleri simüle edilmiştir. Modelde plazmadan gaza ısı transferi hesaplanırken plazma bir katı cisim gibi kabul edilmiştir. Model sonuçlarının tutarlığını ölçmek için sonuçlar Diamant vd.'nin deneysel çalışmasıyla karşılaştırılmıştır. İlgili denklemler COMSOL Multiphysics ticari yazılımının 0-D modülü kullanılarak çözülmüştür. Sonuçların deneysel veriler ile tutarlı olduğu görülmüştür. Belirlenen güç seviyesi için elektron sıcaklığı 1 eV , yoğunluğu ise 10^{19} #/m^3 mertebesinde hesaplanmıştır. Sonuçlara göre sistemin 1200 W seviyesindeki en yüksek özgül impuls değeri 450 s olarak hesaplanmıştır.

DESIGN, MANUFACTURE AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A MICROWAVE ELECTROTHERMAL THRUSTER SYSTEM

SUMMARY

Space propulsion systems which are used for the maneuvers of spacecraft in space corresponding to their mission requirements have been researched and developed since the 1960s. Resistojets and arcjets have more commonly been studied as electrothermal systems. Although they have been used on numerous space platforms and still are considered preferable, they have some inherent limitations. Thus, the cathode erosion problem of arcjets and thermal endurance limit of the heater element in resistojets led scientists to search for alternative electrothermal propulsion systems. Microwave electrothermal thruster (MET) is one of the proposed concepts put forward as a result of such a search. MET concept is expected to eliminate the handicaps of arcjets and resistojets using a free floating plasma instead of a resistant heater or electric arc produced using electrodes. By this concept, it is considered that limiting factors are reduced to only one which is the wall temperature endurance as in all thrusters. The wall temperature endurance concerns are also reduced by cooling the walls with the propellant gas.

Since it was first proposed by researchers at Michigan State University, researchers at PennState University and elsewhere conducted research on prototypes that operate at different frequencies and power levels. Although the MET concept has not yet been used on any space platform, the trends of miniaturizing satellites steer scientist into developing smaller and more compact MET systems by employing higher microwave frequencies.

A MET system uses a free floating plasma produced by microwave radiation. Propellant gas is heated as it swirls around this free floating plasma. Thus the plasma can be thought of as a free floating heater element. To produce thrust, usually a conventional converging-diverging nozzle is used. When the gas passes through the nozzle, the thermal energy of the gas is transformed into the kinetic energy and the gas expelled at high velocities, producing thrust.

In a MET system, plasma is generated in a resonant cavity which is one of the main parts of the system. A resonant cavity is a structure in which an electromagnetic radiation creates a standing wave as all surfaces are closed by conductor boundaries. When the standing wave resonates back and forth inside the cavity, free electrons in the propellant gas are coupled to the electric field of the electromagnetic wave. Coupled free electrons will be accelerated due to the Lorentz force. These energized electrons will interact with neutrals. If the electrons make elastic collisions they would only impart momentum to their collision partner, and no change will occur in their electronic structure. On the other hand, if the electrons have enough energy for an ionization process to take place, an electron will be stripped off from the neutral atom. As a result of these processes, new free electrons and ions will be generated, initiating

the formation of a plasma. Plasma will absorbs some amount of the energy of the microwave beam depending on its conductivity, and thus the plasma will act as a resistive load. Propellant gas will be heated when interacting with the plasma.

Other main parts of a MET system are the nozzle, separation plate, the microwave coupling probe (antenna). Nozzle is generally attached at one of the ends of the cavity on a nozzle plate. Separation plate is made of dielectric material and used for separating the antenna zone of the cavity from the plasma zone to protect antenna from the plasma damage. The antenna is designed based on the operating frequency. Generally an antenna with a length of one quarter of the wavelength is used to provide maximum radiation.

In this thesis, a microwave electrothermal thruster is designed and manufactured. To understand the system performance experimental and numerical studies are conducted; (i) 2-D axisymmetric electromagnetic model is developed using COMSOL Multiphysics software to model the electric field distribution in the designed cavity and understand the effect of antenna length and the cavity length on power deposition in the cavity. (ii) Experimental study is conducted and the system performance parameters (thrust, Isp and efficiencies) are derived using measured chamber pressure for cold and hot gas flow conditions. (iii) 0-D model is developed to compute the plasma parameters (electron number density, electron temperature, heavy particle temperature) and system performance parameters (thrust, specific impulse etc.).

Experimental and numerical research conducted on MET systems indicate that a microwave cavity working at TM_{011} mode is best fitted for MET systems. For the TM_{011} mode, the electric field intensity reaches its peak value at two very ends of the cavity and this formation pattern is the best for reducing the thermal losses to the walls. In this mode of operation, the plasma will form at the locations where the electric field reaches its maximum, and the gas will interact with the plasma and be expelled right after it is heated, thus reducing thermal losses.

BUSTLab MET cavity dimensions are calculated for operating at 2.45 GHz and TM_{011} mode. The results of 2-D electromagnetic model shows that the electric field intensity is maximum in the very ends of designed cavity. The dielectric separation plate and the antenna length has a negative effect on the reflection, namely, using these two components increase the reflections of electromagnetic wave from the cavity resonator. Also, it is computed that the power deposition increases with decreasing cavity length when there is a plasma in the cavity. In addition, to understand the cavity length, some other calculations are done to evaluate the optimum antenna length for the system. It is calculated that the optimum antenna length is not the quarter wave length for all plasma conditions. Since the medium conductivity and permittivity changes with the varying number density, the optimum antenna length changes

In the experimental study, BUSTLab MET prototype was designed for 2.45 GHz microwave frequency and power levels of up to 1200 W. The microwave frequency of 2.45 GHz is chosen due to the availability and low cost of power supplies and other components for this frequency. The BUSTLab MET thruster, consists of resonant cavity, quartz separation plate, nozzle and antenna. The resonant cavity has an inner diameter of 100 mm and a length of 175 mm. These dimensions are chosen for operating in TM_{011} mode at 2.45 GHz frequency as mentioned above. Thruster body is made of stainless steel. Two gas connection holes; one for feeding the gas and the other for pressure measurements are machined on two sides of the cavity.

An observation window of 50 mm diameter located on the wall on the plasma zone side of the cavity allows the visual observation of the plasma conditions. A perforated metallic shield is attached on the inner side of observation window to prevent microwave leakage. A converging-diverging nozzle is placed at one side of the resonant cavity. The nozzle is designed to be modular for examining the system characteristics for various nozzle geometries and expansion ratios.

The experimental setup consists of the microwave electrothermal thruster, a microwave generator, microwave transmission system, gas feeding system, measurement systems and vacuum system. For the tests, the MET thruster is attached to one of the ISO-320 ports of the BUSTLab vacuum chamber with specially designed flange and clamps. A Richardson power supply, SM745, and a 1.2 kW Richardson magnetron head, MH1.2W-S, are used as the microwave generator. Microwave generation system enables to set power level at 12 W increments. The microwave transmission system that transfers the microwave energy into the cavity is composed of an isolator, a coupler and a waveguide to coax adaptor. Muegge MW1003A-210EC isolator is used to protect the magnetron head from the reflected power damage. The isolator can protect the system up to 3 kW of reflections. In a MET system reflections can be reduced and the power coupling be increased by employing a tuning system. An Astex D13604 two stub tuner is used to tune the system. In order to increase the systems flexibility, transition from waveguide to a coaxial cable is done by a Muegge MW5002A - 260Y D adaptor. The coaxial cable used in the experiments is capable of transmitting 2.8 kW power at 2.45 GHz with 0.04 dBm attenuation. The coaxial cable is connected to the transition by a 7/16 connector. The other end of the coax cable is attached to the antenna of the thruster via another 7/16 connector. In order to measure the delivered and reflected power levels two Booton 52012 power sensors are used.

Performance characteristics of BUSTLab MET system, designed to operate 2.45 GHz frequency, are examined using experimental data for 400 W and 500 W operating power levels. In the experiments, chamber pressure and power absorbed by the thruster are directly measured, and the chamber temperature, specific impulse, and the thrust are evaluated by using appropriate equations. Maximum Isp level of 347 s and thrust level of 266 mN are assessed. The evaluated Isp values corresponding to the specified power levels are in the range of resistojet thrusters' Isp levels. It is also observed that increasing power levels has a positive effect on performance characteristics. It should be noted that the evaluated values will deviate from the real values because of the ideal expanded nozzle assumption.

In addition to experimental study, a global model has been developed for the analysis of the energy transfer mechanisms of a MET system that operates at 2.45 GHz frequency with a delivered power of 1200 W. The model determines the electron density, electron temperature and heavy particle temperature inside the resonant cavity for different propellant mass flow rates. In addition to plasma properties, specific impulse and thrust values of MET are also evaluated. Helium is chosen as a propellant in the study. Calculations are performed for mass flow rates of 60 to 165 mg/s. Two-fluid approach is used to calculate plasma parameters. For the calculation of the energy transfer from the plasma to the propellant gas, the plasma is assumed as a rigid sphere.

In the developed model energy transfer mechanisms after the steady state discharge is achieved have been studied, hence breakdown and plasma formation processes have not been considered. In the steady state operation, there are three stages of energy

transfer as mentioned earlier: (i) microwave energy is transferred to the plasma by collisions, (ii) the plasma heats the surrounding gas, (iii) the thermal energy of the gas is transformed into the kinetic energy by a conventional nozzle.

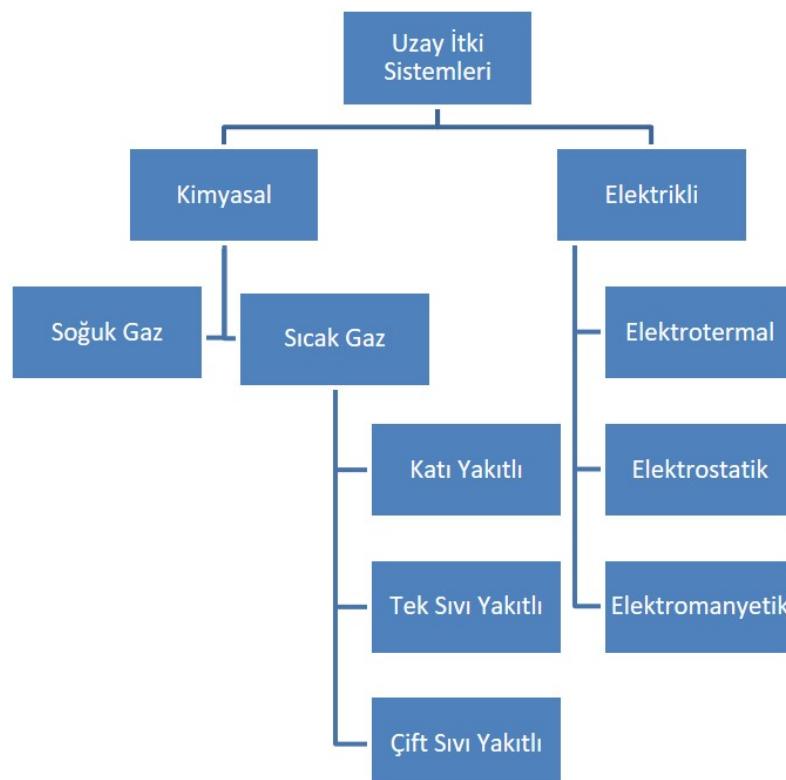
Only the plasma zone of the cavity is modeled. Plasma zone is divided into two sub-zones which are background gas and plasma volume. Background gas represents the neutral gas that flows around the plasma. Plasma volume is the region where the charged species exist. In the model, conduction and convection heat transfer from the plasma to the gas are taken into account, whereas the radiation heat transfer is neglected. Since the plasma is formed very close to the nozzle and hot gas is expelled right after it is heated, at steady state the energy losses to the cavity walls are neglected. The model assumes quasineutral plasma with a Maxwellian energy distribution for the electrons. Although in experiments, it is observed that the plasma volume takes a tear-drop shape, in the model, the plasma volume is assumed to have a spherical shape with its properties changing only radially.

Momentum exchange between the electrons and heavy particles is inversely proportional to their mass. Heavy ions cannot accelerate as easily as electrons, so the temperature difference between the plasma species occurs. Thus, species temperatures show variations depending on their mass. Equations for each species are adopted separately in the model: one for electrons and one for heavy particles (ions and neutrals)

Relevant equations are solved using COMSOL Multiphysics 0-D module. Electron temperature, heavy species temperature, and electron number density are computed. The calculation results are compared with the experimental data of Diamant et al. The results are in good agreement with experimental data and trends in the literature. The developed model is also used to predict the plasma and performance parameters of the prototype MET system developed at BUSTLab. Electron temperature and plasma density of the BUSTLab thruster are computed to be about 1 eV and $10^{19} \text{ #}/\text{m}^3$ respectively. Obtained results show that there is an optimum mass flow rate for which the specific impulse reaches a maximum value of 450 s for a delivered power of 1200 W.

1. GİRİŞ

Uzay araçları, uzayda görevlerini yerine getirirlerken yörunge değiştirilmek, yönelim düzeltmesi yapmak ve atmosferik sürükleme, güneş rüzgarının etkisi gibi etkenlerden dolayı görev yörungesinde meydana gelen bozuntuları telafi etmek için manevralar yapmaya ihtiyaç duyarlar. Uzay araçlarının görev isterleri doğrultusunda bu manevraları yapabilmeleri için gerekli itkiyi sağlayacak uzay itki sistemleri kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra derin uzayda gezegenler arası seyahat eden araçlar da itki sistemlerine ihtiyaç duymaktadırlar. İnsanoğlunun ilk uzaya çıkış çalışmaları başladığı günden bugüne kadar pek çok farklı uzay itki sistemi tasarlanmıştır. Uzay araçlarının görev isterlerinin farklılığı itki sistemlerinin çeşitlenmesine neden olmuştur. Örneğin; yörunge değiştirilmek için orta veya yüksek itki üretebilen sistemlere ihtiyaç duyulurken hasas yönelim sağlamak için çok düşük itki üreten (mN μN mertebesinde) sistemlere ihtiyaç duyulabilirinmektedir.



Şekil 1.1: Uzay İtki Sistemleri.

Ayrıca itki sistemlerinin verimliliğini ve özgül impuls seviyelerini iyileştirmek için yapılan çalışmalar da çeşitliliği artırmıştır [1, 9]. Genel olarak itki sistemlerini Şekil 1.1'de görüldüğü gibi kimyasal ve elektrikli itki sistemleri olarak iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Bu tezin konusu olan Mikrodalga Elektrotermal İtki Sistemi (Microwave Electrothermal Thruster-MET) elektrikli itki sistemlerinin bir alt türü olan elektrotermal itki sistemi sınıfına girmektedir. Çalışmada yeni bir mikro dalga elektrotermal itki sistemi tasarlanmış, testleri yapılmış ve bu sistemler için bir boyutsuz model kurulmuştur. Tezde sistemden bahsedilirken kolaylık olması açısından Mikrodalga İtki Sistemi yerine MET kısaltması kullanılacaktır.

1.1 Elektrikli İtki Sistemlerine Genel Bir Bakış

Uzay aracının ihtiyacı olan hız değişimi ile bu hız değişimini gerçekleştirmek için gerekli yakıt ve roket çıkış hızı arasındaki bağıntı Tsiolkovsky tarafından Denklem 1.1'deki gibi ifade edilmiştir.

$$m_p = m_0 \left[1 - e^{\left(\frac{-\Delta u}{u_{ext}} \right)} \right] \quad (1.1)$$

Bu bağıntıda m_p yakıt kütlesini, m_0 sistemin ilk kütlesini, Δu toplam hız değişikliğini ve u_{ext} roket çıkış hızını ifade etmektedir. Denklemden anlaşıldığı üzere yakıt kütlesini azaltmanın yolu roket çıkış hızını artırmaktır.

Kimyasal roketlerde yakıt içerisindeki kimyasal bağların kırılması sonucu sıcak gaz ortaya çıkar ve bu sıcak gaz lüleden dışarıya atılırken itki üretilir. Bu tür itki sistemlerinde ortaya çıkan sıcak gazın enerjisi kimyasal bağların kırılması sonucu ortaya çıkan enerji ile kısıtlıdır ve dışarıdan herhangi bir enerji eklenmesi yapılmamaktadır. Kimyasal roketlerde roket çıkış hızı yaklaşık 5500 m/s ile sınırlıdır [2, 10]. Bu durum yüksek hız değişimi isteyen görevlerde kimyasal roketlerin çok fazla yakıt sarf etmelerine neden olacaktır. Bununla beraber yakıt miktarındaki artış uzay sistemde kullanılacak olan faydalı yük başta olmak üzere diğer sistemlerin kütle bütçesinden feragat edilmesine sebebiyet verecektir ve bu uydu sistemi tasarımcıları tarafından istenmeyen bir durumdur.

Kimyasal itki sistemlerinin çıkış hızı limitinin aşılabilmesi için elektrikli itki sistemleri önerilmiştir [10]. Çıkış hızlarının yüksek olması nedeniyle sürekli hız değişikliği gerektiren bilimsel amaçlı derin uzay görevleri için elektrikli sistemlerin kullanılması

uygun görülmektedir. Ayrıca güneşin radyasyon etkisi, değişen basınç ve yer çekimi gradyanı nedeniyle sürekli konum düzeltme ihtiyacı olan haberleşme uyduları için de bu sistemlerin kullanılması uygun olacaktır. Zira, elektrikli itki sistemlerinin kullanılması ile manevralar için kullanılacak yakıt miktarının azalması sonucunda haberleşme uydusu aynı yakıt miktarı ile daha fazla yörunge düzeltmesi yapabilecek ve kullanım ömrü artacaktır.

Elektrikli itki sistemleri uzay aracı platformundan aldıkları elektrik enerjisini yakıt gazının kinetik enerjini artırmak için kullanan sistemler olarak tanımlanabilir [1]. En temel olarak bu sistemler yakıt besleme sistemi, güç işlemci ünitesi (Power Processing Unit) ve iticilerden oluşurlar. Elektrikli itki sistemleri yakıtın enerjisini artırmak için elektrik enerjisinin farklı formlarda aktarırlar. Güç işlemci ünitesi platformdan aldığı elektrik gücünü itki sisteminin ihtiyacı olan forma çeviren kısımdır. Genelde güç işlemci ünitesi sistemin ağırlığının büyük bölümünü oluşturur ve kimyasal yakıtlı sistemlerin güç ünitelerine göre çok daha karmaşık ve ağırdır. Bu elektrikli itki sistemlerinin kullanımının yaygınlaşmasını engelleyen ve kimyasal sistemlerin halen daha yaygın kullanılmasına sebep olan bir etkendir. Ancak elektronik teknolojisindeki gelişmelerle birlikte güç işlemci ünitelerinin küçülmesi nedeniyle kullanımlarının ileride giderek artacağı düşünülmektedir.

Sistemler tarafından üretilen itki kuvvetinin iki bileşeni vardır. Birincisi sıcak gazın hızla dışarıya atılmasından kaynaklanan momentum değişiminin sebep olduğu itki bileşenidir. Bu bileşen Denklem 1.2’in sağ tarafındaki ilk terim ile ifade edilmektedir. Denklemin sağ tarafındaki ikinci terim ise roket çıkışındaki basınç ile dış ortam basıncı arasındaki farktan dolayı oluşan itki kuvvetini ifade etmektedir. [11].

$$\tau = \dot{m}u_{ext} + (p_e - p_a)A_e \quad (1.2)$$

Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi elektrikli itki sistemlerinden elde edilebilir itki seviyeleri kimyasal sıvı ve katı yakıtlı roketlere göre çok küçüktür ve istenilen hız artımını sağlamak için daha fazla süreye ihtiyaç duyulur.

İtki sistemlerinin kıyaslanmasında önemli bir parametre de özgül impuls değeridir. Özgül impuls itki sisteminin birim ağırlıktaki yakıtlı ne kadar itki ürettiği gösteren bir parametredir.

$$I_{sp} = \frac{\tau}{\dot{m}_p g} = \frac{u_{ext}}{g} \quad (1.3)$$

Çizelge 1.1: İtki sistemleri performans parametreleri. [1–3]

İtki Sistemi	$I_{sp}(s)$	İtki Kuvveti (N)
Soğuk Gaz	40-50	0.1-100
Sıvı Yakıtlı	200-400	$1-10^6$
Katı Yakıtlı	250-300	10^7
Rezistojet	100-350	0.002-0.5
Arkjet	150-1000	0.005-5
İyon İtki Sistemi	2500-3500	10^{-3} -0.5
Hall Effect İtki Sistemi	1500-3000	10^{-2} -0.1
MPDT	1000-10000	0.5-50
PPT	500-1500	10^{-5} - 10^{-2}

Denklem 1.3'ten de anlaşılacağı gibi bu değerin yüksek olması birim yakıt ağırlığı ile daha fazla itki üretileceği anlamına gelmektedir [11]. Yukarıda da belirtildiği üzere elektrikli itki sistemleri kimyasal sistemlere göre çok daha yüksek çıkış hızlarına ulaşabildikleri için özgül impuls değerleri de yüksektir. Günümüze kadar kullanılan ve geliştirilen bazı itki sistemleri için özgül impuls değeri karşılaştırması Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Elektrikli itki sistemleri için verimlilik kullanılan elektrik enerjisinin ne kadarının kinetik enerjiye döndürüldüğü ile ilgilidir. Bu oran Denklem 1.4'deki gibi ifade edilebilir.

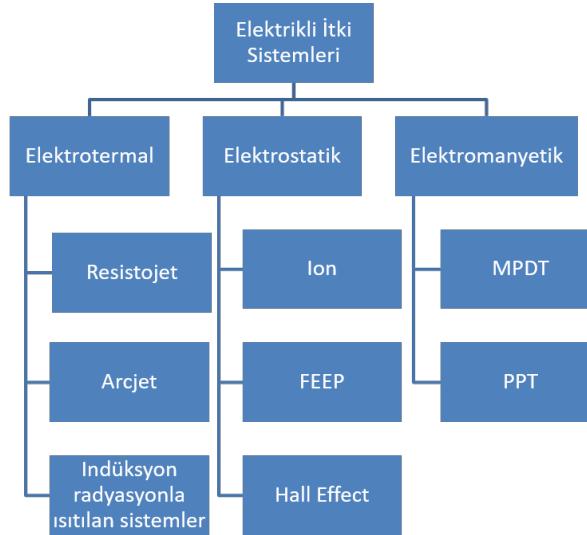
$$\eta = \frac{P_{Mekanik}}{P_{Elektrik}} = \frac{\dot{m}_p u_e^2}{2P_{Elektrik}} = \frac{\tau^2}{2\dot{m}_p P_{Elektrik}} \quad (1.4)$$

Bu denklemden hareketle itki kuvveti ve harcanılan güç arasındaki bağıntı kurulursa Denklem 1.5 elde edilecektir. Verimin ve elektrik gücün aynı olduğu bir sistemde özgül impuls ve itki arasında ters orantıdan bahsedilebilir. Elektrikli itki sistemleri yukarıda da bahsedildiği gibi yüksek özgül impuls değerine sahip düşük itki üreten sistemlerdir [2].

$$\frac{\tau}{P_{Elektrik}} = \frac{2\eta}{gI_{sp}} \quad (1.5)$$

Elektrikli itki sistemleri elektrik enerjisini kullandıkları yönteme göre sınıflandırılırlar. Elektrikli itki sistemlerine ait genel bir sınıflandırma Şekil 1.2'de görüldüğü gibi yapılabilir. Sistemleri elektrotermal, elektrostatik ve elektromanyetik olmak üzere üç ana grupta toplamak mümkündür [12]. Bu sistemlerden elektrostatik, elektromanyetik sistemler ile elektrotermal sistemlerin alt grubu olan radyasyonla ısıtılan sistemler plazma itki sistemleri olarak da anılmaktadır. Plazma itki sistemlerinde plazma oluşum safhaları ve şartları değişmektedir. Örneğin; bazı sistemlerde plazma üzerinde

manyetik alan etkisi önem kazanırken bazlarında ihmal edilmektedir. Enerji plazmaya yüksek enerjili elektron enjeksiyonu ile, elektrotlar yardımıyla veya elektromanyetik radyasyonla iletilmektedir. İşte bütün bu farklılıklar yeni kavramların ortaya çıkmasını sağlamıştır [13]. MET’inde içinde bulunduğu elektrotermal sistemlerde elektrik



Sekil 1.2: Elektrikli İtki Sistemleri.

enerjisi gaza bir rezistans elemanı, elektrik arkı veya elektromanyetik dalga tarafından iletilir. Isınan gaz geleneksel bir yakınsak veya yakınsak-ıraksak lüleden geçerken termodinamik genişlemeyle birlikte ısıl enerjisi kinetik enerjiye dönüşür. Atılan yüksek hızlı gaz kütlesi uzay aracına ivme kazandırır ve bu sayede itki elde edilir [1, 2, 9, 10].

Elektrostatik sistemler, elektriksel potansiyel farkı kullanılarak iyonize edilmiş gazın içerisindeki yüklü parçacıkların hızlandırılarak atılması prensibine göre çalışırlar [9]. Gaz öncelikle statik elektrik farkı, RF veya mikrodalga enerjisi kullanılarak bir oda içerisinde iyonize hale getirilir ve iyonlar aralarında elektriksel potansiyel fark olan delikli iki levha arasından geçerlerken Lorentz kuvveti vasıtıyla hızlandırılarak atılırlar ve böylece itki üretilir [14].

Elektromanyetik itki sistemleri ise iyonize edilen gazda bulunan yüklü parçacıklar üzerine elektromanyetik kuvvet uygulanmasıyla parçacıkların hızlanarak atılması prensibine göre çalışırlar. Bir odacık içerisinde gaz elektriksel enerji kullanılarak iyonize edilir. İyonize gaz içerisinde kuvvetli bir akım geçirilir ve parçacıklar akım nedeniyle oluşan manyetik alan kuvveti etkisine maruz kalarak hızla dışarı doğru atılırlar ve itki elde edilir [9, 14].

Bu tez kapsamında incelenenek olan MET, elektrotermal itki sistemleri sınıfından radyasyonla ısıtılan sistemler kategorisine girmektedir. Mikrodalga enerjisi oluşturulan bir üzer plazma vasıtıyla gaza aktarılmaktadır. Ancak plazma elektrostatik veya elektromanyetik sistemlerdeki gibi değil sadece gazın ısıtılması için kullanılmaktadır. Sistemin çalışması ile ilgili ayrıntılar ilerleyen bölümlerde verilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

İlk olarak, 1980'li yılların başlarında Pennsylvania State Üniversitesi ve Michigan State Üniversitesi araştırmacıları tarafından bir rezonans boşluğun mikrodalga plazması oluşturarak gazı ısıtan itki sistemi kavramı üzerinde çalışımlara başlanmıştır [15–17]. Yapılan bu ilk çalışmalarında kavramın uygulanabilirliği ve verimliliği test edilmiştir.

Müteakiben yapılan çalışmalarda en uygun rezonans boşluğu geometrisini saptayabilmek için farklı modlarda çalışan ve farklı geometriye sahip olan rezonans boşlukları ile testler yapılmıştır. Silindirik geometriye sahip ve TE_{01} , TM_{012} ve TM_{011} modlarında çalışan rezonans boşluğu kullanan prototipler için analizler yapılmıştır. Sonuç olarak ısı transferi kayıplarını en aza indirgemecek olan kavite geometrisinin TM_{011} modda çalışan silindirik bir kavite olduğu görülmüştür [18, 19].

Farklı güç seviyeleri, debi ve basınç değerlerinde mikrodalga gücün ne kadarının sistem tarafından gaza iletiliği deneyel olarak çalışılmıştır. Yapılan ölçümlede farklı tasarımlardaki sistemler için %50 – 95 arasında mikrodalga emilimi gerçekleşebildiği görülmüştür [20, 21]. Ayrıca duvarlara olan ısı kayıpları kalorimetre tekniği kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır [5].

Yüzey plazmanın durağan hale gelip sistemin daha kararlı çalışması için akış alanı içerisinde katı bir döndürücü cisim konularak stabilizasyon sağlanmaya çalışılmıştır [22]. Bu ilk prototiplerde plazmanın stabilizasyonunun sağlanması için kavite içerisinde kuvars tüp yerleştirilmiş ve plazmanın bu tüp içerisinde oluşturarak akış alanı içerisinde hareketinin sınırlandırılması sağlanmıştır. Daha sonraki çalışmalarında akış alanı içerisinde herhangi bir cisim olmaksızın plazma stabilizasyonunu sağlamak için gazın dönel bir biçimde kavite içerisinde püskürtülmesi önerilmiş ve yapılan deneylerle

gerçeklenmiştir [23, 24]. Geliştirilen prototipte rezonans boşluğu içerisinde kuvars tüp kullanılmamış ve rezonans boşluğu bir basınç odası gibi tasarlanmıştır. Rezonans boşluğu anten tarafı ile gaz püskürtülen lüle tarafı bir levha ile ayrılmıştır. Kuvars kanalının yapısal olarak getirdiği kırılganlık ve ısıl limitler aşılmıştır. Ayrıca rezonans boşluğu içerisindeki elektrik alan dağılımının kuvars tüpten etkilenerek bozuntuya uğraması engellenmiştir.

Plazma alanı içerisinde türlerin (elektronlar, iyonlar ve nötr atomlar) yoğunlukları ve sıcaklıklarını ölçmek için farklı spektrometri yöntemleri ile ölçümler yapılmıştır. Elektron sıcaklıklarının 12000 K civarında olduğu ve yoğunluğun ise $10^{19} - 10^{20} \text{ #}/\text{m}^3$ mertebesinde seyrettiği gözlemlenmiştir. İyonlar ve nötr bileşenlerin sıcaklıkları ise moleküler gazlar (Nitrojen vs.) için 5000-6000 K civarındayken tek atomlu gazlar (Hidrojen, Helyum) için ise 2000-3000 K mertebesinde olduğu ölçülmüştür [25–27].

İlk prototip çalışmalarıyla birlikte sistemlerin performansı birçok farklı gaz (Nitrojen, Helyum, Oksijen, Metan vs.) kullanarak denenmiştir [28]. Su elementinin kolay erişilebilir olması ve insanlı uzay araçlarında atık sulardan yararlanabilecegi fikri araştırmacıları itki sistemlerinde diğer gazlar yerine su buharı kullanımının verimliliği üzerindeki çalışmalara yöneltmiştir [4, 29, 30]. Farklı şekillerde tasarlanan prototiplerde su buharı kullanılmıştır. Prototipler başarıyla çalıştırılmıştır. Su buharı ile yapılan deneylerde 500 s üzerinde özgül impuls değerlerine ulaşılmıştır. [31, 32].

Günümüzde fırlatma maliyetlerinin azaltılması için uydu sistemleri küçültülmektedir. Bir kaç ton ağırlığındaki büyük uydular fırlatılması yerine aynı görevlerin birçok küçük uydu tarafından paylaşılırak icra edilmesi için uydu kümeleri tasarılmaktadır. Uydulardaki bu küçülme trendine uygun olarak da alt sistemlerinin de küçülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda daha küçük uydularda kullanılabilen Milrodalga Elektrotermal İtki Sistemi prototipleri üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Yüksek frekanslar (7.5, 14.5, 30 GHz) kullanılarak prototip boyutları küçültülmüş ve testler yapılmıştır. Ayrıca küçük uydu sistemlerinde güç bütçesi sınırlı olduğu için bu yönde geliştirilen prototiplerde güç isteri de daha düşük (20-100 W) tutulmuştur [6, 8, 33–39].

Deneysel çalışmaların yanı sıra MET rezonans kavitesi içerisindeki elektrik alan dağılımının, plazmanın ve ısısı transferi mekanizmasının modellenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Genelde yapılan iki boyutlu modelleme çalışmalarında

Maxwell denklemleri, süreklilik, enerji ve momentum denklemleri plazma içerisindeki farklı parçacıklar (elektronlar, iyonlar, atomlar vb.) için ayrı ayrı yazılmış ve birleşik olarak çözülmüştür. Ayrıca lüle içerisinde oluşturulacak ikinci bir plazmanın sistem performansına etkisi de benzer denklemlerin farklı metotlarla çözümüyle simül edilmiştir. Bazı çalışmalarda ise sadece kavite içerisindeki elektrik alan dağılımı çözümleri modellenmiştir. [40–45].

MET sistemiyle ilgili çalışmalar diğer elektrotermal sistemlere göre daha sınırlı sayıda çalışma grubu tarafından yürütüldüğü için bu kavramla ilgili kaynaklar da az sayıdır. Dolayısı ile tez kapsamında yapılacak literatür taramasını doğrudan MET sistemiyle ilgili çalışmalarla sınırlamak yeterli olmayacağıdır. Özellikle kurulacak olan boyutsuz modele yön vermesi için diğer yüksek basınçta plazma ortamı içeren sistemlerle ilgili modelleme ve deneyel çalışmalarla yönelik bir tarama da yapılmıştır.

MET gibi elektromanyetik radyasyonla plazma oluşturulan sistemler için incelen önemli kavamlardan birisi de elektromanyetik dalga ve plazma etkileşimidir. Bu etkileşim plazma parametrelerinin değişmesine neden olmaktadır. Değişen plazma parametreleri elektromanyetik dalganın yayılım ortamını değiştirmekte ve dalganın yayılma ve yansımıma oranlarını etkilemektedir. Elektromanyetik dalga ve radyasyon etkileşimi ile ilgili birçok model çalışması yapılmıştır. Bu çalışmalarla plazma yoğunluğu, elektronların sıcaklıkları, elektrik alan bileşiminin plazma ile nasıl değiştiği ve emilen gücün ne kadarının plazma tarafından emildiği incelenmiştir. Ayrıca değişen plazma koşullarının ve sistemin tune edilmesinin bu emilim üzerindeki etkisi de çalışılmıştır [46–49]. Ayrıca, homojen olmayan bir plazma ortamında elektromanyetik radyasyon yayılımı ve yansımıma, emilim ve iletim karakteristiklerinin plazma yoğunluğu ve kalınlığı ile nasıl değiştiği, elektromanyetik enerji emiliminin gerçekleştiği “Skin Depth” kalınlığı ve plazmanın elektromanyetik dalga önleyici bir kalkan gibi kullanılması da araştırılan konular arasındadır [50–54].

Atmosferik basınçta çalışan plazma sistemlerinin mikrokaynak, yüzey temizleme, ışık kaynağı olarak kullanımı, atomik spektrometri ve biyomedikal uygulamalar gibi pek çok alanda uygulamaları vardır [55]. MET sistemi de atmosferik basınç koşullarında çalışabilen bir sistemdir. Atmosferik basınçta ve yüksek akış debilerinde çalışan sistemlerle ilgili olarak farklı deney düzenekleri tasarlanmıştır ve modelleme çalışmaları yapılmıştır. Plazma deşarjı oluşumu modellenmiş ve tarif edilmiştir ve oluşturulan

hidrodinamik modellerle plazma içerisindeki yük yoğunluğu değişimi hesaplanmıştır [56, 57].

Yüksek basınç ve düşük sıcaklıklardaki plazma sistemlerinin modellenmesinde global modeller basitlik ve hız açısından önemlidir. Global modellerde elektron enerji dağılım fonksiyonunun seçimi önem kazanmaktadır. Bu model simülasyon çalışmalarında genel olarak Maxwell elektron enerji dağılım fonksiyonu (EEDF) kullanılmaktadır. Ancak bu EEDF güç emilimi ve reaksiyon oranı gibi hesaplarda yeterli hassasiyette sonuçlar vermemektedir. Modelleme çalışmalarında daha hassas sonuç almak için farklı EEDF fonksiyonları tanımlanmış ve kullanılmıştır [58–60].

1.3 Tezin Amacı

Mikrodalga Elektrotermal İtki Sistemi (MET) kavram olarak 1980’li yılların başlarından itibaren çalışmaya başlanmıştır ancak halen çalışmalar prototip geliştirme aşamasındadır. Günümüze kadar yapılan çalışmalarla, sistemin uygulanabilirliği, verimliliği, küçük uydular için uygun sistemler geliştirilmesi ve sistem içerisinde mikrodalga, plazma ve gaz arasındaki enerji transfer mekanizmasının anlaşılmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında bir MET’in uygulanabilirliğini ve kavite içerisindeki enerji çevrimini anlamaya yönelik olarak bir prototip üretilmiş ve helyum gazı ile testleri yapılmıştır. Çalışmada kavite içerisindeki basınç dağılımı, çıkış sıcaklığı, emilen ve yansıyan mikrodalga gücü sensörler yardımıyla ölçülmüştür. Adyabatik bağıntılar kullanılarak kavite içerisindeki sıcaklık değerine ulaşılmıştır. Bu sonuçlardan yararlanılarak itki kuvveti ve özgül impuls değerleri hesaplanmıştır.

Literatüre bakıldığından sistem içerisindeki enerji transfer mekanizmalarını anlamaya yönelik olarak çok az sayıda modelleme çalışması olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarla sistemin sadece lüle kısmı modellenmiştir. Rezonans kavite içerisinde plazma parametrelerinin ve plazmadan gaza olan ısı transferinin doğrudan tanımlanığı bir boyutsuz modele rastlanmamıştır. Tez kapsamında MET içerisindeki enerji transferi mekanizmasını açıklayan ve plazma parametrelerinin hesaplanması sağlayan bir boyutsuz model geliştirilmiştir. Boyutsuz modelin amacı plazma parametrelerinin ve itki sistemi performans parametrelerinin hesaplanmasıdır.

Tez çalışmasının diğer bir hedefi ise daha henüz dünyada geliştirme aşamasında olan bir sistem üzerinde ülkemizde de çalışılmasını sağlamak ve itki sistemleri alanında yapılacak olan çalışmalara katkı sağlamaktır.

2. MİKRODALGA ELEKTROTERMAL İTKİ SİSTEMİ KAVRAMI

Mikrodalga Elektrotermal İtki Sistemi kendisinden daha önce geliştirilmeye başlanan rezistrojet ve arkjet sistemlerinin zayıf olan yönlerini ortadan kaldırılmaya yönelik önerilen bir sistem olarak karşımıza çıkmaktadır. Rezistrojet itki sistemleri gazı ısıtmak için direnç elemanı kullanan sistemlerdir. Dolayısıyla bu sistemlerde maksimum erişilebilir gaz sıcaklığı rezistans elemanın ve ısıtma odası duvarlarının ısıl dayanımı ile sınırlıdır. Şu ana kadar üretilen sistemlerde en yüksek erişilebilir gaz sıcaklığı 3000 K civarında ölçülmüştür. Rezistrojetlerin özgül impulsları 300 s mertebesinde olmaktadır [2].

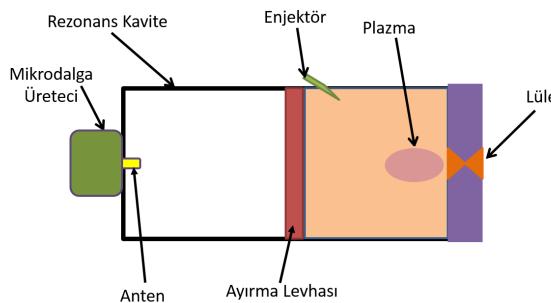
Diğer taraftan arkjet sistemlerine bakıldığından; rezistrojetlerin ısıl dayanım limiti olan rezistans elemanı kullanmak yerine, iki elektrot arasında ark oluşturulmakta ve gazın bu arkın etrafından geçerken ısıtımasına başvurulmaktadır. Ark civarında sıcaklıklar 10000 K mertebesine ulaşmaktadır ancak duvarlarla ark arasında çok yüksek bir sıcaklık gradyanı görülmektedir. Özgül impuls seviyesi 1000 s mertebesine kadar ulaşmıştır [1, 2]. Ancak bu sistemlerde arkın oluşturulması için elektrot kullanılmaktadır ve elektrot hem sıcak gaza maruz kalmakta hem de ilk ark başlatılması esnasındaki yoğun iyon bombardımanı nedeniyle buharlaşmaktadır. Buharlaşma nedeniyle katot ucunda erozyon meydana gelmektedir ve bir süre sonra katotun kısalmasından dolayı ark oluşamamaktadır. Bu fenomen arkjet sistemlerinin ömrünü kısıtlamaktadır.

Rezistrojet ve arkjetlerin yukarıda belirtilen kısıtlarının ortadan kalkması için MET kavramıyla; akış alanı içerisinde katı bir ısıtıcı eleman veya ark ile gazı ısıtmak yerine serbest yüzer plazma kullanılması öne sürülmüştür [15, 16]. Bu sayede daha uzun ömürlü ve gazı daha yüksek sıcaklıklara kadar ısıtabilecek bir sistem tasarlanması hedeflenmiştir. Bu yeni kavramda ısıtma odası olarak mikrodalga frekansları için tasarlanan bir rezonans kavite kullanılmaktadır.

Sistemin çalışma prensiplerinin anlaşılması için, ana bileşenlerinin görevlerinden ayrıntılı bir şekilde bahsedilecektir. Ayrıca sistemin elektromanyetik incelemesi yapılarak konseptin genel tanımlaması bitirilecektir.

2.1 Mikrodalga Elektrotermal İtki Sisteminin Ana Bileşenleri ve Çalışma Prensibi

Mikrodalga Elektrotermal İtki Sistemi Şekil 2.1'de görüldüğü gibi mikrodalga üretici, rezonans kavite, gaz besleme sistemi ve lüle olmak üzere dört ana kısımdan oluşmaktadır. Bu ana bileşenlere ilave olarak tasarımda ihtiyaç duyulduğu takdirde plazma bölgesi ve anten bölgesi kısımlarını ayırmak için dielektrik malzemeden imal edilen bir ayırma levhası kullanılmaktadır.



Şekil 2.1: Mikrodalga Elektrotermal İtki Sistemi şeması.

Sistemin ana gövdesini ısıtma odası olarak kullanılan rezonans kavite oluşturmaktadır. Rezonans kavite boyutları kullanılan frekansa bağlı olarak değişmektedir. Plazmanın lüleye yakın bir yerde oluşarak gazın ısınır ısınmaz atılması ve böylece sistem içi ısı kayıplarının minimize edilmesi için uygun kavite çalışma modu seçilmelidir. Kavite boyut ve modunun belirlenmesi ile ilgili ayrıntılar Kısım 2.2'de anlatılacaktır. Gaz besleme sistemi diğer itki sistemlerindekine benzer şekilde gaz tankları, besleme boru hattı, valfler ve enjeksiyon sisteminden oluşmaktadır. Enjektörler gazın kavite içerisinde dönel bir şekilde ve duvar yüzeylerine teget bir biçimde püskürtülmesini sağlayacak şekilde yerleştirilmektedir. Belirtilen şekilde bir gaz enjeksiyonu ile hedef; plazmanın kavite ortasında duvarlara uzak bir şekilde oluşması ve kararlılığının sağlanmasıdır. Kullanılan lüle ise konvansiyonel bir lüle olup yakınsak-ıraksak veya sadece yakınsak olacak şekilde tasarlanmaktadır. Mikrodalga anteni plazma ile temas ettiği takdirde zarar görecektir. Dolayısı ile plazma ve anten arasına bir dielektrik malzemeden

üretilen bariyer koymakta fayda olacaktır. Pek çok tasarımında anten ve plazmayı birbirinden ayıran dielektrik bir levha veya yüzey kullanılmaktadır.

Mikrodalga üretici olarak genellikle bir magnetronlu üreteç veya Yürüyen Dalga Tüplü (Travelling Wave Tube-TWT) üreteç kullanılmaktadır. Mikrodalga üreticisine güç verildiğinde mikrodalga ışını bir hat üzerinden taşınarak antene ulaşır ve anten tarafından kavite içeresine elektromanyetik dalga yayılımı gerçekleşir. Rezonatör içerisinde bir duran dalga oluşur ve gaz püskürtülmeye başlandığında içerisinde bulunan serbest elektronların enerjileri elektromanyetik dalganın elektrik alanı nedeniyle artar. Enerjileri artan elektronlar nötr parçacıklarla çarpışıklarında enerjilerinin bir kısmını bu parçacıklara aktarırlar. Elektronlar yeterince hızlısa ve nötr parçacıklara iyonizasyon enerjisi üzerinde bir enerji aktarabilirlerse iyonizasyona ve yeni elektronların serbest kalmasına neden olurlar. Gaz içerisinde elektron sayısı belirli bir sayıya ulaştığında gazın iletkenliği artarak deşarj başlar ve plazma oluşur. Oluşan plazma bir rezistans gibi davranışarak gönderilen enerjiyi emer. Plazma içerisinde elektronlar ve ağır parçacıklar (iyonlar ve nötr parçacıklar) arasındaki elastik çarpışmalar gazın ısınmasını sağlayan ana mekanizmadır. Oluşan plazma etrafından gaz geçeren ısınır ve daha sonra lüleden atılırken gazın ısıl enerjisi termodinamik genişlemeyle birlikte kinetik enerjiye dönüşür ve itki elde edilmiş olunur [61].

2.2 MET Sisteminin Elektromanyetik İncelemesi

MET sisteminde gazın ısıtılması için bir rezonans kavite kullanılmaktadır. Rezonans kaviteler tüm yüzeyleri iletken malzemeyle kapatılmış yapılardır. Bir duvarına açılacak olan delikten içeriye bir anten yardımıyla mikrodalga beslemesi yapılır. Adından da anlaşılacağı gibi rezonans kaviteler belirli frekanslarda rezonansa girecek şekilde tasarılanırlar. Şekil olarak dikdörtgen, silindirik veya küre biçiminde olabilirler. Rezonans kaviteler, frekans seçiciler, malzemelerin elektrik özelliklerinin tespit edilmesi gibi farklı alanlarda kullanılmaktadırlar. MET sistemlerinde ise içerisinde boş bir kavite kullanılmaktadır. Gaz akış formunun bozulmaması ve içerisindeki elektrik alan dağılımı daha uygun olduğu için dikdörtgen yerine silindirik kaviteler kullanılmaktadır [3].

MET tasarımda önemli bir parametre de rezonans kavitenin içerisinde uygun elektrik alan dağılımı olacak şekilde tasarlanmasıdır. Kısım 1.2'de bahsedildiği gibi konsept

geliştirilmeye başladığından günümüze kadar farklı TE ve TM modlarında çalışan kavite tasarımları denenmiştir. Günümüze kadar yapılan çalışmalar silindirik bir kavite için TM_{011} modunun en uygun elektrik alan dağılımını sağladığını göstermiştir. Bu mod ile elektrik alan vektörünün normu en yüksek değerine silindirik kavitenin iki son ucunda ulaşmaktadır.

Tezin bu bölümünde TM_{011} modunda çalışan bir kavite için dalga denklemi çözümü yapılacak, tez kapsamında tasarlanacak sistemin kavite boyutu belirlenecek ve kavite içerisindeki elektrik alan dağılımına anten, ayırma levhası ve plazma etkilerini anlamaya yönelik olarak yapılan analiz sonuçlarından bahsedilecektir.

2.2.1 Rezonans kavite içerisinde elektrik alan dağılımı

Serbest uzayda elektromanyetik dalgalar TEM (Transverse Electromagnetic) modunda ilerlerler. Bu modda manyetik ve elektrik alan bileşenleri birbirlerine ve yayılım yönüne diktirler. Fakat elektromanyetik dalgalar bir dalga klavuzu veya bir kavite içerisinde sınır koşulları nedeniyle TE (Transverse Electric) veya TM (Transverse Magnetic) modda ilerlerler. TE modda yayılım yönünde elektrik alan bileşeni, TM modda ise manyetik alan bileşeni yoktur [62]. İletken duvarlarda elektrik alan teğetsel bileşeninin sıfır olması nedeniyle bu durum gerçekleşmektedir. Elektromanyetik dalgaların hangi modda ilerleyecekleri kavitenin şekil ve boyutları ile ilgilidir.

Dalga kılavuzları içerisinde elektromanyetik dalganın yayılım yapacağı şekilde tasarlanmış ve iletken duvarlara sahip yapılardır. İletken bir duvar üzerinde elektrik alan teğetsel bileşeni sıfırdır ve sadece yüzeye dik bileşenden bahsedilebilir. Dalga kılavuzunun açık olan yüzeyleri de iletken duvarlarla kapatıldığı takdirde bir rezonans kavite ortaya çıkacaktır. Elektromanyetik dalga her yüzeyi kapalı olan bu alan içerisinde duran dalga oluşturacaktır. [62]. Kayıpsız ve elektriksel yük kaynağının olmadığı bir ortam için β faz sabitini ifade etmek üzere dalga denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir [62].

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\beta^2 \mathbf{E} \quad (2.1)$$

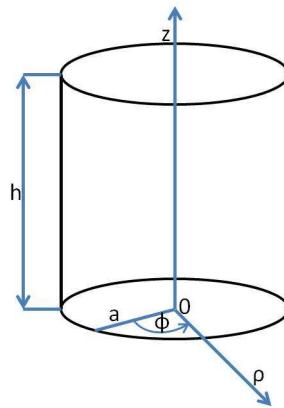
Eşitlik 2.1’i çarpanlara ayırma metodu ile Şekil 2.2’de gösterilen silindirik koordinat sistemi için çözülebilir ve sonuç olarak TM_{011} modu için elektrik alan bileşenleri Denklem 2.2-2.4’deki gibi elde edilir. Denklemin ayrıntılı çözümü EK-A’da

verilmiştir.

$$E_z = B_{01} J_0 \left(\frac{\chi_{01}}{a} \rho \right) \cos \left(\frac{\pi z}{h} \right) \quad (2.2)$$

$$E_\rho = B_{01} \frac{\pi a}{\chi_{01} h} J_1 \left(\frac{\chi_{01}}{a} \rho \right) \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right) \quad (2.3)$$

$$E_\phi = 0 \quad (2.4)$$



Şekil 2.2: Rezonans kavite koordinat sistemi

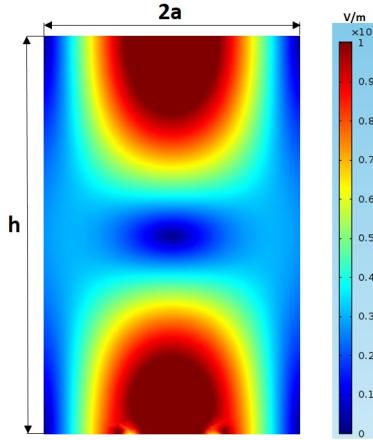
Denklemlerde J_0 ve J_1 birinci türden Bessel fonksiyonunun sıfırıncı ve birinci mertebesini simgelemektedir. χ_{01} ise birinci türden Bessel fonksiyonunun birinci kökünü ifade etmektedir. a ve h ise sırasıyla kavite yarıçapı ve yüksekliğidir. TM_{011} modundaki bir rezonans kavitesi için rezonans frekansı;

$$(f_r)_{011}^{TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{\chi_{01}}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{h}\right)^2} \quad (2.5)$$

denklemde olduğu gibi elde edilir. Denklemde ϵ ve μ kavite içerisindeki ortamın dielektrik sabiti ve geçirgenliğini ifade etmektedir. Elektrik alan ve rezonans frekansı bağıntılarını kullanarak TM_{011} modundaki bir kavite için elektrik alan dağılımı Şekil 2.3'de gösterildiği gibi elde edilmektedir. Elektrik alan TM_{011} modu için kavitenin iki ucunda en yüksek değerine ulaşlığı görülmektedir. Rezonans kavite tasarımda bir başka önemli parametre de kalite faktörüdür. Kalite faktörü Q bir mikrodalga döngüsünde kavite içerisinde depolanan enerjinin W_s yine kavite içerisinde enerji yitimine P_d olan oranıdır [62, 63] ve Denklem 2.6'daki gibi ifade edilebilir.

$$Q = \omega \frac{W_s}{P_d} \quad (2.6)$$

Denklemde ω açısal frekansı simgelemektedir. Burada enerji yitimi mikrodalga enerjisinin kavite içerisindeki bir yük tarafından emiliminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.3: TM_{011} rezonans kavite içerisinde elektrik alan dağılımı

MET sistemi için bahsedilen yük plazma tarafından sağlanmaktadır. Kalite faktörünü TM_{011} modu için μ , ϵ , kavite boyutları ve ortamın elektrik iletkenliğini ifade eden σ cinsinden Denklem 2.7'deki gibi hesaplamak mümkündür [64]. Kalite faktörü denkleminin elde edilişi EK-A'da ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

$$Q = \frac{ha^2}{ha + 2a^2} \left(\frac{\sigma}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{\epsilon}\right)^{1/4} \left[\left(\frac{\pi}{h}\right)^2 + \left(\frac{\chi_{01}}{a}\right)^2 \right]^{1/4} \quad (2.7)$$

2.2.2 Rezonans kavite boyutlarının belirlenmesi

Bu bölümde tez kapsamında üretilen rezonans kavitenin boyutları rezonans frekansı ve kesme frekansı denklemleri kullanılarak belirlenecektir. Ayrıca boş bir kavite için kalite faktörü hesabı yapılacaktır. Silindirik bir kavitenin boyutlarını belirlemek için iki farklı büyülüğün hesaplanmasıına ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlardan birincisi elektromanyetik teoriye göre belirli frekanstaki mikrodalganın yayılabileceği minimum yarıçaptır. Bu minimum yarıçap değeri altında seçilecek olan bir boyutta kavite içerisinde yayılım olamayacaktır. Minimum yarıçapı belirlemek için kesme frekansı denklemi kullanılacaktır. Şöyled ki, çalışılmak istenilen dalga frekansı kesme frekansına eşitse kavite içerisinde yayılım olmayacağından emin olunmalıdır. Bu tez kapsamında tasarlanacak olan kavite 2.45 GHz dalga frekansında ve TM_{011} modda çalışacak şekilde tasarlanacaktır. Silindirik kavite için belirtilen modda kesme frekansı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$(f_c)_{01}^{TM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \sqrt{(\frac{\chi_{01}}{a})^2} \quad (2.8)$$

ve kesme frekansı denkleminde; f_c yerine 2.45 GHz değerini, μ_0 yerine serbest uzay için geçirgenlik değeri $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, dielektrik sabiti ϵ_0 yerine $8.854187817 \times$

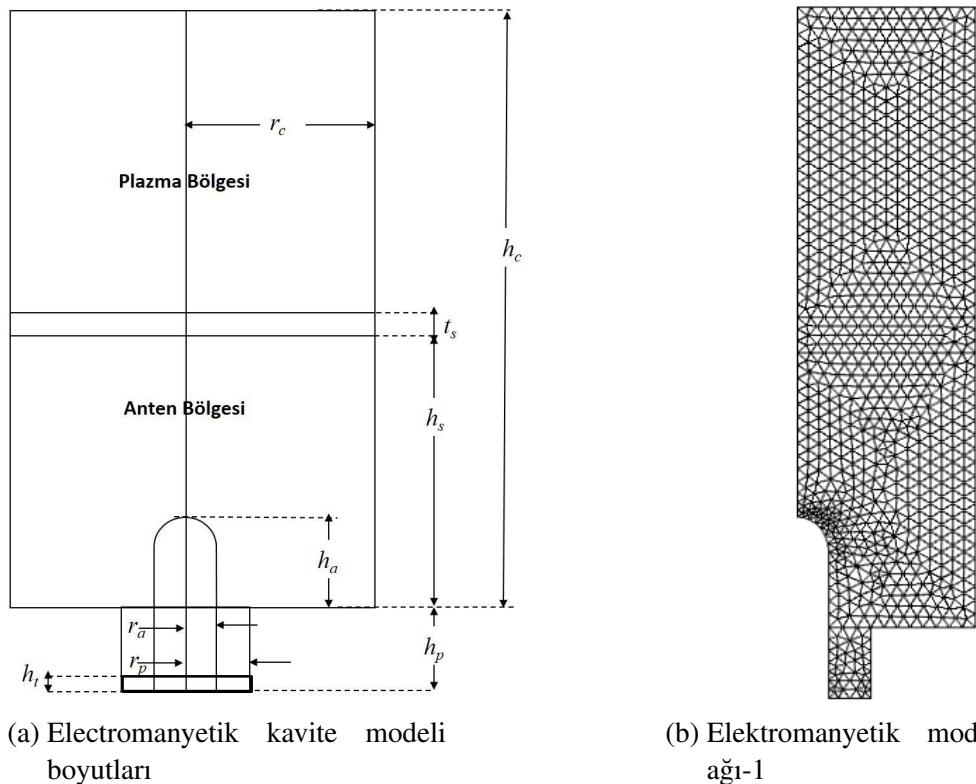
$10^{-12} F/m$ ve χ_{01} için 2.4048 değerleri yazıldığında kesme yarıçapı 46.87 mm olarak bulunacaktır. Kavite yarıçapı olarak bu değerin üstünde bir değer almamız gerekecektir. İmalat kolaylığı ve standart olması açısından 50 mm değeri kavite yarıçapı olarak seçilmiştir. Şimdi de silindirik kavitenin ikinci boyutu olan kavite yüksekliğinin bulunması gerekmektedir. Rezonansın sağlanabilmesi için uygun kavite yüksekliğinin tespit edilen yarıçap değeri ile belirli bir oranı sağlaması gerekmektedir. Bu şartın sağlanabilmesi için Denklem 2.5'de rezonans frekansı yerine çalışma frekansı olan $2.45 GHz$ ve seçilen yarıçap olan 50 mm'i yerlerini koyarsak kavite yüksekliği olarak 175 mm bulunacaktır.

Kavite boyutlarını tespit ettikten sonra kalite faktörü Denklem 2.7 kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemde σ kavitenin imal edildiği malzemenin iletkenliğidir. Paslanmaz çelik için bu değer yaklaşık olarak $10^8 1/\Omega m$ dir. Kalite faktörü denkleminde belirlenen boyutları ve parametreleri yerine koyduğumuzda kalite faktörü 31288.98 olarak bulunur. Aynı değer iletkenliği $3.54 \times 10^7 1/\Omega m$ olan alüminyum için hesaplanırsa 18510.81 olacaktır. Kalite faktörü yüksek olan kavitede dalganın sökümlenmesi daha uzun sürecektir.

2.2.3 Rezonans kavitenin elektromanyetik analizi

Bir önceki bölümde boş bir kavite için boyutlar belirlenmiş ve kalite faktörü hesaplanmıştır. Ancak MET sistemi tasarımında kavite içerisinde anten ve dielektrik ayırmaya levhası yer almaktadır. Ayrıca plazma oluştuktan sonra kavite içerisindeki ortamın dielektrik sabiti ve iletkenliği değişecektir. Dolayısı ile tüm bu değişimler kavitenin rezonans koşullarını ve kavite içerisindeki elektrik alan yoğunluğunu etkileyecektir. Bu bölümde bahsedilen bozuntuların etkilerini anlamaya yönelik yapılan analizlerden bahsedilecektir.

Elektromanyetik analiz COMSOL Multiphysics paket programının RF modülü kullanılarak yapılmıştır. Rezonans kavitenin elektromanyetik analizinde Şekil 2.4a'da verilen kavite geometrisi kullanılmıştır. Kavite boyutları listesi Tablo 2.1'da verilmiştir. Çözüm ağı oluşturulurken Şekil 2.4b'de görüldüğü gibi üçgensel elemanlar kullanılmıştır ve geometri eksenel simetrik olduğu için kavite modellinin yarısı olacak şekilde geometri oluşturulmuştur. Çözüm ağı toplam 1656 noktadan oluşmaktadır.



Şekil 2.4: Elektromanyetik model

Teflonun dielektrik sabiti 2.1, kuvars ayırma levhasının ise 4.2 olarak alınmıştır. Anten yüksekliği olarak 2.45 GHz frekanstaki mikrodalmanın dalga boyunun $1/4$ uzunlığında olan bir anten olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 2.1: Boyutlar Tablosu

Boyut Adı	Uzunluğu (mm)
Kavite yüksekliği (h_c)	175
Kavite yarıçapı (r_c)	50
İnce ayar (Tune) yüksekliği (h_s)	77.5
Anten yüksekliği (h_a)	31
Anten çapı (r_a)	6.35
Port çapı (r_p)	20.64
Port yüksekliği (h_p)	15
Ayırma levhası yüksekliği (t_s)	10
Teflon yüksekliği (h_t)	5

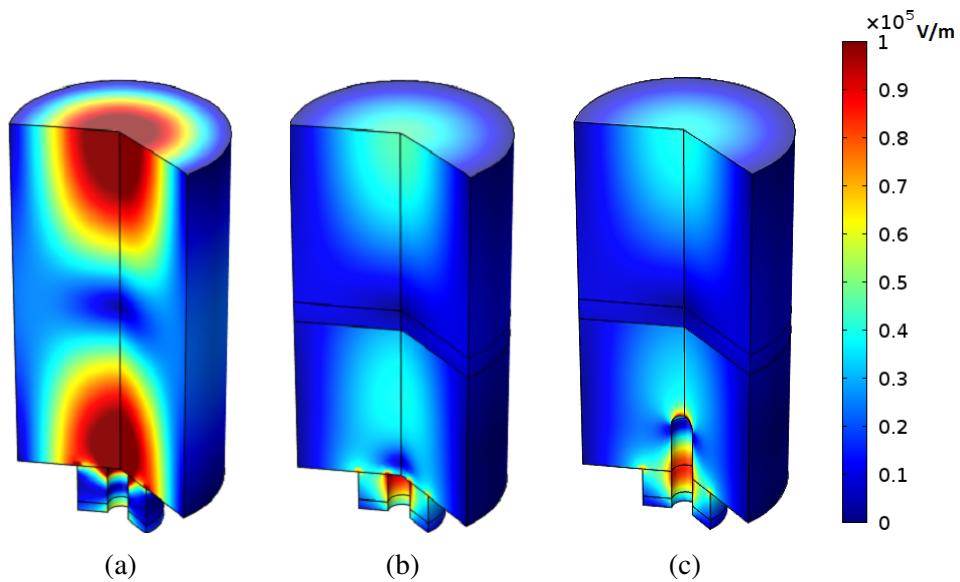
2.2.3.1 Silindirik rezonant kavite içerisinde elektrik alan dağılımı

Tezin bu bölümünde plazma olmadan önce rezonant kavite içerisindeki elektrik alan dağılımı analizleri ve sonuçlarından bahsedilecektir. Üç farklı kavite konfigürasyonu için hesaplamalar yapılmıştır. Bu konfigürasyonların birincisinde kavite içerisinde anten ve ayırma levhası elemanlarının etkisi olmadan elektrik alan yoğunluğu

ve dağılımına bakılmıştır. İkinci konfigürasyonda kavite içerisinde ayırma levhası yerleştirilmiş ve bu levhanın elektrik alan üzerindeki etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Üçüncü durumda ise hem ayırma levhası hem de anten varken kavite içerisinde elektrik alan dağılımına bakılmıştır. Son konfigürasyon deneyel tasarımda kullanılacak olan konfigürasyondur. Her üç durum için Şekil 2.4b'de verilen çözüm ağı modeli kullanılarak Eşitlik 2.9'da verilen genel dalga denklemi [63] [65] çözülmüştür.

$$\frac{1}{\mu_r} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (2.9)$$

Burada ϵ_r ortamın görelî dielektrik sabitidir. İlk konfigürasyon için yapılan çözümde, en yüksek elektrik alan değerinin analitik çözümde elde edilen çözüme benzer olarak kavitenin alt ve üst yüzeyinin yanında olduğu Şekil 2.5a'da görülmektedir. Elektrik alan en yüksek değerinin 10^5 V/m mertebesinde olduğu görülmüştür.



Şekil 2.5: Kavite içerisindeki elektrik alan dağılımı (a)Boş kavite, (b)Ayırma levhası yerleştirilmiş kavite, (c)Ayırma levhası ve anten yerleştirilmiş kavite

İkinci ve üçüncü durumlarda Şekil 2.5b ve Şekil 2.5c'de kavite orta bölümünde kuvars bir dielektrik levha konulduğunda elektrik alan maksimum değerinin yer değiştirmediği ancak $4 \times 10^4 \text{ V/m}$ mertebesine kadar düşüğü görülmüştür. Clemens tarafından kısmen dielektrik malzeme ile dolu bir kavite için yapılan analitik çözümde; dielektrik malzemenin kalınlığı arttıkça belirlenen mod için rezonans frekansının düşeceği rapor edilmiştir [3, 66]. Buradaki elektrik alan dağılımının azalma sebebi olarak bu fenomen gösterilebilir. Bu durum aslında MET sistemleri için bir avantaj olarak da görülebilir. Şöyled ki; sabit bir yarıçapta kavite yüksekliği

azaltıldığında rezonans frekansı tekrar yükselecektir. Yükselen frekansı geri istenilen değere düşürmek için uygun kalınlıktaki dielektrik malzeme kullanıldığında kavitenin uzunluğu ve dolayısı ile ağırlığı azalmış olacaktır.

Öte yandan kavite içerisindeki anten uzunluğunun elektrik alan üzerinde ayırma levhası kadar etkisi olmadığı görülmüştür ve anten varken değerinin yine $4 \times 10^4 \text{ V/m}$ mertebesinde olduğu görülmüştür.

2.2.3.2 Plazmanın elektrik alan üzerindeki etkisi

MET sistemlerinde rezonatörün kullanım amacı gaza mikrodalga enerjisini transfer edebilmektir. Enerji transferinin yüksek olması için kavite ve anten tasarıımı önem arzettmektedir. Kavite içerisinde plazma oluştuktan sonra plazma daha önce açıklandığı gibi bir rezistans elemanı gibi davranış göstererek ve mikrodalga enerjisinin emilmesine neden olacaktır. Plazma oluşumu aynı zamanda ortamın iletkenliğini ve dielektrik sabitini Denklem 2.10 ve 2.11'de verildiği şekilde değiştirecektir [60]. Değişen ortam şartları sistemin ince ayar (tune) yapılmasını gerektirecektir [67].

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e} \frac{1}{v_m + j\omega} \quad (2.10)$$

$$\epsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - jv_m)} \quad (2.11)$$

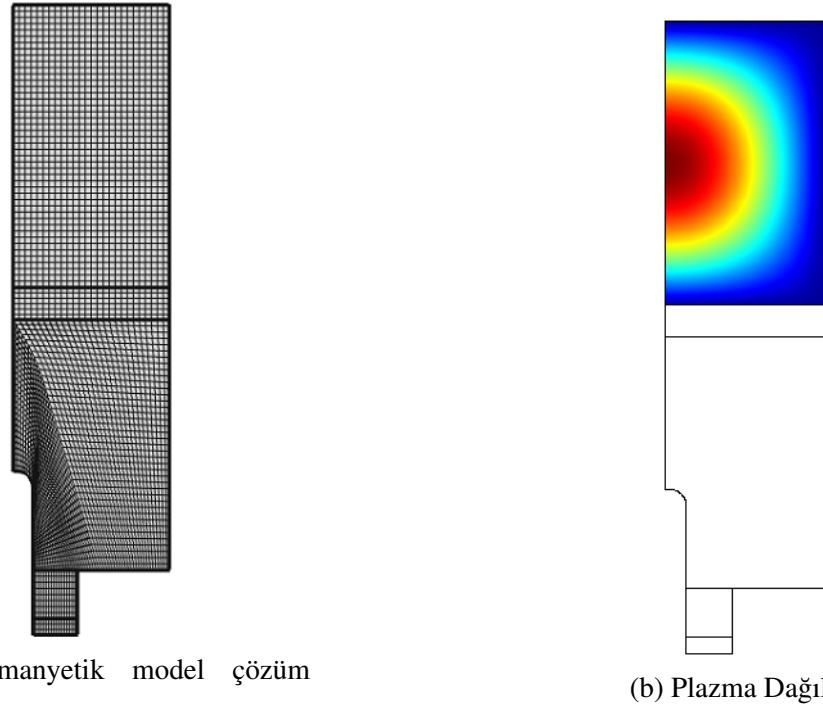
Bu denklemlerde e elektron yükünü, m_e elektron ağırlığını, ω_p plazma frekansını temsil etmektedir. $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}$ şeklinde ifade edilebilir. ω ve v_m ise elektromanyetik dalga açısal frekansı ve elastik çarpışma frekansıdır. n_e plazma elektron yoğunluğunu temsil etmektedir ve silindirik bir kavite için çözüm yapıldığında Denklem 2.12'deki gibi bir dağılım fonksiyonu elde edilecektir.

$$n_e(r, z) = n_0 J_0(\chi_{01} r / R_p) \cos(\pi z / l) \quad (2.12)$$

Kavite içerisindeki plazma dağılımı Şekil 2.6b'deki gibi elde edilecektir [68]. Plazma parametreleriyle ilgili olarak daha ayrıntılı bilgi Bölüm 4'te verilecektir.

Bu bölümde kavitenin plazma oluşan kısmında atmosferik basınçta farklı elektron yoğunluklarında ve 1 eV sıcaklığında plazma ortamı oluşturduğu düşünülerek analizler yapılmıştır. Analizlerde farklı durumlar için en iyi anten uzunluğu ve kavite uzunluğu

için parametrik arama yapılmıştır. İlk bölümde kavite boyutları sabit tutularak kavite içerisindeki anten uzunluğu için arama yapılmıştır. İkinci durumda ise anten boyu 30.6 mm (dalga boyunun dörtte biri) uzunlığında tutularak kavitenin anten olan tarafının uzunluğu değiştirilerek parametrik arama yapılmıştır.



Şekil 2.6: Elektromanyetik alan analizi için çözüm ağı ve plazma modeli.

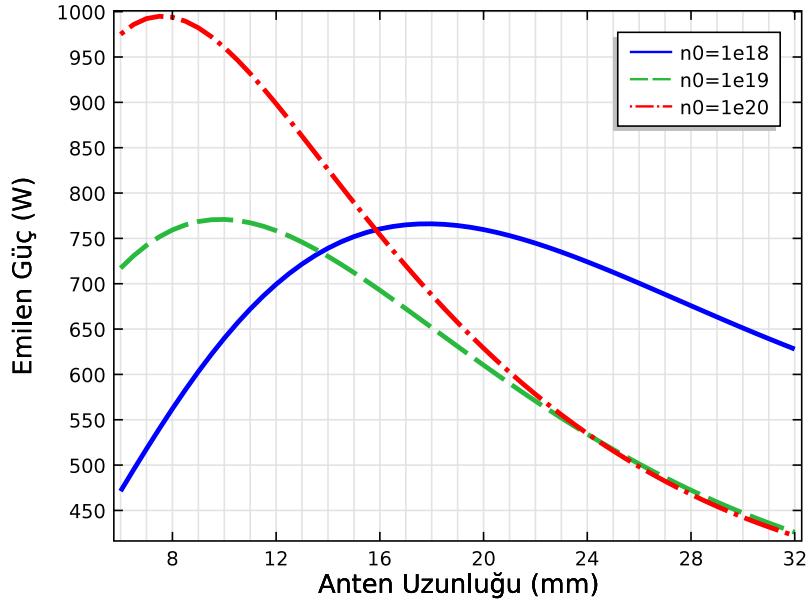
Bu bölümdeki analizlerde daha hassas sonuç alabilmek için ilk bölümdeki üçgensel elemanlardan oluşan çözüm ağı yerine Şekil 2.6a'daki gibi dikdörtgensel elemanlardan ve daha fazla noktadan oluşan bir çözüm ağı kullanılmıştır. MET sistemlerinde plazma yoğunluğunun $10^{19} - 10^{20} \text{ } \#/\text{m}^3$ olduğu rapor edilmiştir [27]. En iyi anten uzunluğunu bulmak için $n_0 = 10^{18}, 10^{19}, 10^{20} \text{ } \#/\text{m}^3$ değerleri için program koşturulmuştur. Anten uzunluğu için 6-32 mm aralığında arama yapılmıştır. Emilen gücü hesaplamak için Denklem 2.13 kullanılmıştır.

$$P_{abs} = \frac{\sigma}{2} \int_v |\mathbf{E}|^2 dV \quad (2.13)$$

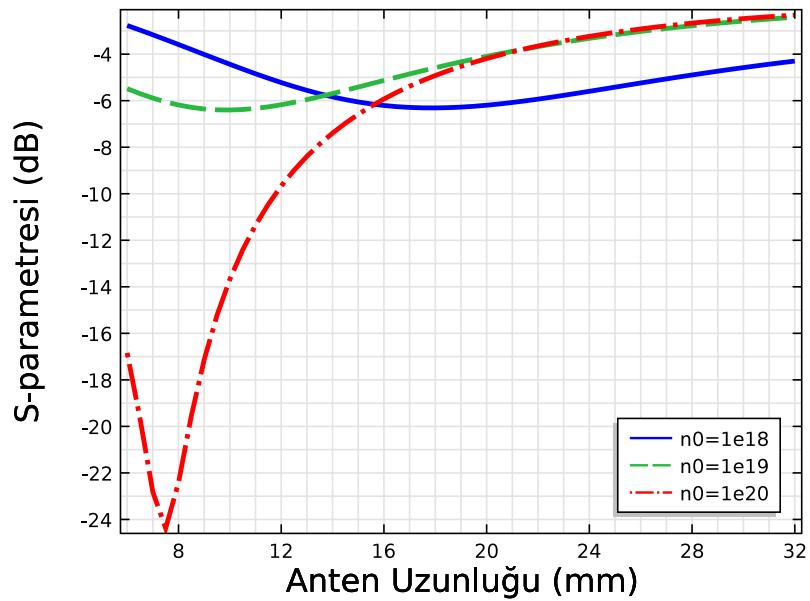
Yapılan analizlerde optimum anten uzunluğunun farklı elektron yoğunlukları için Şekil 2.7a ve 2.7b'deki gibi değişim gösterdiği görülmektedir. Bu uzunluğun $n_0 = 10^{18} \text{ } \#/\text{m}^3$ için 16 mm, $n_0 = 10^{19} \text{ } \#/\text{m}^3$ için 10 mm ve $n_0 = 10^{20} \text{ } \#/\text{m}^3$ için ise 8 mm

olduğu görülmüştür. Öte yandan S-parametresi sonuçları ile emilen güç grafiği uyum göstermektedir. Şöyle ki; güç emiliminin en yüksek olduğu noktalarda S-parametresi değerleri minimum değerine ulaşmıştır.

Kavite uzunluğu optimizasyonu için yapılan analiz sonuçlarına bakıldığında $n_0 = 10^{18} \text{#/m}^3$ değeri için kavite boyu kısalıkça güç emiliminin azaldığı ancak diğer iki yoğunluk değeri için maksimum güç emiliminin minimum kavite uzunlığında olduğu Şekil 2.8a ve 2.8b'deki gibi görülmüştür. S-parametresi değerleri bu analiz için güç emilimi ile tutarlılık göstermektedir.

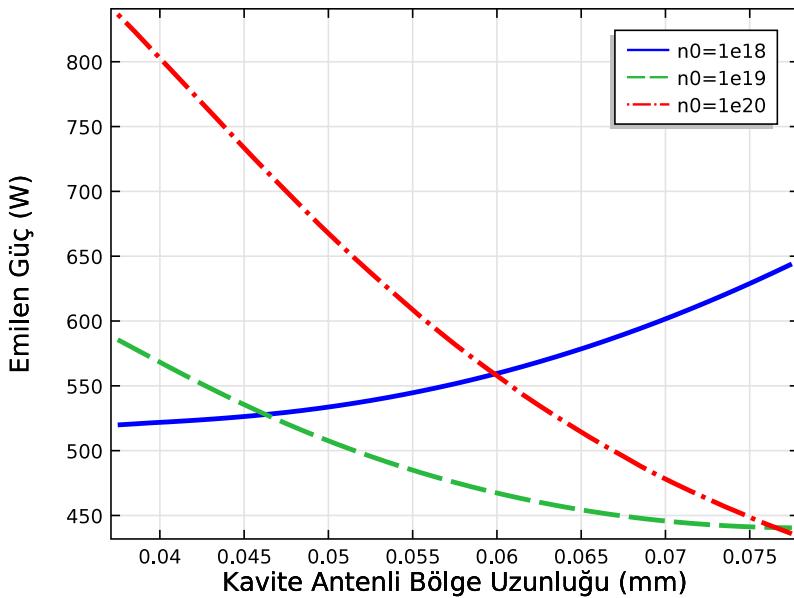


(a) Anten Uzunluğu ile Emilen Güç Değişimi

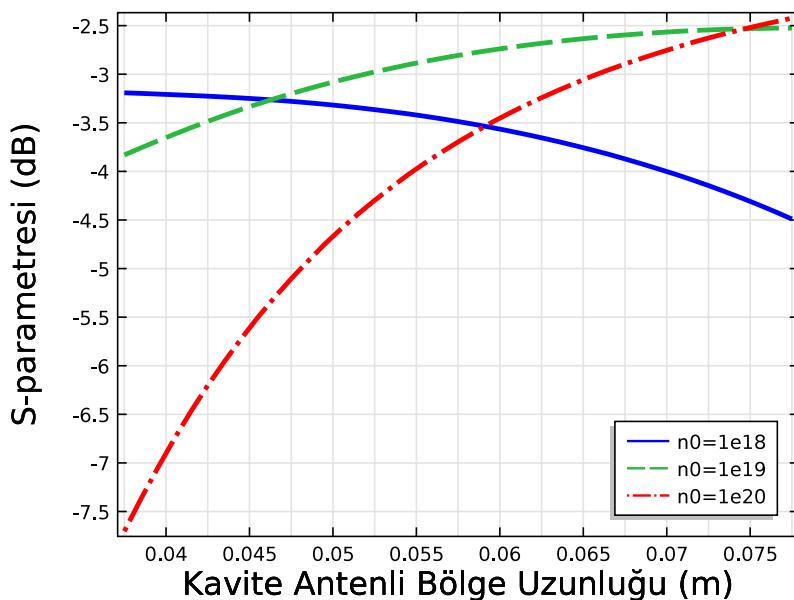


(b) Anten Uzunluğu ile S-Parametresi Değişimi

Şekil 2.7: En iyi anten uzunluğu için analiz sonuçları.



(a) Kavite Uzunluğu ile Emilen Güç Değişimi

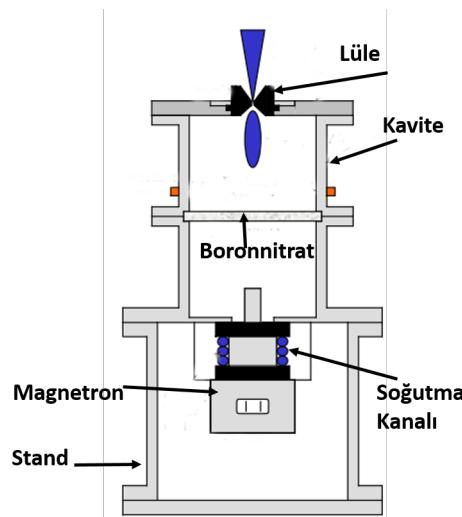


(b) Kavite Uzunluğu ile S-Parametresi Değişimi

Şekil 2.8: En iyi kavite uzunluğu için analiz sonuçları.

3. MET SİSTEMİ PROTOTİPİ VE TESTLERİ

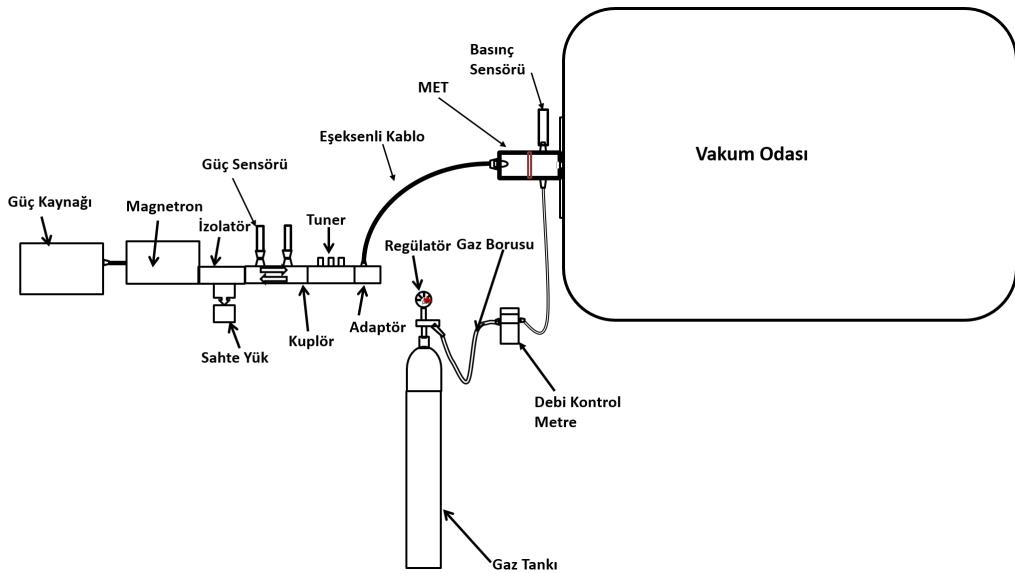
MET sistemi kavram olarak ortaya atıldığı günden itibaren farklı deney düzenekleri kurularak sistemin verimliliği ve performans parametreleri test edilmeye çalışılmıştır. Deney düzenekleri genelde mikrodalga üretim, iletim hattı, gaz besleme ve vakum hattından oluşmaktadır. Kurulan sistemlerde 915 *MHz*'den 30 *GHz*'e kadar farklı frekanslarda çalışan mikrodalga üreteçleri kullanılmıştır. Sistemlerde kavite içerisine mikrodalga yayılımı yapmak için Şekil 3.1'deki gibi magnetron doğrudan bağlanabildiği gibi Şekil 3.2'de görüldüğü gibi bir iletim hattı üzerinden de aktarılmaktadır.



Şekil 3.1: Kavite üzerine magnetron bağlı MET prototipi. [4]

Doğrudan magnetron bağlı olan sistemler sabit güç seviyesinde çalışmaya müsaade eder ve magnetronun soğutulması için ayrıca bir soğutma düzeneği gerekmektedir. Bu sistemler ikinci tip sistemlere göre daha basit yapıda ve kompakt oldukları için tercih edilmektedirler. Bağımsız bir mikrodalga üreteci kullanan sistemlerde ise güç seviyesi farklı değerlere ayarlanabilir. Ayrıca ikinci tip sistemlerde iletim hattı üzerine takılacak olan bir izolatör yardımıyla sistem geri yansıyan mikrodalga dalgadan korunur. Bu tip düzeneğin bir diğer avantajı da hat üzerine sensörler yerleştirilerek yansıyan ve emilen gücün tespit edilebilmesidir.

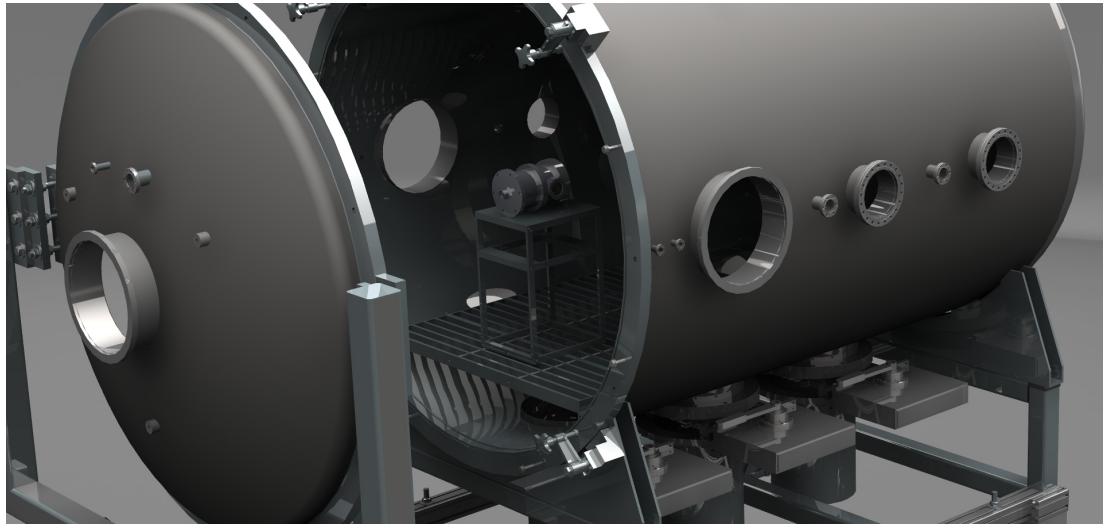
Bu tez çalışmasında kurulan deney düzeneği Şekil 3.2'de gösterildiği gibi bir mikrodalga üretim ve iletim hattı kullanılmıştır. Temini daha ucuz ve kolay olduğu için 2.45 GHz frekansta çalışan bir mikrodalga besleme sistemi kullanılmıştır. Mikrodalga üretim hattı genel olarak mikrodalga üretici, izolatör, kuplör, ince ayar sistemi(tuner), adaptör ve eşeksenli kablodan oluşmaktadır. Mikrodalga iletim hattının detaylarından kısım 3.1'de bahsedilecektir.



Şekil 3.2: Deney düzeneği şeması.

MET sistemleri uzay ortamında kullanılmak üzere tasarlandığı için testlerinde önemli bir parametre de uzay ortamının benzetim yapılabilmesidir. İtki sistemleri testlerinde uzay ortamının benzetim yapılmasında roket arkası basıncın vakum seviyesi önemli bir parametredir. Bugüne kadar kullanılan deney düzeneklerinde $10^{-2} - 10^{-5}$ torr aralığında farklı vakum seviyelerine inebilen sistemler kullanılmıştır. Bu sistemler arasında yapısal olarak büyük vakum tankları olduğu gibi daha küçük ve kompakt Çan Kavanozu (Bell Jar) sistemleri de kullanılmaktadır [27, 32].

Bu tez çalışmasında Şekil 3.3'de resmi görülen Boğaziçi Üniversitesi Uzay Teknolojileri Laboratuvarında bulunan 1.5 m çapında ve 2.7 m uzunluğundaki vakum odası kullanılmıştır. Vakum sistemi bir mekanik pompa tarafından ve iki kriyojenik pompa tarafından boşaltılabilir ve basınç seviyesi 10^{-8} torr seviyesine kadar düşürülebilir. Deney düzeneğinin diğer önemli bileşeni ise gaz besleme sistemidir. Gaz besleme sistemine bakıldığından sisteme gaz tankı, basınç regülatörü, bağlantı elemanları, paslanmaz çelik borular ve MKS 579A debi kontrol metre



Şekil 3.3: MET sisteminin vakum odası içine yerleştirilmiş halinin üç boyutlu gösterimi.

kullanılmıştır. Kullanılan debimetre Helyum gazı için kalibre edilmiş ve $100 \text{ slm}'e$ kadar akış sağlayabilmektedir. Debi kontrol metrenin ölçüm hassasiyeti $\% \mp 1$ 'dir.

Prototip ilk olarak Şekil 3.3'deki gibi vakum odası içerisinde çalıştırılmıştır. Vakum tankı içerisinde mikrodalga iletimi Şekil 3.4'deki gibi eşeksenli kablolarla sağlanmıştır. Eşeksenli kabloların vakum sistemine bağlantısı için bir KF50 mikrodalga konnektörü kullanılmıştır. Deneyler sırasında oda basıncı sadece mekanik pompa kullanılarak minimum 10^{-2} torr seviyesine kadar düşürülmüştür. Sistem bu konfigürasyonda üç kez farklı zamanlarda yaklaşık 30 dakika süre ile çalıştırılmıştır [69].

Ancak bu konfigürasyonda prototip vakum odası içerisinde kaldığı için gözlem zorluğu yaşandığından ve de mikrodalga gücün vakum tankı içerisinde aktarılmasında bazı sorunlarla karşılaşıldığından Şekil 3.5'dekine benzer ikinci bir tasarım yapılmıştır. Bu son tasarımda MET prototipi vakum odası dışında olduğu için kavite içerisinde oluşan plazmanın durumu daha kolay gözlenebilir hale gelmiş hem de deneyler esnasında oluşabilecek olumsuzluklar durumunda (gaz kaçakları, bağlantı elemanlarının yerinden çıkması, mikrodalga kablo ve bağlantı elemanlarının kopması veya yerinden çıkması gibi) prototipe daha kolay erişilmesi sağlanmıştır.

Sistem Nitrojen, Argon ve Helyum gazları ile çalıştırılmıştır. Sistemin bu gazlar ile çalıştığı durumlardaki resimler Şekil 3.6'te gösterilmektedir. Her üç gaz ile plazma deşarjı görülmüştür. Argon gazı ile çalıştırılması sırasında homojen olmayan ve bir elektrik arkına benzer plazma yapısı görülmektedir. Oluşan plazma kavite merkez

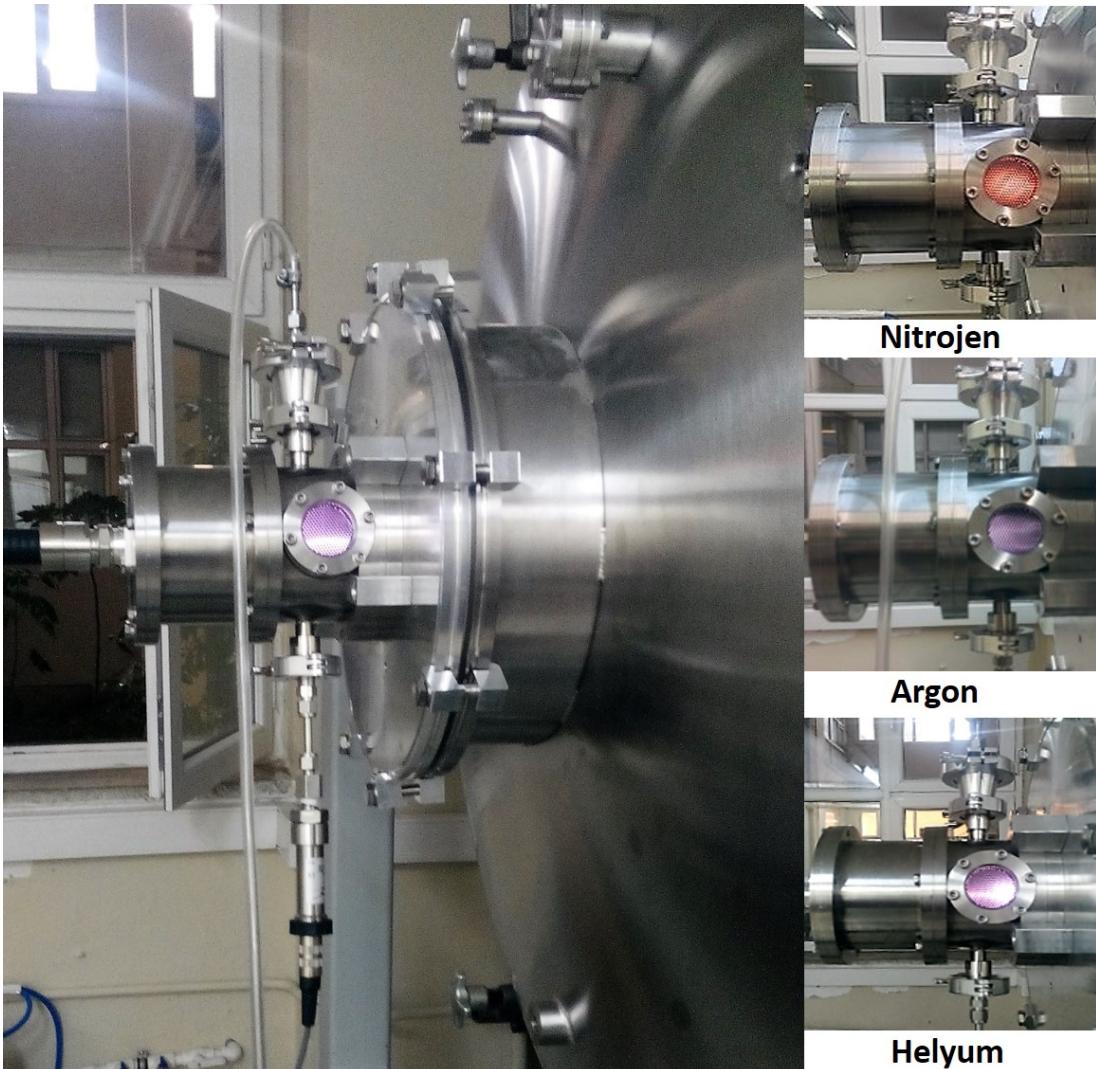


Şekil 3.4: Vakum odası içi deney düzenegi.



Şekil 3.5: MET sisteminin vakum odası dışına asılmış halinin üç boyutlu gösterimi.

ekseni üzerinde parlak bir filament şeklindedir ve kararlı değildir. Artan basınç ile birlikte plazmanın çapının iyice azaldığı görülmüştür. Argon plazmasında yüksek akış debilerinde plazmanın lüleden dışarıya doğru uzadığı görülmektedir. Helyum ve Nitrojen ile oluşturulan plazmalar ise daha kararlı yapıdadır. Plazma bir küre şeklinde kavite merkezinde oluşmaktadır, basıncın artırılması ile birlikte hacmi daralarak bir su damlası şeklini almaktadır ve kavite lüle duvarına doğru hareket etmektedir.



Şekil 3.6: Vakum odası dışı deney düzeneği.

Farklı gazlar için plazma yaklaşık 10 torr basınç seviyesinde başlarken plazmanın başlaması için gereken güç seviyesi farklılık göstermektedir. Helyum için 100 W mikrodalga güç seviyesi yeterliken Argon için bu seviye 220 W civarındadır. Nitrojen gazı ise moleküller bir gaz olduğu için soy gazlardan çok daha farklı bir özelliğe sahiptir. Çünkü moleküller gazlarda plazma oluşurken öncelikli olarak moleküller arası bağların kırılması gerekmektedir. Dolayısı ile bu durum için ekstra güç harcanması

gerekmektedir. Nitrojen gazı ile yapılan testlerde 700 W seviyesine kadar çıktıığı halde plazma başlamadığı görülmüştür ve farklı bir yöntem izlenmiştir. Önce Argon gazı ile plazma başlatılmıştır ve sonra Nitrojen gazı açılmıştır Nitrojen plazması oluşmaya başladığında Argon gaz akışı kesilmiştir. Bu yöntem daha önce de mikrodalga plazması kullanan sistemlerde başvurulan bir yöntemdir. Üç gaz içinde gözlemlenen plazma karakteristikleri literatürdeki mikrodalga plazma sistemleri ile benzerlik göstermektedir [70].

3.1 Mikrodalga Üreteci ve İletim Hattı

Mikrodalga üretim ve iletim hattında kullanılan mikrodalga üretici mikrodalga güç kaynağı ve entegre magnetron sisteminden oluşmaktadır. Sistemde Richardson *SM745* modelinde bir güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağı %1 aralıklarla mikrodalga gücü gönderilmesini sağlamaktadır. Magnetron sistemi olarak ise Richardson *MH1.2W – S* marka mikrodalga üretici kullanılmıştır. Bu entegre sistemin kullanılması sayesinde 12-1200 W aralığında mikrodalga gücü ile deneyler yapılmasına olanak sağlanmaktadır.

Günümüze kadar yapılan deneylerde rezonans kavite içerisinde mikrodalga güç gönderildiğinde plazma deşarjı başlayana kadar gönderilen gücün yaklaşık yarısının geriye yansıdığı rapor edilmiştir. Aynı zamanda bu tez esnasında yapılan deneyler esnasında da bu durum gözlemlenmiştir. Geri yansyan güç magnetrona ulaşlığı takdirde magnetronun hasar görmesine, hatta yanmasına neden olacaktır. Bunu önlemek için iletim hattı üzerine, geri yansyan dalgaların bir sahte yük tarafından absorbé edilerek sisteme zarar vermesini engelleyen Muegge *MW1003A – 210EC* model bir izolatör yerleştirilmiştir. Bu izolatör 3 kW'a kadar geri yansımalarda sistemi koruma kapasitesine sahiptir.

İzolatörün yanı sıra yansımaları azaltmak ve gönderilen dalganın büyük bir bölümünün yakıt gazı tarafından emilmesini sağlamak için sistemi ince ayar (*tune*) yapmak gerekmektedir. Sistemi ince ayar yapabilmek için izolatör'den hemen sonra sistem üzerine Astex *D13604 two – stub – tuner* kullanılmıştır.

Sistemin daha esnek olması farklı vakum sistemlerine kolay entegre edilebilmesi için dalga kılavuzundan eşeksenli kabloya geçiş yapılması düşünülmüştür. *WR340*

dalga kılavuzundan eşeksenli kabloya geçiş için Muegge MW5002A – 260YD adaptör kullanılmıştır. Eşeksenli kabloyu adaptöre ve kaviteye bağlamak için 7/16 DIN konnektörler kullanılmıştır. Kullanılan eşeksenli kablo 2.45 GHz frekansta 2.8 kW güç taşıma kapasitesine sahiptir ve bu şartlarda sadece $4\text{ dB}/100m$ kayba neden olmaktadır.

3.2 Ölçme Sistemleri

MET prototipi verimliliğinin tespit edilebilmesi için ölçülen ilk parametre gönderilen gücün ne kadarının plazma deşarjı tarafından emildiğidir. Emilen güç miktarını ölçmek için mikrodalga iletim hattı üzerinde bulunan kuplör terminalerine iki adet Booton 52012 algılayıcı yerleştirilmiştir. Algılayıcılardan bir tanesi gönderilen gücü ölçerken diğerini geri yansıyan güc ölçmektedir. Algılayıcı en kötü durumda $\mp 0.27\text{ dB}$ doğrusallık hatası ve $\mp 0.19\text{ dB}$ kalibrasyon hatası ile ölçüm yapabilmektedir. Bu değerler kullanıldığından en kötü şartlarda yapılacak hata %10 mertebesinde olacaktır.

Sistem performansının anlaşılmasına yönelik tespit edilmek istenilen diğer parametreler ise itki, özgül impuls ve itki verimi parametreleridir. Mili-Newton mertebesinde itki üreten bir sistemin itki seviyesini hassas ve güvenilir bir şekilde ölçmek ayrı bir uzmanlık alanı olup bu hassasiyette ölçüm cihazlarını erişmek zor ve maliyetlidir. Dolayısıyla bu tez kapsamında itki seviyesi bir boyutlu roket denklemlerinden yararlanılarak tespit edilmiştir. Şu ana kadar yapılan çalışmalarda bu yaklaşımla yapılan hesaplamaların yaklaşık %10 hata ile makul bir mertebede sonuçlar elde edildiği rapor edilmiştir [27].

Lüle boyutları bilinen bir roket sistemi tarafından üretilen itkinin hesaplanabilmesi için lüle girişindeki gaz sıcaklığı ve basıncının bilenmesi gerekmektedir. Kavite içerisindeki basınç kavite duvarı üzerine yerleştirilen Keller 33X model basınç algılayıcı ile ölçülmüştür. Algılayıcı %0.05 hassasiyetle ölçüm yapmaya olanak sağlamaktadır. Öte yandan kavite içerisinde mikrodalga yayılımı olduğu için sıcaklık bilgisi doğrudan bir termokupl ile ölçülememektedir. Bunun nedeni kavite içerisinde yerleştirilen herhangi bir iletken malzemenin mikrodalga yayılım modunu etkileyeceği ve ark oluşumuna neden olabileceğidir. Dolayısıyla sıcaklık bilgisinin hesaplanabilmesi için soğuk (îçeride plazma deşarjı olmadan) ve sıcak (îçeride plazma deşarjı varken) basınç değerleri ölçülmüş ve bu iki parametre kullanılarak

sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Bölüm 3.4’te bu hesaplama yöntemi detaylı şekilde anlatılacaktır.

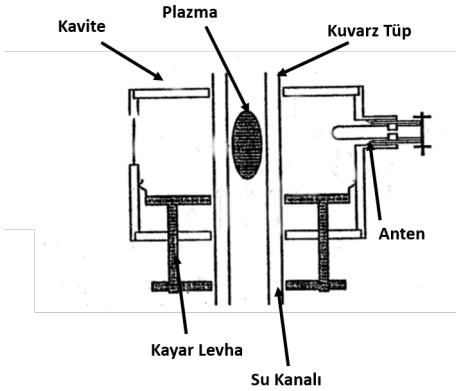
3.3 MET Sistemi Tasarımı

MET sistemi tasarımında kavitenin doğru tasarlanması sistemin verimli ve doğru çalışması açısından son derece önemlidir. Bugüne kadar farklı boyut ve modlarda çalışan kaviteler tasarlanmıştır. Verimli kavite tasarımında, gaza maksimum enerji transferi sağlanabilmesi ve ısnan gazın en az kayıpla dışarıya atılması hususları önem taşımaktadır. Bu şartların sağlanabilmesi için plazmanın kavitenin ekseni üzerinde ve lüleye yakın kısmında oluşması, plazmanın kararlı olması ve farklı şartlarda mikrodalga güç emiliminin en yüksek seviyede kalabilmesi için kavitenin ince ayar yapılabılır olaması gerekmektedir.

Bugüne kadar yapılan çalışmalarında silindirik bir kavitede plazmanın lüleye en yakın yerde oluşabilmesi gereken elektrik alan dağılımının TM_{011} modda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Plazma kararlılığının sağlanması için ilk olarak Şekil 3.7’deki gibi kavite içerisinde bir kuvars tüp yerleştirilmiştir. Ancak yapısal olarak karmaşık ve kırılgan olduğu için bu tasarımdan vazgeçilmiştir. Daha sonraki tasarımlarda yakıt gazının kavite duvarlarına teget olarak püskürtülmesi ile sağlanabileceği deneySEL olarak ortaya konulmuştur [24]. Günümüzde kullanılan prototiplerde bu yöntem kullanılmaktadır.

Kavitenin ince ayar yapılabilmesi için bir kaç yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi kavitenin bir duvarının Şekil 3.5’deki gibi kayar bir levha gibi tasarlanarak kavite boyutlarının değiştirilmesi ile ayar yapılmasıdır. İkinci yöntem ise mikrodalga iletim hattı üzerine bir ince ayar sistemi bağlanmasıdır. İnce ayar sistemleri manuel veya otomatik olabilmektedirler.

Tez kapsamında TM_{011} modda çalışan bir kavite tasarlanması karar verilmiştir. Kısım 2.2.2’de bu tez kapsamında tasarlanacak olan MET kavitesi iç çapı 50 mm ve uzunluğu ise 175 mm olarak belirlenmiştir. Bu bölümde ise MET tasarımını daha detaylı olarak anlatılacaktır. MET kavite kısmı iki ayrı bölümden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Kavitenin ilk kısmında Şekil 3.8’teki gibi anten bulunmaktadır. MET’in çalışması sırasında antenin olduğu bölümde plazmanın oluşması istenmeyen



Şekil 3.7: Kuvarz tüp kullanan MET sistemi prototipi. [5]

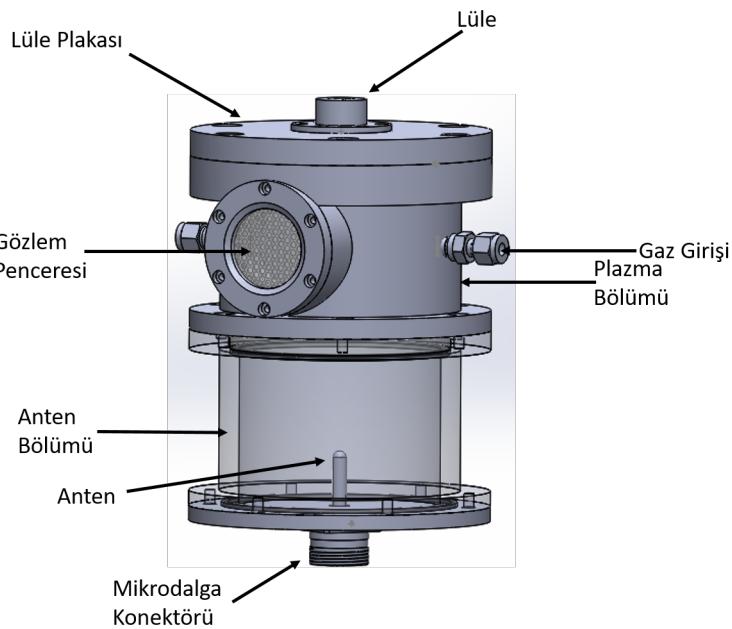
bir durumudur. Bu bölümde plazma oluşmaması için gaz basıncının eşik değer olan 10 torr'dan çok yüksek olması veya çok düşük olması gerekmektedir. Bu kısımda gaz basınç seviyesinin yüksek kalması için plazma oluşan diğer bölümden Şekil 3.9'deki gibi bir kuvars ayırma levhasıyla ayrılmış ve bir o-ring kullanılarak iki bölüm arasındaki sızıntılar tamamen önlenmiştir.

Kavitenin ikinci bölümü ise plazma deşarjının olduğu ve gazın ıstdığı bölümdür. Bu bölüm duvarları üzerinde gaz enjeksiyonu ve basınç sensörü için iki adet delik bulunmaktadır. Yakıt gazının püskürtülürken kavite duvarlarına teğetsel akarak soğutma sağlaması için enjeksiyon yapılan delik 15 derece açılı olarak açılmıştır. Bu bölüm duvarında ayrıca 50 mm çapında bir gözlem penceresi bulunmaktadır. Gözlem penceresi plazma deşarjının durumu hakkında gözlem yapılmasını sağlayacaktır. Pencereden olabilecek mikrodalga kaçağının önlenmesi için pencere arkasına gözenekli yapıda bir metal levha yerleştirilmiştir.

Lüle plazma bölümü üst kısmında kapak olarak kullanılan bir levha üzerinede yerleştirilmiştir. Lüle kısmı sökülüp takılır şekilde dizayn edilmiştir. Bu tasarım farklı boyutlardaki lülelerin kullanılmasına izin vermektedir.

Anten ise anten bölümü alt kapağında bulunan 7/16 DIN konnektöre Şekil 3.9'deki gibi vida ile tutturulmuştur. Dalga boyu uzunluğunun dörtte biri kadar olan bir monopol anten kullanılmıştır.

MET imalatında kullanılan malzemeler Çizelge 3.1'de görüldüğü gibi parça bazında farklılık göstermektedir. Kavite gövdesinde genelde alüminyum alaşımı ya da paslanmaz çelik malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, ülkemizde bulunan imalat şartları göz önünde bulundurulduğunda paslanmaz çelik kolay



Şekil 3.8: Mikrodalga İtki Sistemi.

erişilebilir ve imalatı kolay olduğu için tercih edilmiştir. Lüle ve lüle levhasında yine

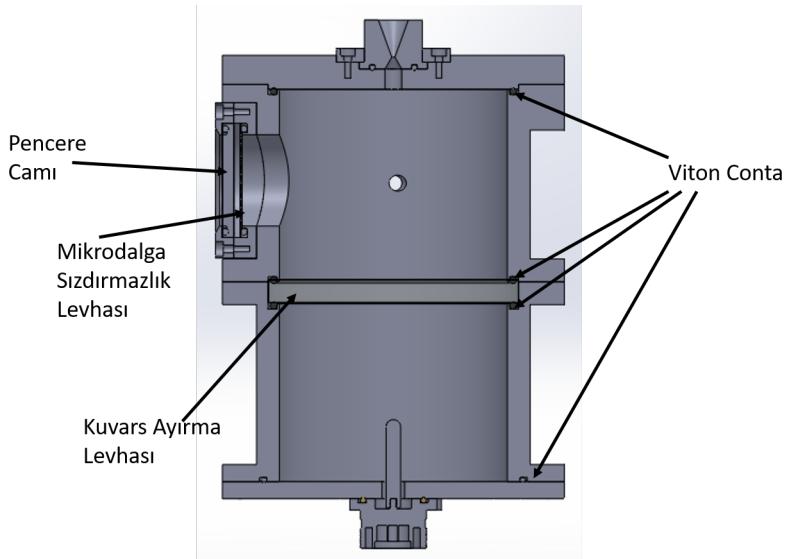
Çizelge 3.1: MET Üretiminde Kullanılabilecek Malzemeler

Parça	Malzeme
Kavite Gövdesi	Prinç, Bakır, Paslanmaz Çelik, Alüminyum 6061 ve Alüminyum 6013
Lüle	Grafit, Paslanmaz Çelik, Tungsten
Lüle Levhası	Paslanmaz Çelik, Grafit
Ayırma Levhası	Bor Nitrat, Kuvars

paslanmaz çelik malzeme tercih edilirken anten imalatında bakır kullanılmıştır. Ayrıca iki ana bölümü ayırmada kullanılan levha için yüksek sıcaklık dayanımı ve mekanik mukavemetinin yüksek olması nedeniyle kuvars tercih edilmiştir. Tüm parçalar talaşlı imalat yöntemiyle imal edilmiştir.

3.4 Sonuçlar ve Analiz

Mikrodalga elektrotermal itki sisteminde enerjinin gaza aktarılmasındaki esas unsur daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi plazma içerisindeki elektronlar ile nötr parçacıklar arasında gerçekleşen çarpışmalardır. Basıncın yüksek olması durumunda çarpışmalar artacağından mikrodalga enerjisi daha çabuk gaza aktarılacaktır. Çarpışmalardaki artış gazın direncinde artışa neden olmakta ve mikrodalga enerjisinin



Şekil 3.9: Mikrodalga İtki Sistemi kesit hörünümü.

daha çabuk emilmesini sağlamaktadır. Yüksek basınç şartlarında plazma ve gaz arasındaki sınırların belirginleştiği gözlemlenmiştir. Bunun aksine düşük basınç seviyelerinde plazma ve gaz arasındaki sınırın belirsizleştiği gözlemlenmiştir. Düşük basınç durumunda çarpışmalar azalacağı için plazmanın iletkenliği yüksektir ve mikrodalga emilimi azalacaktır. Bu durumda gönderilen mikrodalga gücün büyük bir kısmı geri yansıyacaktır [32]. Yapılan deneylerde sistemin ilk çalıştırılması sırasında düşük basınç seviyelerinde (10 torr) gönderilen mikrodalga gücün yaklaşık yarısının geri yansıdığı ve basınç artışıyla birlikte yansımaların hızla düştüğü gözlemlenmiştir.

Deneysel çalışmada yakıt gazı olarak Helyum kullanılmıştır. 400 W ve 500 W olmak üzere iki farklı mikrodalga güç seviyesi ve $30\text{-}84 \text{ mg/s}$ arası akış debileri için deneyler yapılmıştır. MET prototipi itki seviyesi ve özgül impuls değerinin hesaplanması için aşağıda bahsedilecek olan roket bağıntılarından yararlanılmıştır. Bu eşitliklerden yararlanılarak performans parametrelerinin hesaplanabilmesi için öncelikle kavite içerisindeki şartlar tespit edilmiştir. Kavite içerisindeki basınç Kısım 3.2'de belirtilen algılayıcı yardımıyla kavite duvarı üzerinden ölçülmüştür. Sıcaklığın tespiti için ise iki farklı çalışma koşulları için ölçülen basınç bilgisinden yararlanılmıştır. İlk basınç ölçümü kavite içerişine mikrodalga gönderilmeden ve içinde plazma oluşmadan soğuk gaz akışı şartlarında yapılmıştır. Bu ölçümler, tekrar edilebilirliği gözlemlemek amacıyla, her kütlesel debi değeri için üç kere tekrarlanmıştır. Soğuk gaz testleri bittikten sonra ilk önce 400 W daha sonra 500 W mikrodalga gücü seviyesinde sistem

çalıştırılmış ve içerisinde plazma varken bahsedilen kütle debisi aralığında ölçümler yapılmıştır.

Sistemin çalıştırılırken ilk önce vakum sistemi devreye sokulmuştur. Vakum odası basıncı 10^{-3} torr seviyesine düştükten sonra kavite içeresine gaz akışı başlatılmıştır. Kavite içerisindeki basınç 10 torr seviyesine geldiğinde mikrodalga üreteci çalıştırılmıştır. Plazma deşarjinin başladığı görüldüğünde gaz akış debisi istenilen düzeye ayarlanmıştır ve basınç değeri ölçülmüştür.

Sıcak gaz durumunda kavite içi sıcaklığına ulaşmak için Denklem 3.1 her iki durum için yazılıp orantı kurularak Denklem 3.2 elde edilmiştir.

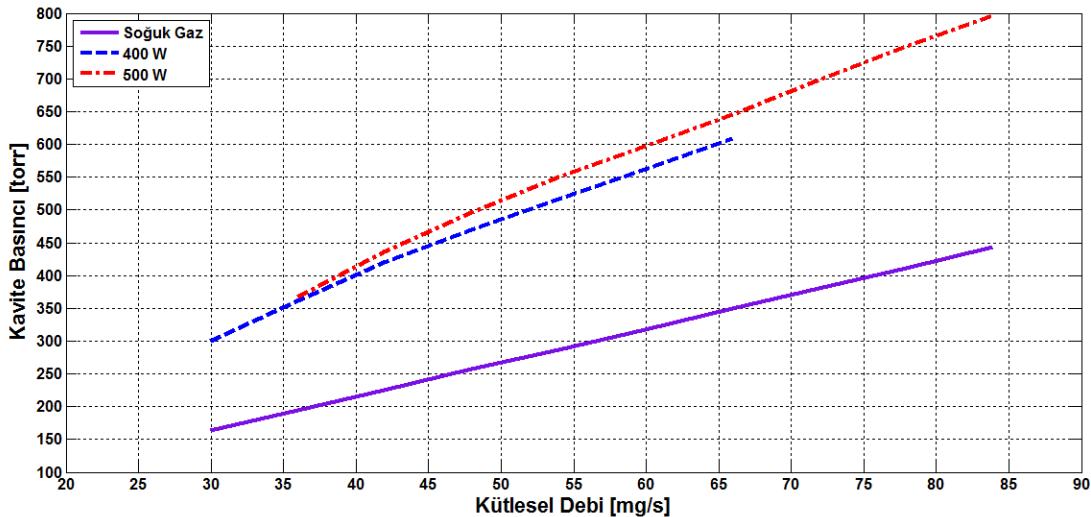
$$\dot{m} = A_t p k \sqrt{\frac{(2/k + 1)^{(k+1)/(k-1)}}{kRT}} \quad (3.1)$$

$$\frac{T_h}{T_c} = \left[\frac{p_h}{p_c} \right]^2 \frac{k_h [2/(k_h + 1)]^{(k_h+1)/(k_h-1)}}{k_c [2/(k_c + 1)]^{(k_c+1)/(k_c-1)}} \quad (3.2)$$

Bu denklemde A_t lüle boğazı kesit alanını, p_c soğuk gaz akışında kavite içi basıncı, T_c soğuk akış durumunda gaz sıcaklığını, p_h sıcak gaz akışı durumunda basıncı, T_h ise sıcak gaz akışında gaz sıcaklığını simgelemektedir. k_c ve k_h değerleri ise sırasıyla soğuk ve sıcak durumlar için özgül ıslar oranıdır. Denklem 3.2'deki özgül ıslar oranı değişimi monoatomik gazlar için ihmali edilebilir seviyede olduğu için Denklem 3.3'deki gibi bir sadeleştirme yapılmıştır.

$$\frac{T_h}{T_c} \cong \left[\frac{p_h}{p_c} \right]^2 \quad (3.3)$$

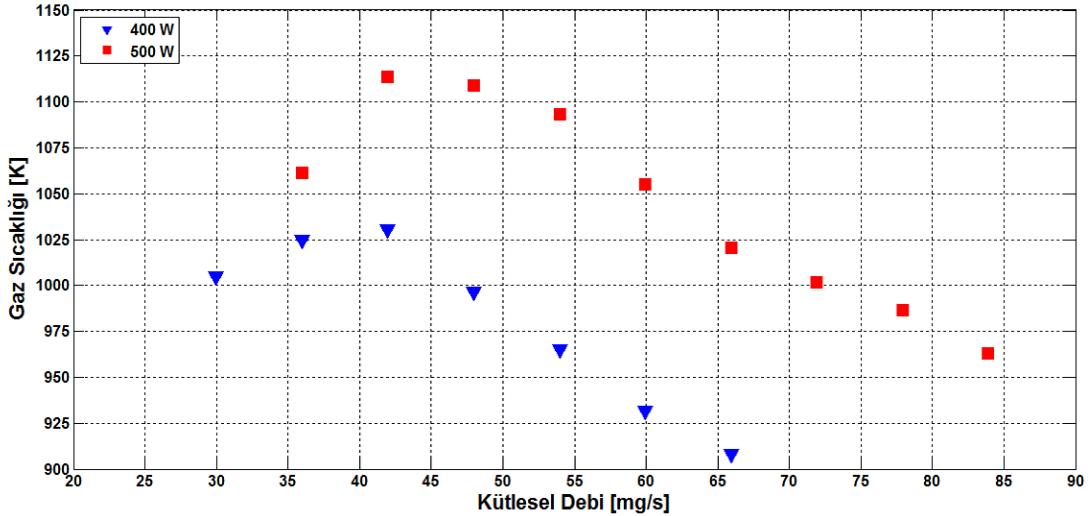
400 W mikrodalga gücü ile yapılan deneylerde plazma deşarjinin 66 mg/s ve 609 torr basınç seviyesine kadar devam ettiği gözlemlenmiştir. Kavite içi basınç Şekil 3.10'da görüldüğü gibi doğrusal bir değişim izlemiş ve soğuk gaz çalışma koşullarının yaklaşık iki katı değerlere ulaşmıştır. Mikrodalga gücü 500 W seviyesine çıkarıldığında ise plazma deşarı 84 mg/s ve 796 torr seviyesine kadar devam etmiştir. Basınç-Kütlesel Debi eğrisi Şekil 3.10'daki gibi yine doğrusal bir değişim izlemiştir. Aynı debi değeri için 500 W basınç değerlerinin 400 W için ölçülen değerlerin biraz üzerinde olduğu görülmüştür ve bu fark debi artışı ile birlikte artmaktadır. Ölçülen basınç değerleri %95 güven aralığında hesaplama yapıldığında en yüksek soğuk gaz basınç değerleri $\mp 4.37 \text{ torr}$, 400 W için $\mp 16.24 \text{ torr}$, 500 W için $\mp 18.18 \text{ torr}$ aralığında bir sapmayla ölçüm yapıldığı saptanmıştır. Bu durumda basınç ölçüm belirsizliği ortalama %3'tür.



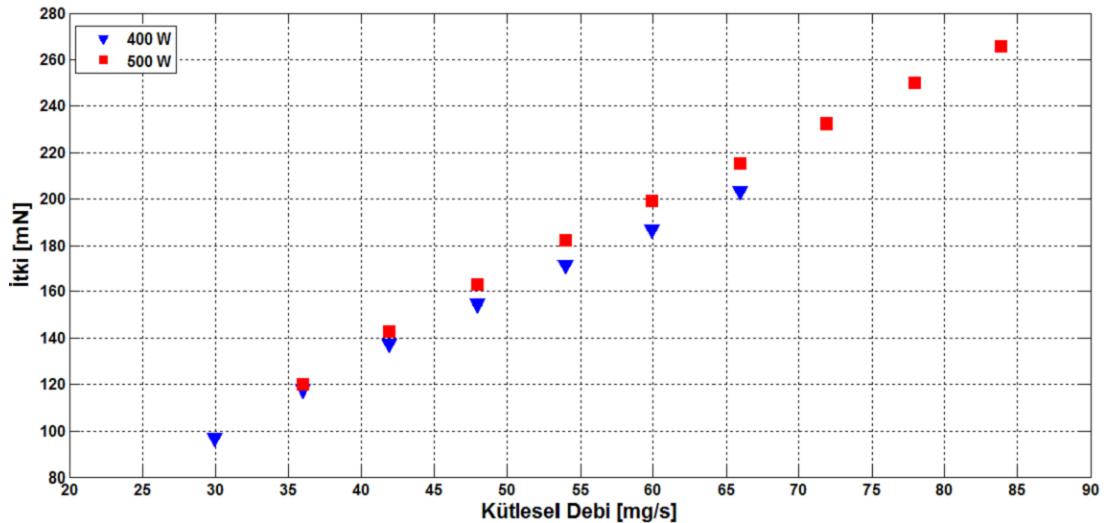
Şekil 3.10: Soğuk Gaz, 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile kavite basıncı değişim grafiği.

Kavite içerisinde lüle giriş sıcaklığı yukarıda bahsedildiği gibi Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerdeki belirsizlik %8'dir. Bu değer ortalama olarak $\mp 80\text{ K}$ sapmaya karşılık gelmektedir. Sıcaklığın her iki güç seviyesi için de önce belirli bir artış izlediği ve bir maksimum noktasından geçerek daha sonra ise azaldığı Şekil 3.11'deki gibi görülmüştür. Önceki araştırmalarda ilk baştaki sıcaklık artışının sebebi olarak basınç artışı ile birlikte plazma ve etrafından akan gazın termodinamik dengeye ulaşması olarak rapor edilmiştir [3]. Burada termodinamik dengeye ulaşmayı sağlayan olgunun plazma çevresindeki çarpışma sayısının artışı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca basınç artışı ile birlikte plazma hacmi küçülmekte ve lüleye yaklaşmaktadır. Lüleye yaklaşan plazma ve lüle arasından geçen gaz hacmi küçüldükçe gaz daha çok ısınmaktadır. Maksimum noktasından sonraki düşüşün sebebi olarak artan debi ile birlikte gazı ısıtmak için yeterli enerjinin verilememesi olduğu düşünülmektedir. Ayrıca plazmanın oluşan taşıma kuvvetinin etkisinden dolayı kararlılığını koruyamadığı ve eksenden kaydığını için etrafından geçen gazın yeterince ısınmadığı düşünülmektedir [3].

İtki seviyesi Denklem 1.2 kullanılarak hesaplanmıştır. İtki hesaplamasında debi metre ölçme hatası ve sıcaklık hesaplama hatası göz önünde bulundurulursa yaklaşık % 6 mertebede bir belirsizlik hesaplanmıştır. Sistemin hesaplanan itki seviyesine baktığımızda kütlesel debideki artış ile birlikte itki seviyesinin doğrusal bir artış değişimi izlediği Şekil 3.12'de görülmektedir. 400 W için en yüksek itki seviyesi 203 mN seviyesine ulaşırken 500 W için bu seviye 266 mN seviyesinde olduğu



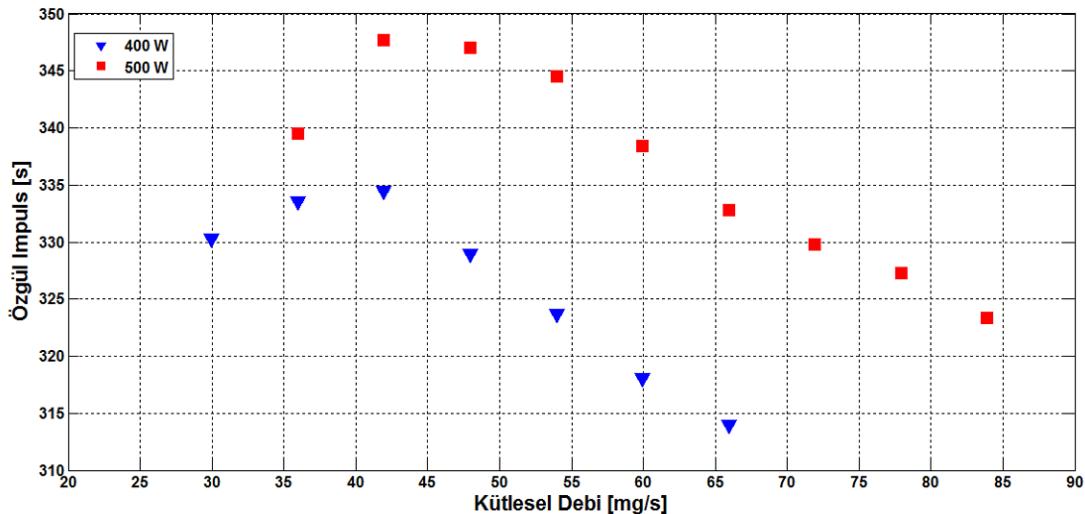
Şekil 3.11: 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile kavite içi sıcaklık değişim grafiği.



Şekil 3.12: 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile itki değişim grafiği.

görlülmektedir. Ayrıca aynı debi değeri için 500 W güçteki itki seviyesinin 400 W seviyesine göre daha yukarıda olduğu hesaplanmıştır. Bunun nedeni mikrodalga gücündeki artışla birlikte kavite içerisindeki basınç artışıdır [71].

Sistemin özgül impuls seviyesi Denklem 1.3'den yararlanılarak hesaplanmıştır. Özgül impuls değerinin kavite içerisindeki sıcaklık değerine benzer bir eğilim izlediği Şekil 3.13 görülmektedir. Özgül impuls değerleri için de belirsizlik yaklaşık %6 mertebesinde hesaplanmıştır. Ayrıca yüksek mikrodalga güç seviyelerinde özgül impuls değerinin de yüksek olduğu görülmektedir. 400 W için özgül impuls değeri en yüksek 334 s iken bu değer 500 W için 348 s değerine ulaşmıştır. Mikrodalga elektrotermal itki sistemi için sisteme verilen güçteki artışla birlikte özgül



Şekil 3.13: 400 W ve 500 W güç seviyeleri için kütlesel debi ile özgül impuls değişim grafiği.

impuls değerininde artacağı görülmektedir. Hesaplanan özgül impuls değerlerinin mevcut arkjet ve resistojet sistemlerle kıyaslandığında verilen güç seviyesine göre resistojetlerinkine yakın değerlerde olduğu görülmektedir [1].

Sistemin performansını ölçmek için kullanılacak bir diğer parametre de mikrodalga enerjisinin ne kadarının gaza iletildiğini gösteren bağlanma verimidir. Bağlanma verimi Denklem 3.4 gibi ifade edilebilir.

$$\eta_c = \frac{P_I - P_R}{P_I} \times 100 \quad (3.4)$$

Bu denklemde P_I gönderilen mikrodalga gücünü ve P_R ise geri yansyan miktarı simgelemektedir. Gönderilen ve yansyan güç Kısım 3.2'de belirtilen algılayıcılar ile ölçülmüştür. Çizelge 3.2 ve 3.3'te görüldüğü gibi sistem bağlanma verimi %97 – 98 mertebesindedir.

Çizelge 3.2: 400 W Mikrodalga güç seviyesinde performans parametreleri.

mfr [mg/s]	p_c [torr]	T_c [K]	u_{ext} [m/s]	τ [mN]	I_{sp} [s]	η_c [%]	η_τ [%]
30	300	1005	3240	97	330	98	31
36	361	1025	3272	118	334	98	38
42	420	1030	3281	138	334	98	45
48	470	997	3227	155	329	98	50
54	517	965	3176	171	324	97	54
60	562	932	3120	187	318	97	58
66	609	908	3080	203	314	98	63

Çizelge 3.3: 500 W Mikrodalga güç seviyesinde performans parametreleri.

mfr [mg/s]	p_c [torr]	T_c [K]	u_{ext} [m/s]	τ [mN]	I_{sp} [s]	η_c [%]	η_τ [%]
36	368	1062	3330	120	339	97	40
42	436	1114	3411	143	348	97	49
48	496	1109	3404	163	347	97	56
54	550	1093	3380	182	345	97	62
60	598	1055	3320	199	338	97	66
66	646	1020	3265	215	333	97	70
72	698	1002	3235	233	330	97	75
78	749	986	3210	250	327	97	80
84	796	963	3172	266	323	98	84

Plazma tarafından emilen bu gücün ne kadarının sistem tarafından kinetik enerjiye dönüştüğü ise itki verimine bakılarak anlaşılabılır [2]. İtki verimi Denklem 3.5'teki gibi ifade edilebilir.

$$\eta_\tau = \frac{\tau I_{sp} g_0}{2P_I} \quad (3.5)$$

Bu denklemde τ ve I_{sp} sırasıyla itki ve özgül impulsu ifade etmektedir. Belirli bir debi değerinden sonra Çizelge 3.2 ve 3.3'de olduğu gibi özgül impuls değeri düşerken itki seviyesi yükselmektedir. Bu durumda yüksek itki ve özgül impuls arasında bir trade-off yapmak gerekecektir. Şöyle ki; eğer görevde daha yüksek itki seviyesine ihtiyaç duyuluyorsa bu durumda birim itki için harcanan yakıt sarfiyatı da artacaktır. Burada bir diğer dikkat çekici husus kütlesel debi ve basınç artışı ile itki veriminin artmasıdır. Basınç artışı ile birlikte plazma küçülmekte ve lüle girişine yaklaşmaktadır. Bu durumda plazmadan duvarlara olan kayıplar azaldığı ve gaz ısınır ısınmaz atıldığı için verimin artığı düşünülmektedir [27].

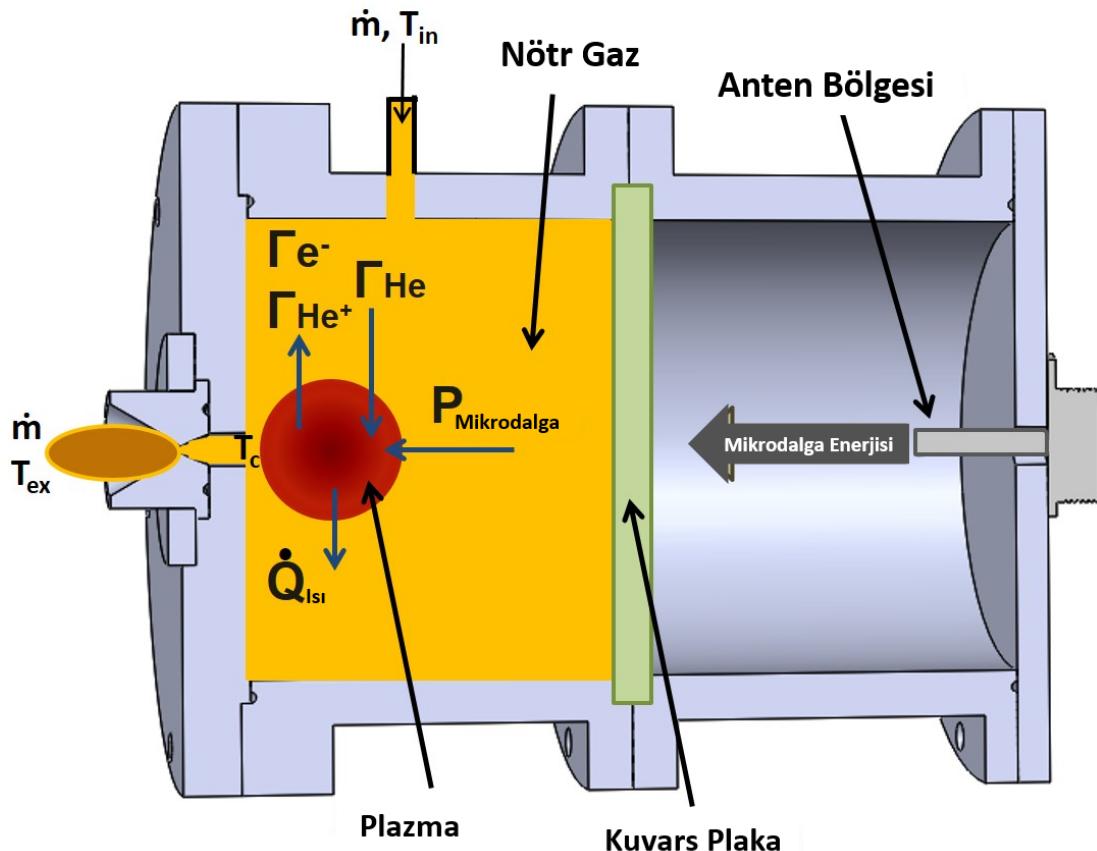
4. BOYUTSUZ ENERJİ TRANSFER MODELİ

Bu bölümde, 2.45 GHz mikrodalga frekansında çalışan bir MET sisteminin enerji transfer mekanizmalarını analiz etmek için geliştirilen boyutsuz modelden bahsedilecektir. Modelde elektromanyetik radyasyondan plazmaya, plazmadan etrafında akan gaza enerji iletim mekanizmaları tanımlanmış ve kavite içerisinde oluşan plazmanın özelliklerini hesaplamak için gerekli matematiksel formülasyon geliştirilmiştir. Elektron yoğunluğu, elektronların sıcaklığı, plazma içerisindeki ağır parçacıkların(nötr atom ve iyonlar) sıcaklıklarını ve plazma etrafından akan gaz sıcaklığı farklı debi değerleri için hesaplanmıştır. Plazma karakteristiklerine ilave olarak itki sisteminin özgül impuls ve itki seviyesi de hesaplanmıştır.

Global modelde sistem kararlı hale geldikten sonraki durum için enerji transfer mekanizmaları tanımlanmıştır. Plazmanın başlangıçtaki oluşum aşamaları sadece tarif edilmiş ancak hesaplamlarda göz önünde bulundurulmamıştır. Sistem denge haline geldikten sonra enerji transferinin daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi şu üç aşamada gerçekleştiği kabul edilmiştir: (i) mikrodalgadan plazmaya enerji geçisi elektronlar ile ağır parçacıklar arasındaki çarpışmalar aracılığı ile oluşmaktadır, (ii) plazma katı bir rezistans elemanı gibi davranışarak etrafından geçen gazı ısıtmaktadır, (iii) gazın termal enerjisi yakınsak-ıraksak bir lüleden geçerken kinetik enerjiye dönüşmektedir.

MET kavitesinin sadece plazmadan gaza enerji geçen bölümü modellenmiştir. Anten bölgesi modellenmemiştir. Plazma bölgesi plazma hacmi ve bu hacmin içerisinde bulunduğu gaz hacmi olmak üzere iki alt bölgeye ayrılmıştır. Plazma hacmi yüklü parçacıkların bulunduğu kısmı olarak da ifade edilebilir. Enerji iletim aşamalarının şematik gösterimi Şekil 4.1'te verilmiştir. Modelde plazmadan gaza ısı transferin iletim ve taşınım mekanizmalarıyla olduğu farz edilmiştir ancak ısnımla ısı transferi dikkate alınmamıştır. Plazma lüle girişine çok yakın bir yerde olduğu için ve ısnan gaz ısnır ısnırmaz kaviteden dışarı atıldığı için gazdan kavite duvarlarına olan ısı geçisi ihmal edilmiştir. Plazma içerisinde eşit miktarda pozitif ve negatif

yüklü parçacık olduğu varsayıldığından plazma yük bakımından nötr kabul edilmiştir. Plazma içerisindeki yüklü parçacıkların enerji seviyesi dağılımlarının Maxwellian dağılımına uygun olduğu varsayılmıştır. Yapılan deneylerde plazma hacminin su daması şeklinde olduğu gözlemlenmiş olmasına rağmen hesaplamalarda ve denklem çözümlerinde kolaylık sağlama amacıyla plazma hacminin küre biçiminde olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca küre biçimindeki plazma içerisinde özelliklerin sadece radyal yönde değiştiği kabul edilmiştir.



Şekil 4.1: Plazma modeli şeması

Günümüzde kadar yapılan deneylerde daha önceki bölgelerde de bahsedildiği gibi MET sistemlerinde oluşan plazma uygulanan mikrodalga gücüne bağlı olarak yüksek atmosferik basınçlara kadar dayanabilmektedir [72]. Atmosferik basınçta çalışan plazma sistemleri için çözüm yapılrken genelde plazmanın iki farklı akışından meydana geldiği şeklinde bir tanımlama yapıldığı görülmektedir [73, 74]. Bu yaklaşımı göre plazma birincisi elektronlardan ikincisi ise ağır parçacıklardan (iyonlar ve nötr atomlar) oluşan iki farklı akışından meydana gelmektedir. Bu yaklaşımın kullanıldığı sistemlerde ağır parçacıkların sıcaklıklarını elektron sıcaklıklarının çok altındadır. MET sistemleri için ağır parçacıkların sıcaklıklarını 2000-4000 K civarında

ölçülürken elektron sıcaklıklarını 10000 K'in üzerinde ölçülü müştür [18, 27] . Bu durumda lokal termodinamik denge kabulu ile çözüm yapmak ve Saha denklemi kullanarak çözüm yapmak pek doğru olmayacağından. Bu çalışmada ağır parçacıklar ve elektronların enerjilerini hesaplamak için iki farklı denklem seti kullanılmıştır.

Ağır parçacıklar ve elektronlar arasındaki momentum transferi kütleleriyle ters orantılıdır. Ağır olan iyon ve atomlar çarpışmalardan sonra elektronlar kadar hız kazanamazlar ve iki farklı parçacık arasında sıcaklık farkı meydana gelir [75]. Enerji seviyelerindeki bu farklılıktan dolayı, elektronlar ve ağır parçacıklar için ayrı denklem setlerinin çözülmesine ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla hesaplamaları yapılabilmesi için birden fazla denklem seti ve kontrol hacmi tanımlanmıştır [60, 76].

4.1 Elektromanyetik Dalga ve Plazma Etkileşimi

MET sistemlerinde gönderilen toplam elektromanyetik enerjinin ne kadarının gaza iletildiğini hesaplayabilmek için plazma ve elektromanyetik dalga arasındaki etkileşimi ve sonuçlarını doğru saptamak gereklidir. Oluşan plazmanın yoğunluğuna bağlı olarak emilen ve yansıyan dalga miktarı değişecektir. Maxwell denklemleri kullanılarak elektromanyetik dalga elektrik alan bileşeni Denklem 4.1'deki gibi ifade edilebilir [65] .

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \epsilon \left(1 - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right) \mathbf{E} = 0 \quad (4.1)$$

Denklemde ifade edildiği gibi elektromanyetik dalganın bir ortamda yayılımı ortamın dielektrik sabiti, iletkenliği ve manyetik geçirgenliği ile ilişkilidir ve bu parametrelerden etkilenmektedir. Gazlar iyonize olmadan önce bu parametrelerin etkisi çok düşüktür ve elektromanyetik dalga boşluktakine benzer şekilde yayılır. Ancak gazın iyonizasyonu ile birlikte ortamın bu karakteristikleri değişir. Gönderilen dalganın bir kısmı emilirken bir bölümü ise ortamın özelliklerine bağlı olarak geri yansıyacaktır.

Plazma ortamı ve elektromanyetik dalga etkileşimi ele alınırken plazmanın bir dielektrik malzeme gibi davranış gösterdiği kabulü yapılabılır [77, 78]. Eğer plazma frekansı $\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}}$ elektromanyetik dalga frekansından çok düşükse ($\omega_p \ll \omega$) dalganın plazma içerisindeki yayılımı serbest uzaydaki yayılımına benzer özellik

göstererecektir. Bunun anlamı çok yüksek frekanstaki dalgalara karşı plazmanın tamamen geçirgen bir ortam gibi davranacağıdır. Diğer taraftan eğer $\omega_p > \omega$ şartı sağlanıyorsa dalganın bir kısmı plazma yüzeyinden geri yansıyacaktır ve plazma içerisinde ilerleyen dalga yavaş sönümlenecektir [79, 80].

Bir elektromanyetik dalga iletken bir yüzeye çarptığında elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin genlikleri iletkenin içlerine doğru ilerledikçe üstel olarak azalır ve belirli bir mesafeden sonra dalga tamamen sönümlenir. Bunun nedeni Lentz kanununa göre dalga üzerindeki manyetik alan nedeniyle oluşan zıt polaritedeki akımdır [78]. Bu olay "Deri Etkisi" (Skin Effect) olarak adlandırılmaktadır. Elektromanyetik dalganın tamamen sönümlenmeden önce iletkenin içerisinde ilerlediği derinliğe "Deri Kalınlığı" (Skin Depth) denilmektedir. Bu kalınlık malzemenin iletkenliği arttıkça ve mikrodalga frekansı arttıkça daha da incelir. Plazma eğer bir iletken gibi düşünülürse mikrodalganın plazma içerisinde ne kadar ilerleyebileceği plazmanın elektron yoğunluğuna bağlı olacaktır. Bunun nedeni elektron yoğunluğu arttıkça plazmanın iletkenliğinin artmasıdır. Yoğunluk arttıkça deri kalınlığı giderek azalacaktır ve mikrodalga enerjisini büyük bir bölümü plazmanın en dış yüzeyine yakın yerde emilecektir [77].

Plazma parametreleri ve elektromanyetik dalga frekansı kullanılarak plazma iletkenliği Denklem 2.10 gibi ifade edilebilir [60]. İyonize olmadan önce gazın iletkenliği çok düşüktür fakat iyonizasyon başladiktan sonra Denklem 2.10'den anlaşılacağı gibi artan elektron sayısı ile birlikte ortamın iletkenliği artacaktır. İletkenliğin artması ile birlikte Denklem 4.1'deki imajiner kısım da artacaktır. Burada imajiner kısım dalganın yayıldığı ortam içerisinde giderek zayıflayacağını ifade etmektedir. Bu zayıflamanın kaynağı mikrodalganın plazma içerisinde ilerlerken aynı zamanda emilmesinden kaynaklanmaktadır. Plazma tarafından emilen güç Denklem 4.2'deki gibi ifade edilecektir. Burada P_I gönderilen gücü ve P_R ise yansıyan gücün ifade etmektedir [48, 63].

$$P_{abs} = P_I - P_R \quad (4.2)$$

Yansıyan güç ise Denklem 4.3'deki gibi ifade edilebilir.

$$P_R = |\Gamma|^2 P_I \quad (4.3)$$

Burada Γ yansımıma katsayısını ifade etmektedir ve Denklem 4.4 gibi ifade edilebilir. [80];

$$\Gamma = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_p}}{1 + \sqrt{\epsilon_p}} \quad (4.4)$$

burada ϵ_p plazmanın dielektrik sabitini ifade etmektedir.

4.2 Parçacık Denge Denklemi

Denge halinde toplam plazma hacminde iyonizasyon sonucu ortaya çıkan elektron sayısı plazmadan difüzyon ile kaybolan elektron sayısına eşittir. Bu durumda elektronlar için denge Denklem 4.5'deki gibi ifade edilebilir [68].

$$\nabla^2 n + \frac{v_{iz}}{D} n = 0 \quad (4.5)$$

burada D difüzyon katsayısını ifade etmektedir. Burada etkili difüzyonun mekanizmasının ambipolar difüzyon olduğu kabul edilmiştir. Difüzyon katsayısı için Denklem 4.6 kullanılmıştır.

$$D = D_i \left(1 + \frac{T_e}{T_h} \right) \quad (4.6)$$

bu denklemde D_i iyonlar için difüzyon katsayısını ifade etmektedir ve iyonların sıcaklıklarını ile plazma basıncının p_p bir ifadesidir. Denklemlerin çözüm yapılırken plazma basıncı kavite içi basınç ile aynı alınmıştır. D_i için Denklem 4.7 gibi bir ifade yazılabılır [81].

$$D_i = \frac{3k_b^2 T_h^2}{8p_p M \Omega(T_h)} \quad (4.7)$$

Bu denklemde $\Omega(T_h)$ iyon-atom çarpışma integralini ifade etmektedir [68, 78]. Denklem 4.5'de, v_{iz} iyonlaşma frekansıdır ve Denklem 4.8'deki gibi ifade edilir. Bu denklemde $\langle \sigma_{iz} u_e \rangle$ ile ifade edilen kısım iyonlaşma oranı katsayıdır ve [73, 81]'deki gibi hesaplanmıştır.

$$v_{iz} = N \langle \sigma_{iz} u_e \rangle \quad (4.8)$$

Denklem 4.5 küresel bir plazma hacmi için çözüldüğünde elektronların radyal dağılımı için Denklem 4.9'deki gibi ifade elde edilebilir [68]. Bu eşitliğin elde edilişi detaylı

olarak EK-B'de sunulmuştur.

$$n(r) = n_0 j_0 \left(\pi \frac{r}{R_p} \right) \quad (4.9)$$

n_0 plazmanın orta noktasındaki elektron yoğunluğunu, j_0 sıfırıncı dereceden birinci tür küresel Bessel fonksiyonunu ve R_p ise plazma yarıçapını ifade etmektedir. sıfırıncı dereceden birinci tür küresel Bessel fonksiyonu yerine uygun trigonometrik ifadeler kullanılarak Denklem 4.10'ile ifade edilebilir.

$$n(r) = \frac{n_0 R_p}{\pi r} \sin \left(\pi \frac{r}{R_p} \right) \quad (4.10)$$

Plazma hacmi duvarlarından difüzyon yoluyla dış ortama giden parçacık yoğunluğu $r = R_p$, olduğu noktada Denklem 4.11 gibi ifade edilebilir.

$$\Gamma_r = -D \frac{\partial n}{\partial r} = \frac{-D n_0 R_p}{\pi} \left[\frac{\pi}{R_p r} \cos \left(\pi \frac{r}{R_p} \right) - \frac{1}{r^2} \sin \left(\pi \frac{r}{R_p} \right) \right] \quad (4.11)$$

Toplam dışarıya giden parçacık yoğunluğunu bulmak için Denklem 4.11 plazma sınırları kullanılarak integre edildiğinde Denklem 4.12 ifadesi elde edilecektir.

$$\Gamma_T = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \Gamma_r(R_p) R_p^2 \sin(\theta) d\theta d\phi = 4 n_0 \pi D R_p \quad (4.12)$$

Diğer taraftan elektron sayısı radyal olarak değiştiği için denklemlerde kolaylık olması açısından tek bir ifade almak istersek hacimsel ortalamayı kullanmak uygun olacaktır. Hacimsel ortalamayı bulmak için yukarıda verilen $n(r)$ ifadesinin önce hacim integrali alınır ve toplam plazma hacmine (\forall_p) bölünürse Denklem 4.13'deki ifade bulunacaktır.

$$n_e = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^{R_p} n(r) r^2 \sin(\theta) dr d\theta d\phi}{\forall_p} = \frac{3 n_0}{\pi^2}$$

Yukarıda belirtildiği gibi eğer iyonizasyon sonucu ortaya çıkan parçacıkların sayısı difüzyonla kaybolanlara eşitlenirse parçacık denge denklemi 4.13'daki gibi elde edilir. Elektronların sayıları ve iyonların sayıları eşit olarak alındığından aynı denklemleri iyonlar için tekrar yazmaya gerek kalmayacaktır.

$$\forall_p n_e v_{iz} = \Gamma_T \quad (4.13)$$

Nötr atom sayıları ise ideal gaz yasası kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir;

$$N = \frac{p_p}{k_b T_h} - n_e \left(1 + \frac{T_e}{T_h} \right) \quad (4.14)$$

4.3 Elektronlar İçin Enerji Denge Denklemleri

Elektronlar elektromanyetik dalganın elektrik alanı nedeniyle kazandıkları enerjiyi çarpışmalar sayesinde iyon ve nötr atomlara aktarırlar. Günümüze kadar yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar plazma deşarjı başladıkten sonra elektromanyetik enerjinin yaklaşık %90’ını emilmektedir. Elektronlar tarafından bu enerji elastik ve elastik olmayan çarpışmalarda aktarılmaktadır [3, 24, 41]. Atmosferik basınçta çalışan sistemlerde elastik çarpışmalar kazanılan bu enerjinin harcadığı ana mekanizmadır. Elastik çarpışmalarda elektronlar iyon ve nötr atomlara enerjilerinin bir kısmını aktarırlar ancak bu tür çarpışmalarda onların elektronik yapılarında herhangi bir değişime neden olmazlar. Fakat elastik olmayan çarpışmalarda çarpışıkları parçacığın elektronik yapısını değiştirirler. Örneğin; nötr bir atomun iyonize olmasına ya da nötr bir atomun uyarılmasına neden olabilirler. Geliştirilen modelde elektronlar tarafından kazanılan enerjinin bu iki olayda harcadığı kabulü yapılmıştır. Elektromanyetik enerjinin kavite duvarlarına olan kayıpları ise kavite duvarları mükemmel iletken kabul edildiği için ihmal edilmiştir. Elektronlar tarafından elastik çarpışmalarda kullanılan güç miktarı Denklem 4.15’deki gibi ifade edilebilmektedir. Denklemde $\delta = 2m_e/M$ ile ifade edilen terim enerji transfer oranıdır ve bu terim çarpışmadan sonra elektronlar ve ağır parçacıklar tarafından enerjinin kütleleri oranında paylaşıldığını göstermektedir.

$$P_{elastic} = \forall_p n_e (n_i \langle \sigma_{ei} u_e \rangle + N \langle \sigma_{ea} u_e \rangle) \delta \frac{3}{2} k_b (T_e - T_h) \quad (4.15)$$

$\langle \sigma_{ei} u_e \rangle$ ile ifade edilen terim ise elektron-iyon momentum değişim sabitidir ve Maxwellian enerji dağılım fonksiyonuna kabulü ile bu ifade Denklem 4.16’deki gibi ifade edilebilir [81].

$$\langle \sigma_{ei} u_e \rangle = 2.91 \times 10^{-12} \frac{\ln \Lambda}{T_{eV}^{1.5}} [m^3 s^{-1}] \quad (4.16)$$

$\ln \Lambda$ ise Coulomb logaritmasıdır ve

$$\ln \Lambda \simeq \ln \left(1.55 \times 10^{13} \sqrt{\frac{T_{eV}^3}{n_e}} \right) \quad (4.17)$$

şeklinde ifade edilmektedir. $\langle \sigma_{ea} u_e \rangle$ ile ifade edilen terim ise elektron-atom momentum değişim oranıdır ve Maxwellian elektron enerji dağılım fonksiyonuna göre

Denklem 4.18'deki gibi ifade edilebilir [81].

$$\langle \sigma_{ea} v_e \rangle = (0.084 + 0.537 T_{eV} + 1.192 T_{eV}^2) \times 10^{-14} [m^3 s^{-1}] \quad (4.18)$$

Daha önceki ifade edildiği gibi plazma deşarjının sürdürülmesi için elastik olmayan çarpışmalar sonucu ortaya çıkan serbest elektron sayısının korunması gereklidir. Elastik olmayan çarpışmalarda harcanan güç miktarı Denklem 4.19'deki gibi ifade edilmektedir. U_{iz} , U_{exc} ve $v_{exc} = N \langle \sigma_{exc} u_e \rangle$ sırasıyla iyonizasyon enerjisi, uyarım enerjisi ve uyarım çarpışma frekansını ifade etmektedir.

$$P_{inelastic} = V_p (n_e v_{exc} U_{exc} + n_e v_{iz} U_{iz}) \quad (4.19)$$

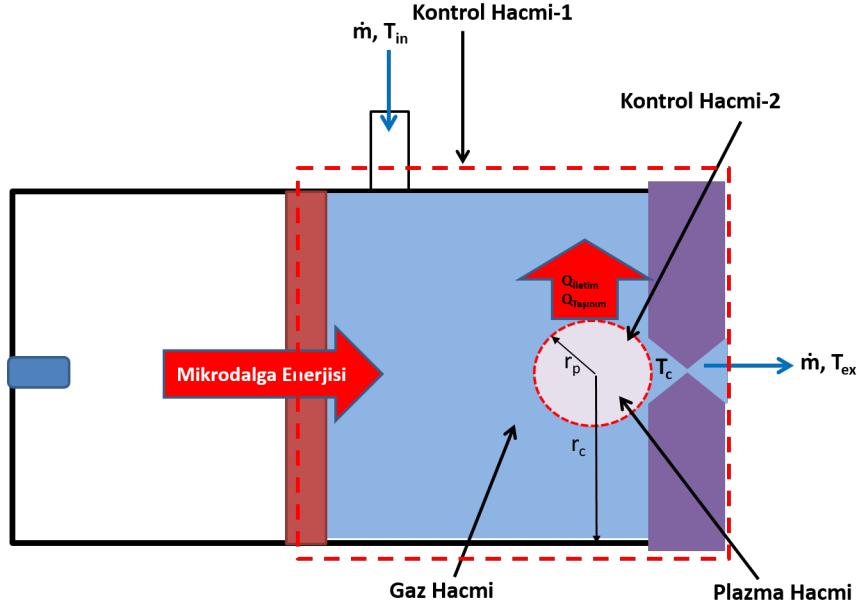
Denklem 4.19'de parantez içerisindeki ilk terim atomların uyarılması ikinci terim ise iyonizasyon için gerekli gücü göstermektedir. Denge durumunda elastik olmayan çarpışmalarda harcanan enerji rekombinasyon ile tekrar gaza kazandırıldığı için absorbe edilen gücün (P_{abs}) sadece elastik çarpışmalarda harcandığı kabulü yapılmıştır. Sonuç olarak bu kabul doğrultusunda güç dengesi Denklem 4.20'deki gibi ifade edilmiştir.

$$P_{abs} = P_{elastic} \quad (4.20)$$

4.4 Ağır Parçacıklar ve Plazma Etrafında Akan Gaz İçin Enerji Dengesi Denklemleri

Bu kısımda serbest yüzey plazmadan etrafında akan yakıt gazına enerji aktarımı sırasında mekanizmalar tanımlanacak ve hesaplamalar için kullanılacak olan denklemler çıkarılacaktır. Burada enerji transfer mekanizmalarını tarif etmek için Şekil 4.2'de gösterildiği gibi iki farklı kontrol hacmi kullanılmıştır. Birinci kontrol hacmi MET sisteminin plazma oluşan bölümünün dışından geçerek lüle dahil tamamını kapsamaktadır. Bu kontrol hacmi plazma etrafında akan gazın sıcaklığını hesaplamak için kullanılacaktır. İkinci kontrol hacmi ise plazma hacmini içermektedir. Bu kontrol hacmi ise plazmadan gaza aktarılan enerjiyi hesaplamak için kullanılacaktır.

İlk olarak gaz sıcaklığını hesaplamak için Denklem 4.21 kullanılacaktır. Eşitlikte T_i ve T_{ex} sırasıyla kavite içerisine gaz giriş ve lüleden çıkış sıcaklıklarını simgelemektedir.



Şekil 4.2: Ağır parçacıklar ve plazma etrafında akan gaz için enerji modeli şeması.

u_{ex} ise gazın lüleden çıkış hızıdır ve Denklem 4.22 kullanılarak hesaplanmıştır. C_p gaz özgül ısısı olup monatomik gazlar için $C_p = \frac{5}{2} \frac{k_b}{M}$ eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır. Modelde plazmadan gaza iletilen toplam gücün tamamının gazın kinetik enerjisini artırmak için kullanıldığı varsayılmış ve duvarlara olan ısı kayıpları tamamen ihmal edilmiştir.

$$P_T = \dot{m} \left(C_p T_{ex} + \frac{u_{ext}^2}{2} - C_p T_i \right) \quad (4.21)$$

$$u_{ex} = \sqrt{\frac{2kRT_g}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (4.22)$$

Diğer taraftan plazmadan etrafında akan gaza enerji transferi iletim ve taşınım mekanizmalarıyla gerçekleşmektedir. İletim mekanizması tanımlanırken plazma durgun bir akışkan hacmi içerisinde bir katı küre şeklinde cisim olarak kabul edilmiştir. Durağan bir sıvı hacmi içerisindeki katı cisimde ıslık transferi Denklem 4.23'deki gibi ifade edilebilir [82]. Denklemde C parametresi şekil faktörü olarak tanımlanmaktadır ve küre biçimindeki bir katı cisim için $4\pi r$ olarak tanımlanmıştır [74, 79].

$$P_{Cond} = C \lambda_g (T_h - T_g) \quad (4.23)$$

λ_g ıletim katsayısı olup [83]'deki deneySEL verilerden yararlanılarak eğri uydurma yöntemiyle hesaplanmıştır. T_h plazma içerisindeki ağır parçacıkların sıcaklığıdır ve

katı kürenin sıcaklığının bu sıcaklığa eşit olduğu kabul edilmiştir. T_g ise yakıt gazının sıcaklığını simgelemektedir. Diğer ısı transfer mekanizması olan taşınım ise yine katı bir kürenin etrafından akan akışkan ile etkileşimi şeklinde modellenmiştir. Bu durumda taşınım Denklem 4.24 ile ifade edilebilir. Bu eşitlikte h taşınım katsayısıdır ve [84]'deki gibi hesaplanmıştır. A ise kürenin dış yüzey alanıdır.

$$P_{Conv} = hA(T_h - T_g) \quad (4.24)$$

Bu durumda enerji dengesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$P_{abs} = P_{Cond} + P_{Conv} \quad (4.25)$$

4.5 Roket Denklemleri

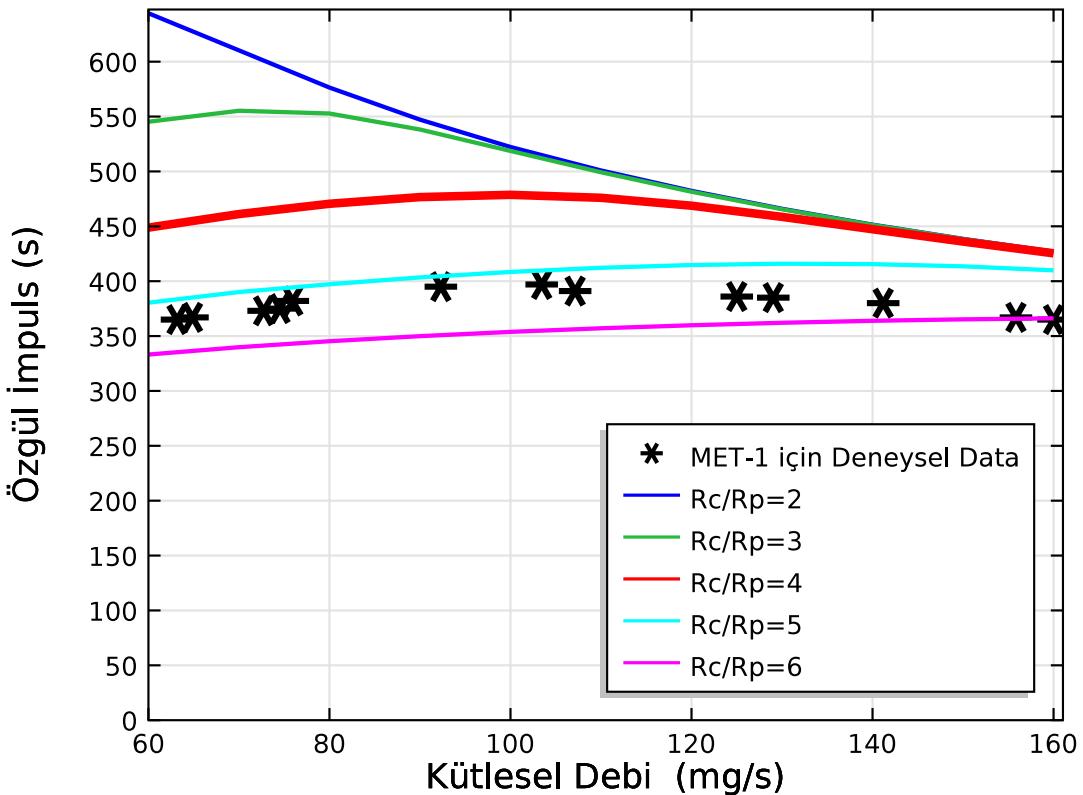
MET itki sisteminde ısınan gazı atarak itki üretmek için yakınsak-ıraksak bir lüle kullanılmaktadır. Dolayısı ile roket denklemleri itki sistemi performans parametrelerini hesaplamak için kullanılabilicektir. Modelde MET sisteminin ideal genişlemeli bir lüleye sahip olduğu varsayılmış ve itki denklemindeki basınç farkından dolayı gelen itki terimi ihmal edilmiştir. Bu durumda itki denklemi Denklem 4.26'deki gibi ifade edilebilir.

$$\tau = \dot{m}u_{ext} \quad (4.26)$$

Diger bir önemli parametre olan özgül impuls için Denklem 1.3 kullanılmıştır.

4.6 Analiz Sonuçları

MET itki sistemi performans parametreleri ve plazma özellikleri modelde $60\text{-}165\ mg/s$ aralığında farklı akış debileri ve $1200\ W$ güç seviyesi için hesaplanmıştır. Benzetim sonuçlarının deneysel verilerle karşılaştırılması için Diamant vd. tarafından Pennstate MET prototipi için ölçülmüş olan verilerden yararlanılmıştır [27]. Bu prototipin ve BUSTLab MET sisteminin konfigürasyonu Çizelge 4.1'de verilmiştir. Deneyde kullanılan prototip bundan sonraki bölümlerde MET-1 olarak isimlendirilecektir. İki prototip için verilen bu boyutlar benzetim yapılması esnasında plazma hacmi, gaz hacmi, Reynold sayısı gibi büyüklüklerin hesaplanması kullanılmıştır. Bahsedilen çalışmada yapılan deneylerde itki doğrudan bir itki sehpası vasıtasyyla ölçülmüştür ve itki verisinden yararlanılarak özgül impuls hesaplanmıştır. Modelde bu iki veri ile elde



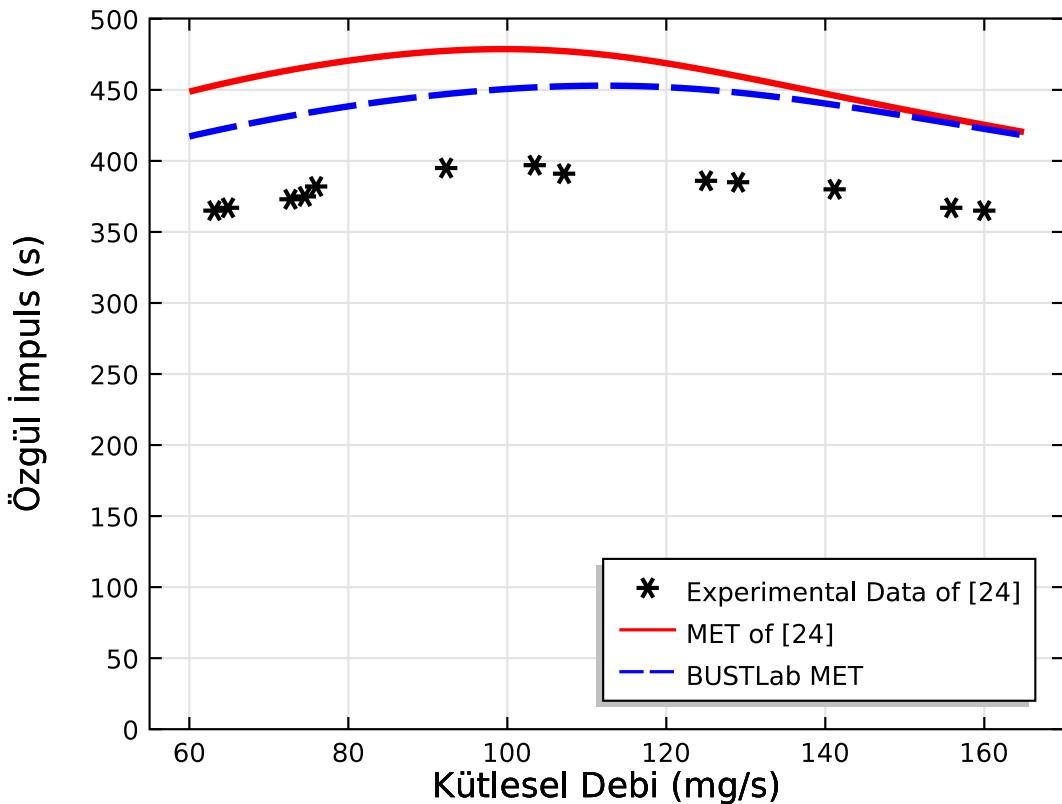
Şekil 4.3: Farklı R_c/R_p değerleri için kütlesel debi ile özgül impuls değişimi grafiği.

edilen değerler karşılaştırıldıktan sonra parametreler BUSTLab MET itki sistemi için tekrar hesaplanmıştır. Modelde parçacık denge denklemi, elektron enerji denklemi, ağır parçacıklar ve plazma etrafında akan gaz için enerji dengesi denklemi ve roket denklemeleri COMSOL Multiphysics 0-D modülü kullanılarak çözülmüştür [85].

Çizelge 4.1: Modellenen MET Konfigürasyonları

	Çalışma Frekansı [GHz]	Kavite Yarıçapı [mm]	Kavite Uzunluğu [mm]	Boğaz Yarıçapı [mm]
MET-1 [27]	2.45	50.8	157.8	0.651
BUSTLab MET	2.45	50	175	0.7

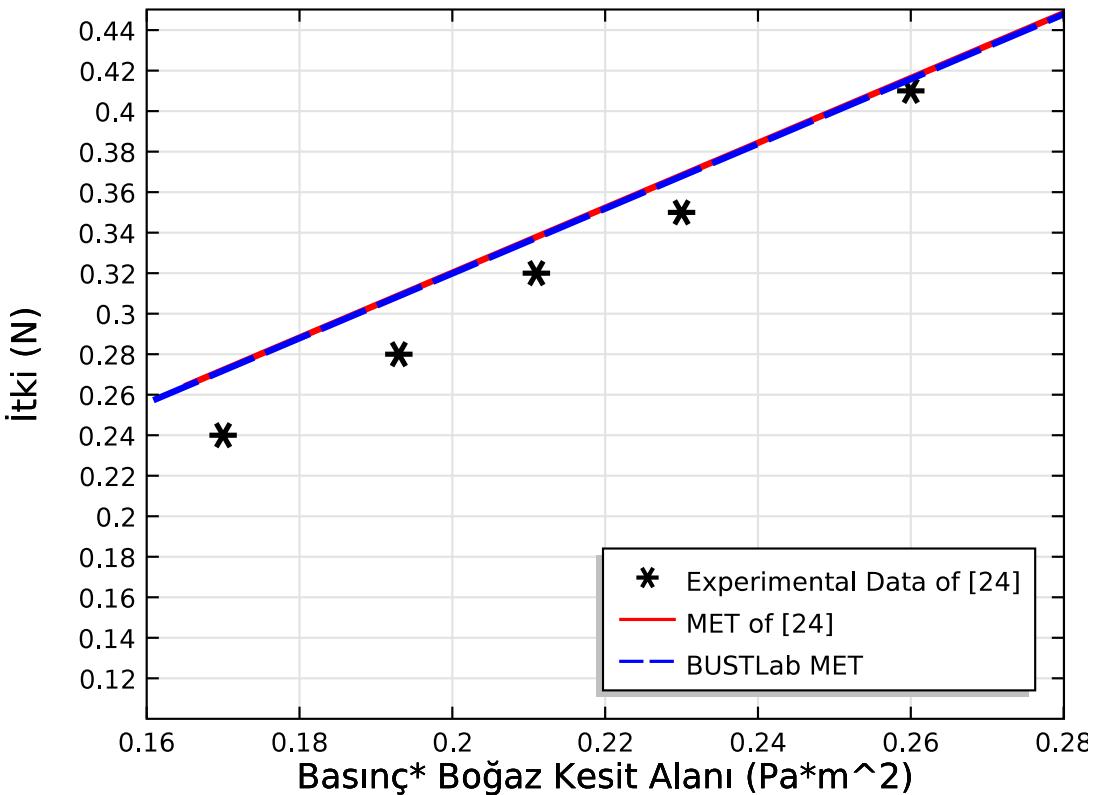
Hesaplamalar esnasında kullanılacak olan optimum plazma yarıçapının R_p tespit edilmesi için farklı kavite yarıçapının plazma yarıçapına oranları (R_c/R_p) için özgül impuls değerleri hesaplanmış ve deneysel data ile karşılaştırılmıştır. Grafik 4.3 görüldüğü gibi deneysel datalarla en yakın eğilim R_c/R_p oranı 4 olduğunda gerçekleşmektedir.



Şekil 4.4: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile özgül impuls değişimi.

Her ne kadar benzetim ile hesaplanan I_{sp} değerleri deneySEL verilerin biraz üzerinde olsa da verilerin eğilimleri Şekil 4.4'te olduğu gibi benzerlik göstermektedir. Hesaplanan I_{sp} değerlerinin yüksek olmasının bir sebebinin kavite duvarlarına olan ısı transfer kayıplarının gaz enerji denklemine dahil edilmemesinden dolayı yüksek olarak hesaplanan gaz sıcaklık değerleri olduğu düşünülmektedir. Değerlerdeki bu sapmanın diğer bir sebebinin de iletim ve taşınım mekanizmaları tanımlanırken plazmanın katı bir cisim olarak kabul edilmesi olduğu değerlendirilmektedir. Grafik 4.4'te görüldüğü gibi MET-1 için en yüksek özgül impuls 100 mg/s akış debisinde 470 s olarak hesaplanmıştır. Aynı kütlesel debi için bu değer model sonuçlarında 400 s olarak tespit edilmiştir. BUSTLab MET için ise bu değer yine 100 mg/s debi değerinde 450 s olarak hesaplanmıştır. İtki için olan benzetim sonuçlarına bakıldığımda Şekil 4.5'te görüldüğü gibi hesaplanan sonuçların deneySEL değerlerle iyi bir uyum içinde olduğu düşünülmektedir. Hesaplanan değerler Diamant vd. belirtilen % 5'lik ölçüm belirsizliği içerisinde kalmaktadır [27].

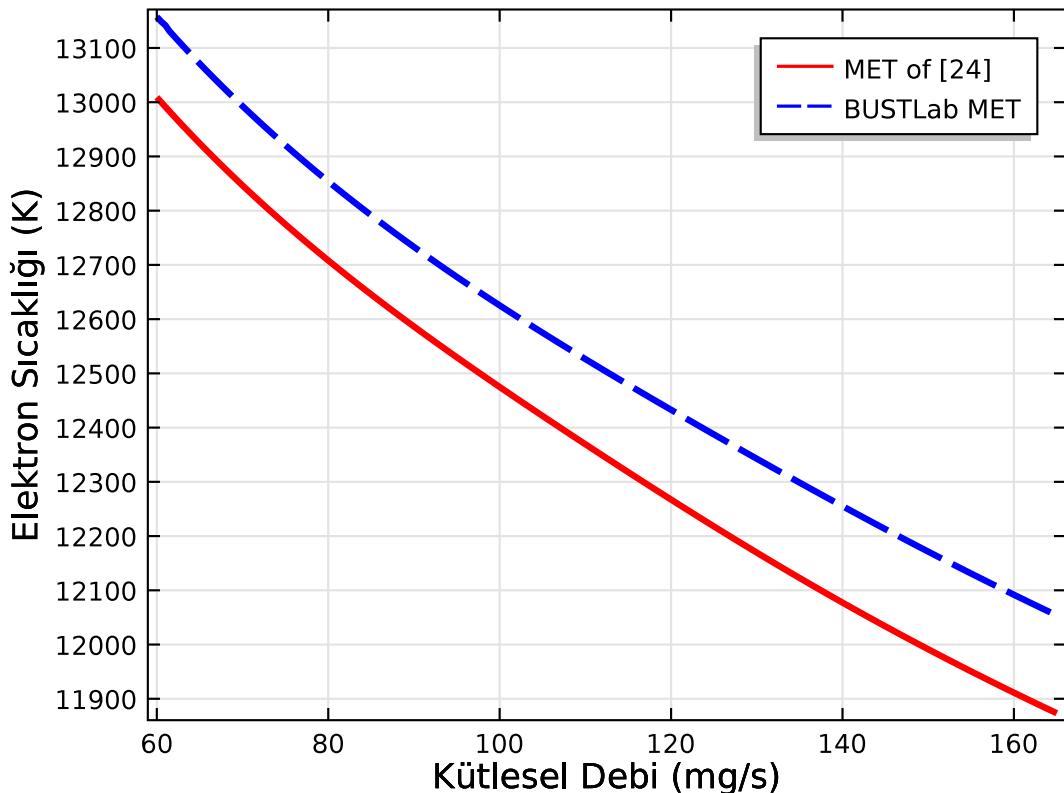
Bugüne kadar MET sistemlerinde plazma içerisindeki elektronların ve diğer parçacıkların (iyon ve nötr atomların) sıcaklıklarını ölçülürken spektrometrik teknikler



Şekil 4.5: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile itki değişimi.

kullanılmıştır ve bu ölçümelerde plazma içerisindeki türlerin termodinamik dengede olduğu varsayılmıştır [24, 25, 27, 42]. Kaynak [25]'de spektrometrik analiz yöntemiyle 2.45 GHz mikrodalga frekansında $750\text{-}2150\text{ W}$ güç aralığında çalışan MET sistemi için Helyum plazma için ortalama elektron sıcaklıklarının $12000\text{-}12800\text{ K}$ aralığında ölçüldüğü rapor edilmiştir [86]. Bununla beraber bahsedilen çalışmada ölçümlerde plazmanın içerisinde radyal sıcaklık dağılımin az olduğu, merkezde 12000 K sıcaklık varken en dışta 11000 K civarında sıcaklıkların ölçüldüğü bildirilmiştir. Mevcut modelde ise 1200 W güç seviyesi için farklı akış debilerinde $11900\text{-}13000\text{ K}$ arası elektron sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Grafik 4.6'de görüldüğü gibi elektron sıcaklıklarının kütlesel debideki artışla birlikte düştüğü görülmektedir. Ayrıca BUSTLab MET için hesaplanan değerlerin MET-1'e göre hesaplanan değerlerin biraz üzerinde olduğu görülmektedir.

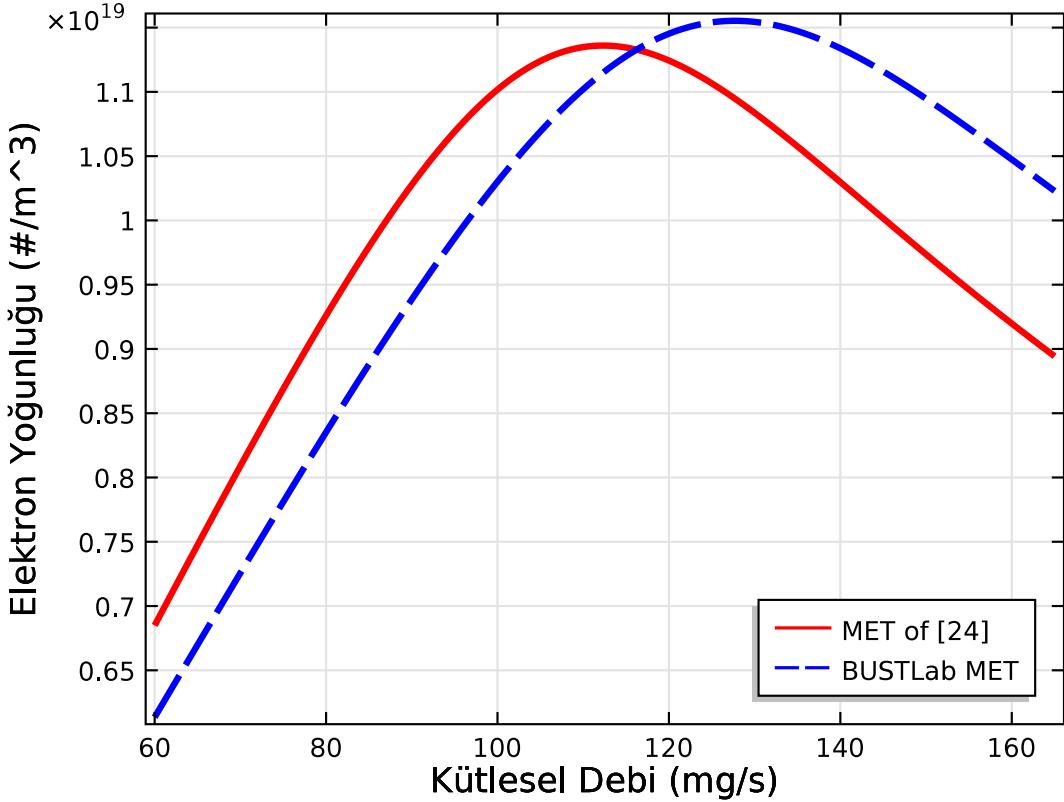
MET sistemleri ile ilgili literatürde elektron yoğunluğu genelde spektrometrik yöntemle elde edilen elektron sıcaklık değerlerinin Saha denkleminde kullanılmasıyla hesaplanmaktadır. Bu elektron yoğunlukları $10^{19}\text{-}10^{20}\text{ #}/\text{m}^3$ arası değiştiği görülmektedir. Bu modelde ise Şekil 4.7'de görüldüğü gibi ortalama elektron



Şekil 4.6: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile elektron sıcaklığı değişimi.

yoğunluğu $10^{19} \text{ } \#/m^3$ mertebesinde hesaplanmıştır. Ayrıca artan debi ile birlikte elektron yoğunluğunun önce arttığı fakat sonra tekrar azaldığı görülmüştür. En yüksek degere ulaşmadan önceki bu artışın sebebi bu noktaya kadar artan basınç nedeniyle çarpışma sayısındaki artıştır. En üst seviyeden sonra ise düşme nedeninin çok fazla artan çarpışma frekansından dolayı elektronların iki çarpışma aralığında yeterince enerji kazanamaması ve artık nötr atomlarla çarpışıklarında daha az oranda iyonizasyona sebep olabilmeleridir.

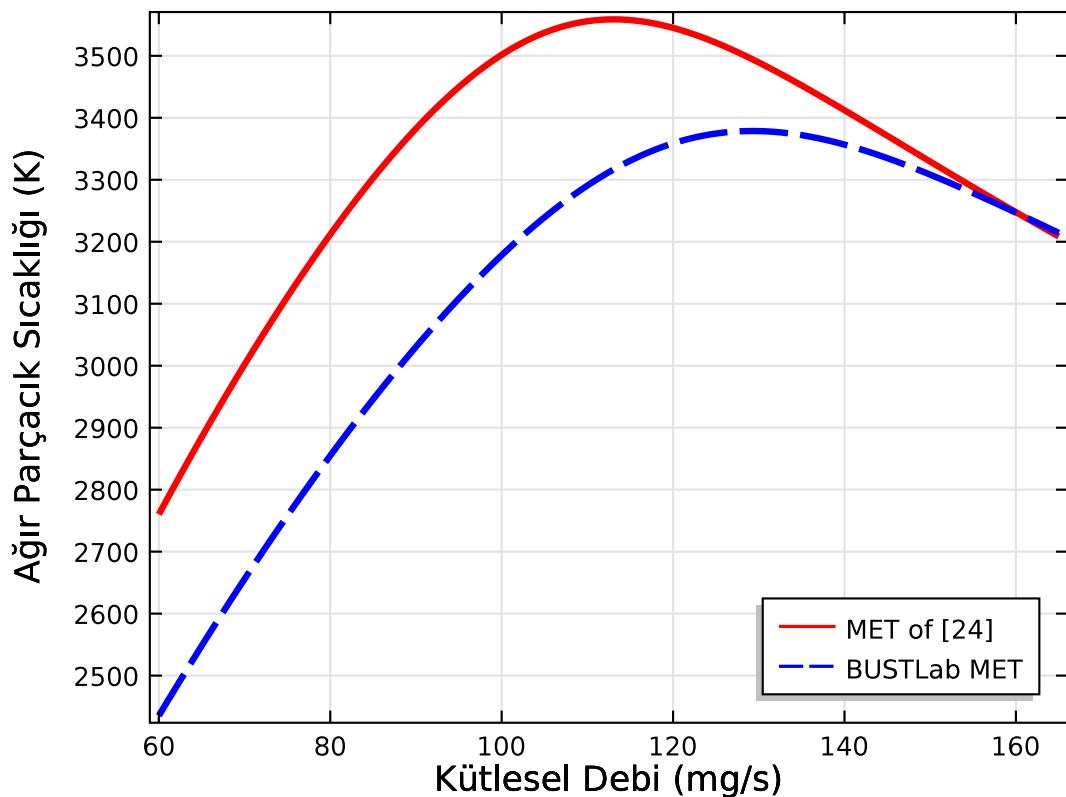
Ağır parçacıkların (iyonlar ve nötr atomlar) sıcaklıklarının elektron sıcaklıklarından farklı bir trend izlediği Şekil 4.8'de görülmektedir. Elektronların sıcaklıkları artan kütlesel debi ile birlikte düşerken ağır parçacıkların sıcaklıkları önce bir maksimum noktasına kadar yükselmekte ve daha sonra düşmektedir. Düşük debilerde artan basınç ile birlikte çarpışma sayısı arttığı için daha sıcak olan elektronlar ağır parçacıklara daha fazla enerji aktarmaktadırlar ve belirli bir değere kadar çarpışma frekansındaki bu artış sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Ancak toplam aktarılan güç sabit kaldığından en tepe noktadan sonra debi dolayısıyla basınç ve çarpışma frekansı artışı elektronların yeterince enerji kazanamamasına neden olmakta ve daha soğuk olan



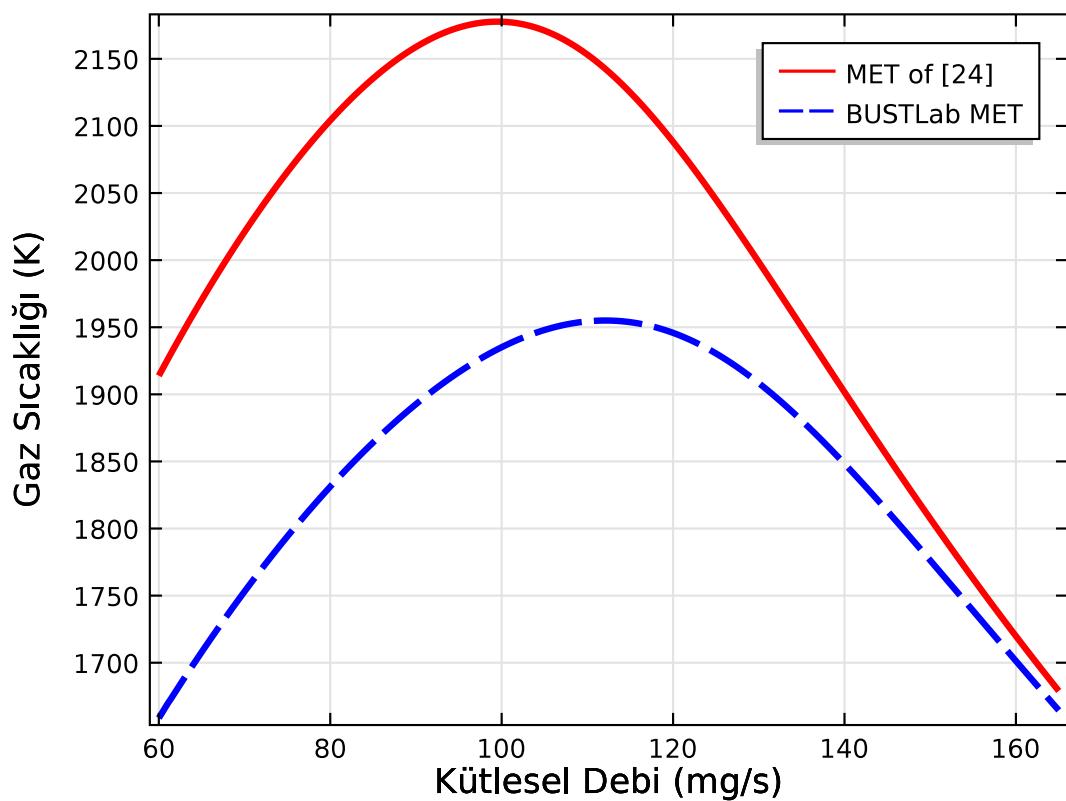
Şekil 4.7: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile elektron yoğunluğu değişimi.

elektronlar ağır parçacıklara daha az enerji aktarabilmektedirler. Elektronlar ve ağır parçacıklar için hesaplanan değerlere bakıldığındaysa aradaki sıcaklık farkının yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda modele göre plazmanın aslında termodinamik denge şartını sağlamadığı çıkarımı yapılabilir.

Konvansiyonel lüle kullanan bir itki sisteminde yakıt gazının lüleye giriş sıcaklığı itki ve özgül impulsu doğrudan etkileyen bir parametredir. Lüleye giriş sıcaklığı ne kadar yüksek ise özgül impuls değeri de o kadar yüksek olacaktır. Modelde gaz sıcaklıklarını Şekil 4.9'de görüldüğü gibi 1700 K ile 2150 K aralığında hesaplanmıştır. Bu değerler bir resistojet sisteminde ulaşılabilen değerlerin üzerinde değerlerdir. BUSTLab MET sistemi için ölçülen değerler biraz düşük olsa da iki MET konfigürasyonunun da aynı trendleri izlediği görülmektedir.



Şekil 4.8: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile ağır parçacıkların sıcaklıkları değişimi.



Şekil 4.9: MET-1 ve BUSTLab MET için kütlesel debi ile gaz sıcaklıkları değişimi.

5. SONUÇ

Mikrodalga elektrotermal itki sistemi, resistojet ve arkjet itki sistemlerinin ısıtma elemanı ve elektrot korozyonu problemlerini ortadan kaldıracak, daha uzun ömürlü ve daha yüksek gaz sıcaklıklarına ulaşılabilen alternatif bir sistem olarak ortaya sürülmüştür. MET sisteminde gazı ısıtmak için bir rezonans kavite içerisinde mikrodalga enerjisi kullanılarak oluşturulan serbest yüzey plazma görev yapmaktadır. Gaz oluşan plazma etrafından geçerken ısınır ve sıcak gaz yakınsak-ıraksak bir lüleden atılırken itki elde edilmektedir. Bir mikrodalga rezonans kavitesinin uzay itki sisteminin parçası olarak kullanılması fikri 1980'li yıllarda ortaya atılmasına rağmen MET sistemi halen hiç bir uzay platformu üzerinde kullanılmamıştır. Çalışmalar laboratuvar ortamında üretilen prototipler üzerinde yapılan testler ve modelleme çalışmaları şeklinde devam etmektedir [39].

MET benzeri elektrotermal sistemlerde sistem verimini artırmak için ısı transferi kayıplarını azaltmak önemlidir. MET sisteminde ısı transferi kayıplarına neden olabilecek mekanizma sistem duvarlarından dış ortama olan kayıplardır. Bu kayıpların azaltılması için sıcak gaz ve kavite duvarlarının etkileşim süresinin mümkün olduğunda kısaltılması gerekmektedir. Uygun bir kavite tasarımlı ile ısı transfer kayıplarını azaltmak mümkündür. MET tasarımda gazın ısınır ısınmaz lüleye girmesi hedeflenmelidir. Bu ancak plazmanın lüleye yakın bir yerde oluşmasıyla sağlanabilir. Plazmanın istenilen yerde oluşması için kavite içerisindeki elektrik alan yoğunluğunun dağılımı önemlidir çünkü kavite içerisinde basınç arttığında plazma elektrik alan yoğunluğunun en fazla olduğu noktada devam edecektir. Silindirik geometriye sahip bir kavitede en uygun elektrik alan dağılımı TM_{011} modunda gerçekleşmektedir. Bu modda çalışan bir kavite içerisinde elektrik alan şiddeti kavitenin iki uç duvarı yanında en yüksek değerine ulaşmaktadır.

Tez kapsamında üretilen MET sistemi prototipi COMSOL Multiphysics programı ile modellenmiştir. Kavite içerisinde en yüksek elektrik alan yoğunluğunun yukarıda belirtildiği gibi kavite iki uç duvarı yanında olduğu görülmüştür. Bir diğer

analiz de kavite içerisinde bulunan kuvars ayırma plakası ve antenin elektrik alan dağılımına etkisini anlamak için yapılmıştır. Yapılan analizde kuvars plaka ve antenin elektrik alan dağılım paternini değiştirmediği halde elektrik alan şiddetinde düşüse neden olduğu görülmüştür. Ayrıca plazma deşarjının kavite içerisinde mikrodalga gücü emilimine etkisi de modellenmiştir. Üç farklı plazma yoğunluğu koşulu için yapılan analizde kavite uzunluğu ve anten uzunluğu değiştirilerek mikrodalga emiliminin artırılabileceği veya azaltılabileceği görülmüştür. Elektron yoğunluğu 10^{20}#/m^3 mertebesindeyken gönderilen mikrodalga gücünün %98'inin plazma tarafından emileceği görülmüştür. Yapılan analiz sistem veriminin artırılması için uygun anten ve kavite boyutlarının önemli olduğunu göstermiştir.

Bir uzay aracı için itki sistemi seçiminde görev isterleri ve uzay aracının özelliklerine göre itki sisteminin güç sarfiyatı, özgül impuls, itki seviyesi, boyutları gibi farklı parametreler kullanılabilir. Tez kapsamında üretilen MET sisteminin itki ve özgül impuls seviyesinin deneysel olarak ölçümlenmesi için mikrodalga üretim ve iletim hattı, gaz besleme hattı, vakum sisteminden oluşan bir deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan sistemde itki seviyesi, soğuk ve sıcak gaz akışı koşullarındaki basınç ölçülerek ve roket denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Testler 400 W ve 500 W mikrodalga gücü seviyesinde ve Helyum gazı kullanılarak yapılmıştır. Güç seviyesindeki artış özgül impuls ve itki seviyesinde artışa neden olduğu görülmüştür. Sistemin en yüksek itki seviyesi 266 mN ve özgül impuls seviyesi 347 s mertebesinde ölçülmüştür. Deneylerde itki seviyesi ve özgül impuls değeri %10 mertebesinde bir hata ile hesaplanmıştır. Bu değerler belirtilen güç seviyelerinde çalışan rezistojetlere yakın değerlerdir. Sistemin güç seviyesi daha da artırıldığında özgül impuls seviyesinin artarak arkjetlerinkine yaklaşması beklenmektedir.

Deneylerde ölçülen bir başka parametre ise gönderilen mikrodalga enerjisinin ne kadarının plazma tarafından absorbe edildiğidir. Bu değer çok hassas iki sensör kullanılarak gelen ve geri yansyan güç seviyesi arasındaki fark ölçülerek hesaplanmıştır. Sistemde plazma oluşmadan önce gücün büyük bir kısmının geri yansığı, plazma oluşuktan sonra ise yansımaların hızlı bir şekilde düşüğü görülmüştür. Sistem tune edildiğinde gönderilen gücün %97'inin plazma tarafından absorbe edildiği görülmüştür. Yukarıda belirtildiği gibi yapılan analizler mikrodalga emilimine anten uzunluğunun ve kavite boyutlarının etkisi olduğunu göstermektedir.

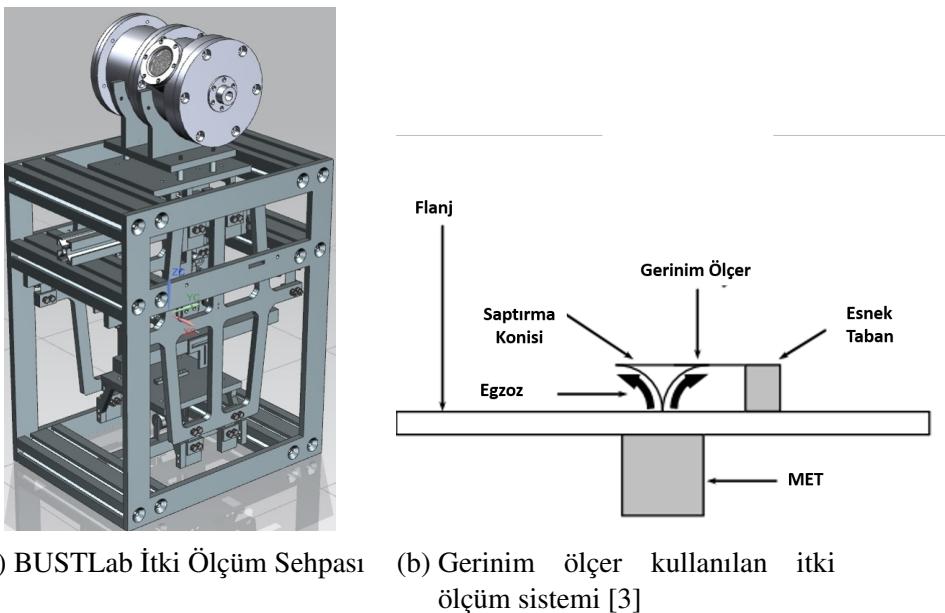
Deneylede sistem Argon, Helyum ve Nitrojen gaz türleri ile çalıştırılmıştır. Argon gazında 10 torr basınç seviyesinde ve yaklaşık 200 W güç seviyesinde plazma deşarjı başlamıştır. Basınç artırıldığında oluşan plazmanın kavite plazma bölgesi boyunca uzanan bir ark şeklini aldığı görülmüştür ve zaman zaman etrafa filament şeklinde dağılan yapıların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Helyum plazmasına bakıldığından ise plazma deşarjinin 100 W civarında başladığı ve plazmanın artan basınç ile birlikte bir damla şeklini alarak lüle duvarına doğru yaklaştığı görülmüştür. Aynı güç seviyelerinde argon plazmasının Helyum plazmasına göre daha yüksek akış debisi ve basınçlarına kadar sönmeden dayanabildiği görülmüştür. Nitrojen plazmasının ise oluşum şekli olarak helyum gibi bir patern izlediği ancak yüksek basınç koşullarında daha stabil olduğu gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında üretilen MET sisteminin performans parametreleri ve plazma özelliklerinin hesaplanması, sistemin çalışma mantığının anlaşılması için bir boyutsuz model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde 2.45 GHz frekansta ve Helyum gazı ile çalışan itki sistemi için $60 - 165 \text{ mg/s}$ aralığında farklı akış debilerinde hesaplamalar yapılmıştır. Plazmanın kendi içinde elektronlar ve ağır parçacıklar olmak üzere iki farklı akışındanoluğu kabul edilmiştir. Gaz alanı içerisinde ise plazmanın bir rıjît küre gibi davranışını farz edilmiştir. 1200 W güç seviyesi için yapılan hesaplamalar literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Belirtilen güç seviyesi ve debi seviyelerinde elektronların sıcaklıklar 1 eV ve yoğunluğu ise $10^{19} \text{ #}/\text{m}^3$ seviyesinde hesaplanmıştır. Özgül impuls seviyesi ise 450 s civarında hesaplanmıştır.

Sonuç olarak; tez kapsamında yapılan deney ve analiz çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda üretilen MET sisteminin resistojet sistemlerin performansına yakın bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Sistem tasarımında kavite ve anten boyutlarının doğru hesaplanması mikrodalga emilimi üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca MET sisteminin rezistojet ve arkjetlerin sistem ömrünü kısıtlayan faktörleri ortadan kaldıracak bir sistem olduğu düşünülmektedir. Ancak halihazırda mikrodalga üreteç sistemleri göz önüne alındığında üretilen prototiplerin güç işlemci ünitesinin halen çok karmaşık ve ağır olduğu görülmektedir. Daha kompakt mikrodalga üreteçlerinin geliştirilmesi ile bu problemin aşılabilceği ve sistemin uzay araçlarında kullanılabileceği değerlendirilmektedir.

5.1 Gelecek Dönemde Yapılacak Çalışmalar ve Öneriler

Kimyasal sistemlere nazaran elektrikli itki sistemi yüksek özgül impuls sağlama malarına rağmen itki seviyeleri düşüktür. Kimyasal itki sistemlerinin itki seviyesi yük hücresi kullanılarak ölçülebilinmektedir. Ancak elektrikli itki sistemlerinin itki/ağırlık oranı düşük olduğu için çok daha hassas ölçüm sistemi gerekmektedir. Ölçüm sisteminin mekanik parçalarında ısimmayla genleşme gibi en küçük bir etki itki ölçümünü etkileyecektir. Elektrikli itki sistemlerinde ters sarkaç ve burulan sarkaç gibi sistemler kullanılmaktadır [87]. BUSTLab'da yüksek lisans öğrencisi Uğur Kokal tarafından Şekil 5.1a'dekine benzer ve sarkaç etkisiyle çalışan bir itki sehpası geliştirme aşamasındadır.

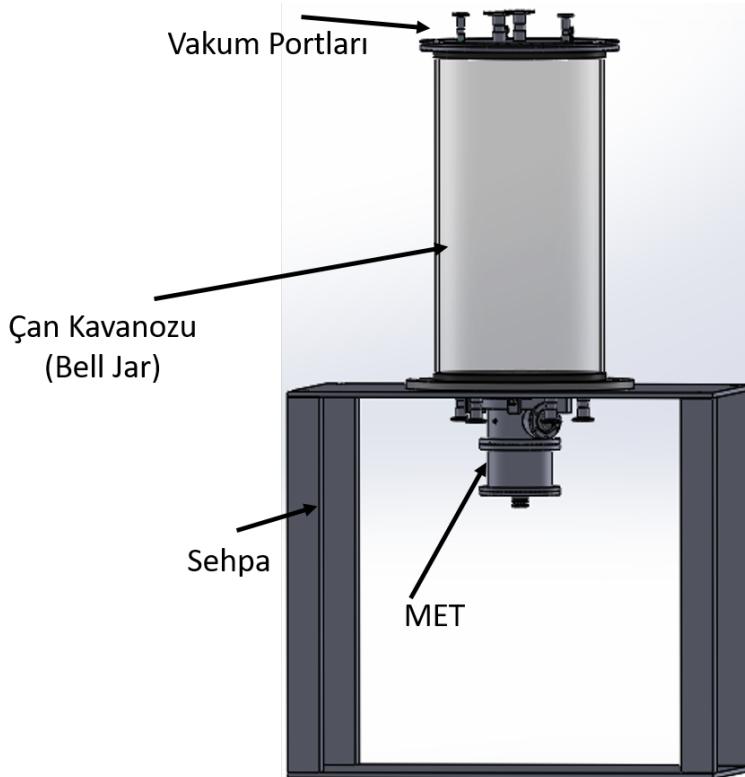


Şekil 5.1: İtki ölçüm sistemleri

Ayrıca Şekil 5.1b'deki gibi bir sapma levhası üzerine bağlı gerinim ölçerler de itki ölçümü için kullanılmaktadır. Bu sistemlerde egzoz gazının levhaya uyguladığı kuvvet esnek olan levhada bükülmeye sebep olmaktadır ve gerilme kuvveti sensör ile algılanmaktadır. Ölçülen gerinim değeri bize itki seviyesini verecektir. Bu sistemler sarkaç sistemlerine göre daha az hassas olmasına rağmen üretim açısından kolay sistemlerdir. BUSTLab MET sisteminin itki seviyesinin hassas ölçülmesi için bahsedilen iki sistemle de ölçüm yapılması uygun olacaktır.

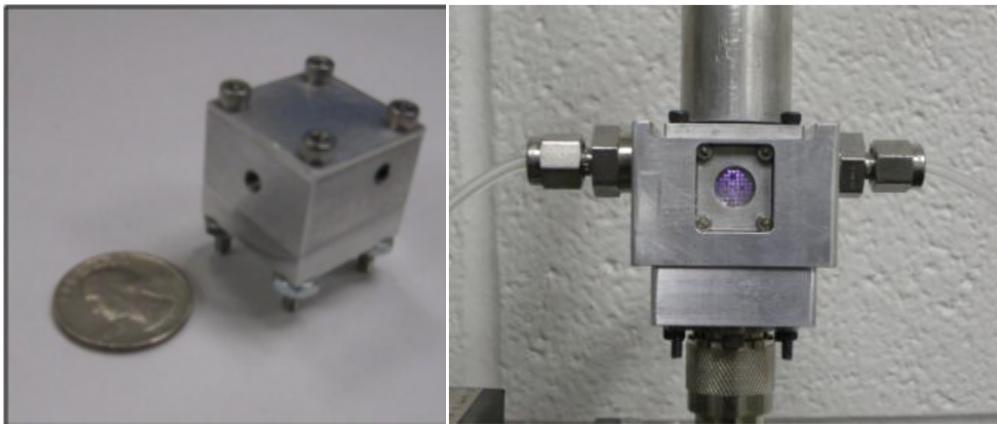
BUSTLab MET sistemi daha önceki deneylerde vakum tankı içerisinde konularak veya vakum tankı flanjına asılarak testler yapılmıştır. Ancak vakum tankının hazırlık

süresi uzun olduğu için daha pratik bir tasarım yapılmıştır. Bu sistemde bir çan kavanozu (bell jar) kullanılmıştır ve çan kavanozunun alt ve üst kısımları flanjlar ile kapatılmıştır. Bahsedilen flanjların üzerine farklı büyüklükte vakum girişleri monte edilmiştir. Sistem bir mekanik pompaya bağlanarak vakumlanacaktır. MET sistemi alt flanja Şekil 5.2'deki gibi asılacaktır.



Şekil 5.2: Çan Kavanozu vakum sistemi

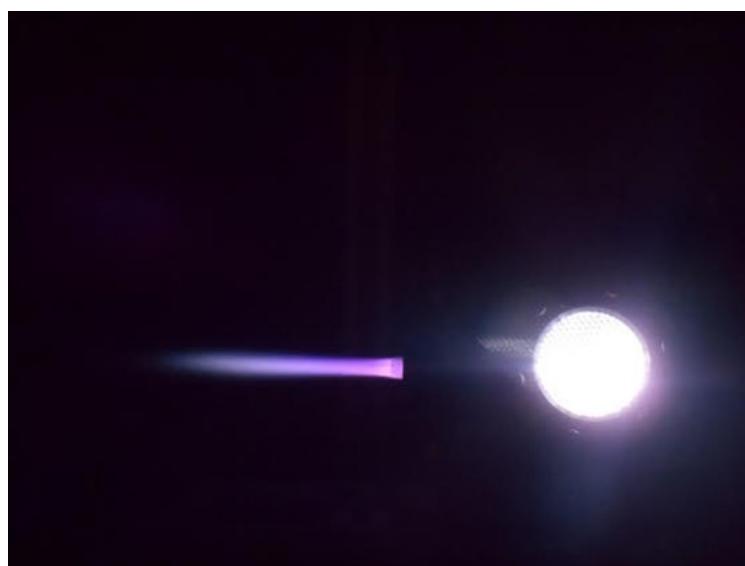
Günümüzde büyük ve maliyetli uzay araçlarının yerini küçük ve az maliyetli uzay sistemleri almaktadır. Örneğin; ağırlığı bir kaç tonu bulan bir gözlem uydusunun yerine bir küp uyuğu kümesiyle aynı görevi yapmak çok daha az maliyetli olacaktır. Uydu teknolojilerindeki bu eğilim MET sistemleri üzerine yapılan araştırmaların da yönünü değiştirmiştir. PennState Üniversitesi araştırmacıları tarafından Şekil 5.3'de görüldüğü gibi yüksek frekanslarda çalışan itki sistemleri prototipleri denenmiştir. Frekans artışı ile birlikte sistemin boyutları küçülmektedir. Örneğin; 2.45 GHz frekansla TM_{011} modda çalışan bir sistemin yarıçapı yaklaşık 5 cm ve yüksekliği 17.5 cm iken 30 GHz ile üretilen bir sistemin yarıçapı 0.41 cm ve yüksekliği 1.43 cm boyutlarına düşecektir [7]. Sistemin küçülmesinde sadece kavite boyutlarının küçülmesi yeterli değildir. Mikrodalga üretim hattının da küçülmesi gerekmektedir.



(a) 30 GHz MET

(b) 17.8 GHz MET

Şekil 5.3: Farklı frekanslarda MET tasarımları [6–8]



Şekil 5.4: BUSTLab MET egzoz gazı

MET sistemlerinde plazma bölgesindeki yüklü parçacıkların sistemden atılmadan rekombinasyon ile nötr hale gelmesi ve egzoz gazlarının nötr olarak atılması istenilmektedir. Bunun sebebi enerji kaybının azaltılmasıdır. Çünkü eğer gaz iyonize halde dışarı atılırsa iyonlaşma için harcanan enerji kayıp olacaktır. Ayrıca yüklü parçacıkların atılması zamanla uzay aracı üzerinde yük birikmesine ve deşarja neden olacaktır. İyon ve Hall Effect gibi doğrudan iyon atan itki sistemlerinde dışarıya atılan iyonların nötrleşmesi için katotlar kullanılmaktadır. Deneyler esnasındaki gözlemler göstermiştir ki belirli bir akış debisi üzerinde çalışan MET sisteminde Şekil 5.4'daki gibi dışarıya iyonize gaz atılmaktadır. MET sisteminde farklı gaz tiplerinde egzoz gazı iyonizasyon oranın bir Langmuir prob ile ölçülmesi sistemin egzoz gazı karakteristiklerinin ve etkilerinin ne olacağı hakkında bilgi verecektir.

MET sisteminde yakıt olarak farklı gazlar kullanıldığında performans üzerine etkileri daha önce yapılan deneylerde incelenen bir konudur. Litaratüre bakıldığından monatomik, moleküler gazlar ve su buharı kullanılarak yapılan testlere rastlanmaktadır. BUSTLab MET sisteminin farklı gazlar için karakteristiklerinin ölçülmesi gelecek dönemde yapılması tavsiye edilebilecek çalışmalar arasındadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Martinez-Sanchez, M. ve Pollard, J.E.** (1998). Spacecraft Electric Propulsion — An Overview, *Journal of Propulsion and Power*, **14**(5), 688–698.
- [2] **Mazouffre, S.** (2016). Electric Propulsion for Satellites and Spacecraft: Established Technologies and Novel Approaches, *Plasma Sources Science and Technology*, **25**(3), 1–27.
- [3] **Clemens, D.E.** (2008). Performance Evaluation of the Microwave Electrothermal Thruster Using Nitrogen, Simulated Hydrazine and Ammonia, *Doktora Tezi*, Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.
- [4] **Diamant, K.D., Cohen, R.B. ve Brandenburg, J.E.** (2002). High Power Microwave Electrothermal Thruster Performance on Water, *38th Joint Propulsion Conference*, Indianapolis, Indiana, AIAA-2002-3662.
- [5] **Haraburda, S. ve Hawley, M.** (1989). Investigation of Microwave Plasma Applications in Electrothermal Thruster Systems, *25th Joint Propulsion Conference*, Monterey, CA, AIAA-89-2378.
- [6] **Goovaerts, K.M., Bilén, S.G. ve Micci, M.M.** (2007). Design and Initial Testing of a Miniature Microwave Electrothermal Thruster (MiniMET), *43rd Joint Propulsion Conference*, Cincinnati, OH, AIAA-2007-5293.
- [7] **Capalungan, E.E., Micci, M.M. ve Bilén, S.G.** (2011). The Design and Development of a 30-GHz Microwave Electrothermal Thruster, *32nd International Electric Propulsion Conference*, Wiesbaden, Germany, IEPC-2011-162.
- [8] **Adusumilli, R.P.**, (2011). Performance Evaluation and Optimization of High Power 14.5 GHz Miniature Microwave Electrothermal Thruster, *Yüksek Lisans Tezi*, The Pennsylvania State University, Univ. Park, PA, USA.
- [9] **Frisbee, R.H.** (2003). Advanced Space Propulsion for the 21st Century, *Journal of Propulsion and Power*, **19**(6), 1129–1154.
- [10] **Turner, M.J.** (2006). *Rocket and Spacecraft Propulsion*, Springer, Chichester, UK, 2. sürüm.
- [11] **Sutton, G.P. ve Biblarz, O.** (2000). *Rocket Propulsion Elements*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 7. sürüm.
- [12] **Jahn, R.G. ve Choueiri, E.Y.**, (2002). Electric Propulsion, Encyclopedia of Physical Science and Technology, 3589, 3. sürüm, s.125–141.

- [13] **Eduardo, A.** (2011). Plasmas for Space Propulsion, *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **53**, 1–18.
- [14] **Goebel, D.M. ve Katz, I.** (2008). *Fundamental of Electric Propulsion*, John Wiley & Sons, Inc.
- [15] **Micci, M.** (1984). Prospects for Microwave Heated Propulsion, *20th Joint Propulsion Conference*, Cincinnati, Ohio, AIAA-84-1390.
- [16] **Whitehair, S., Asmussen, J. ve Nakanishi, S.** (1984). Demonstration of a New Electrothermal Thruster Concept, *Applied Physics Letters*, **44**(10), 1014–1016.
- [17] **Whitehair, S., Frasch, L.L. ve Asmussen, J.** (1987). Experimental Performance of a Microwave Electrothermal Thruster with High Temperature Nozzle Materials, *19th International Electric Propulsion Conference*, Colorado Springs, Colorado, AIAA-87-1016.
- [18] **Mueller, J. ve Micci, M.M.** (1991). Desing and Performance Characteristics of a New Microwave Electrothermal Thruster, *22nd International Electric Propulsion Conference*, Viareggio, Italy, IEPC-91-033.
- [19] **Sullivan, D.J., Kline, J., Philippe, C. ve Micci, M.M.** (1995). Current Status of the Microwave Arcjet Thruster, *31st Joint Propulsion Conference*, San Diego, CA, AIAA-95-3065.
- [20] **Balaam, P., Maul, W. ve Micci, M.M.** (1988). Characteristics of Free Floating Nitrogen and Helium Plasma Generated in a Microwave Resonant Cavity, *24th Joint Propulsion Conference*, Boston, MA, USA, AIAA-88-99.
- [21] **Juan, Y., Hongqing, H., Genwang, M. ve Xianwei, H.** (2004). Resonant and Ground Experimental Study on Microwave Plasma Thruster, *Journal of Spacecraft and Rockets*, **41**(1), 126–131.
- [22] **Balaam, P. ve Micci, M.M.** (1991). Performance Measurement of a Resonant Cavity Electrothermal Thruster, *22nd International Electric Propulsion Conference*, Viareggio, Italy, IEPC-91-031.
- [23] **Sullivan, D.J. ve Micci, M.M.** (1993). Development of a Microwave Resonant Cavity Electrothermal Thruster Prototype, *23rd International Electric Propulsion Conference*, Seattle, WA, USA, IEPC-93-036.
- [24] **Balaam, P. ve Micci, M.M.** (1995). Investigation of Stabilized Resonant Cavity Microwave Plasmas for Propulsion, *Journal of Propulsion and Power*, **11**(5), 1021–1027.
- [25] **Chianese, S.G. ve Micci, M.M.** (2006). Microwave Electrothermal Thruster Chamber Temperature Measurement and Performance Calculations, *Journal of Propulsion and Power*, **22**(1), 31–37.
- [26] **Micci, M.M., Bilen, S.G. ve Clemens, D.E.** (2009). History and Current Status of Microwave Electrothermal Thrusters, *Progress in Propulsion Physics*, **1**, 425–438.

- [27] **Diamant, K.D., Zeigler, B.L. ve Cohen, R.B.** (2007). Microwave Electrothermal Thruster Performance, *Journal of Propulsion and Power*, **23**(1), 27–34.
- [28] **Mogildea, G. ve Mogildea, M.** (2010). Experimental Investigation of the Microwave Electrothermal Thruster Using Metals as Propellant, *Optoelectronics and Advanced Materials*, **4**(11), 1826–1829.
- [29] **Diamant, K.D., Brandenburg, J.E. ve Cohen, R.B.** (2001). Performance Measurement of Water Fed Microwave Electrothermal Thruster, *37th Joint Propulsion Conference*, Salt Lake City, Utah, AIAA-2001-3900.
- [30] **Diamant, K.D., Zeigler, B.L. ve Cohen, R.B.** (2003). Tunable Microwave Electrothermal Thruster Performance on Water, *39th Joint Propulsion Conference*, Huntsville, Alabama, AIAA-2003-5150.
- [31] **Power, J.L.** (1992). Microwave Electrothermal Propulsion for Space, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **40**(6), 1179–1191.
- [32] **Brandenburg, J.E., Kline, J. ve Sullivan, D.** (2005). The Microwave Electro-Thermal (MET) Thruster Using Water Vapor Propellant, *IEEE Transaction on Plasma Science*, **33**(2), 776–782.
- [33] **Nordling, D. ve Micci, M.M.** (1997). Low Power Microwave Arcjet Testing, *25th International Electric Propulsion Conference*, Cleveland, OH, IEPC-97-089.
- [34] **Micci, M.M.** (2000). Low-power Solid State Microwave Thruster System, *European Symposium on Aerothermodynamics for Space*, Cannes, France, 2000 ESASP 203M.
- [35] **Takao, Y., Ono, K., Takahashi, K. ve Eriguchi, K.** (2005). Development of a Microwave - Excited Microplasma Thruster, *29th International Electric Propulsion Conference*, Princeton, NJ, IEPC-2005-056.
- [36] **Sullivan, D.J., Kline, J.F., Zaidi, S.H. ve Miles, R.B.** (2004). A 300 W Microwave Thruster Design and Performance Testing, *40th Joint Propulsion Conference*, Fort Lauderdale, FL, AIAA-2004-4122.
- [37] **Takao, Y., Eriguchi, K. ve Ono, K.** (2007). A Miniature Electrothermal Thruster Using Microwave-Excited Microplasmas: Thrust Measurement and Its Comparison with Numerical Analysis, *Journal of Applied Physics*, **101**(12), 123307.
- [38] **Blum, J.H., Hopkins, J.R., Micci, M.M. ve Bilén, S.G.** (2009). Evaluation and Optimization of an 8-GHz Microwave Electrothermal Thruster, *31st International Electric Propulsion Conference*, Ann Arbor Michigan, USA, IEPC-2009-201.
- [39] **Abaimov, M., Micci, M.M. ve Bilén, S.G.** (2016). A 17.8-GHz Microwave Electrothermal Thruster for Cubesats and Small Satellites, *Space Propulsion Conference*, Rome, Italy.

- [40] **Haraburda, S.S. ve Dinkel, D.W.** (1991). Theoretical Modeling Diagnostic Evaluations of Microwave Generated Plasma Systems, *22nd International Electric Propulsion Conference*, Viareggio, Italy, IEPC-91-032.
- [41] **Haraburda, S. ve Hawley, M.** (1992). Theoretical Nozzle Performance of a Microwave Electrothermal Thruster Using Experimental Data, *28th Joint Propulsion Conference*, Nashville, TN, AIAA-92-3110.
- [42] **Venkateswaran, S. ve Merklet, C.L.** (1995). Numerical Investigation of Bluff-Body Stabilized Microwave Plasmas, *Journal of Propulsion and Power*, **11**(2).
- [43] **Chiravalle, V., Miles, R. ve Choueiri, E.** (2001). Numerical Simulation of Microwave-Sustained Supersonic Plasmas for Application to Space Propulsion, *39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, AIAA-2001-0962.
- [44] **Chiravalle, V., Zaidi, S., Choueiri, E. ve Miles, R.** (2003). Laser-Induced Fluorescence Measurements of a Two-Stage Microwave Electrothermal Thruster Plume, *34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Orlando, Florida, AIAA-2003-4294.
- [45] **Bilén, S.G., Valentino, C.J., Micci, M.M. ve Clemens, D.E.** (2005). Numerical Electromagnetic Modeling of a Low-Power Microwave Electrothermal Thruster, *41st Joint Propulsion Conference*, Tucson, Arizona, AIAA-2005-3699.
- [46] **Nowakowska, H., Zakrzewski, Z., Moisan, M. ve Lubanski, M.** (1998). Propagation Characteristics of Surface Waves Sustaining Atmospheric Pressure Discharges : The Influence of the Discharge Processes, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **31**, 1422–1432.
- [47] **Nowakowska, H., Jasiński, M. ve Mizeraczyk, J.** (2009). Electromagnetic Field Distributions in Waveguide-Based Axial-Type Microwave Plasma Source, *The European Physical Journal D*, **54**(2), 511–518.
- [48] **Nowakowska, H., Jasiński, M., Debicki, P.S. ve Mizeraczyk, J.** (2011). Numerical Analysis and Optimization of Power Coupling Efficiency in Waveguide-Based Microwave Plasma Source, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **39**(10), 1935–1942.
- [49] **Rahimi, S., Jimenez-Diaz, M., Hübner, S., Kemaneci, E.H., van der Mullen, M. ve van Dijk, J.** (2014). A Two-Dimensional Modelling Study of a Coaxial Plasma Waveguide, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **47**(12), 1–13.
- [50] **Lin, L., Wu, B. ve Wu, C.K.** (2003). Propagation Properties of Electromagnetic Wave in a Plasma Slab, *Plasma Science & Technology*, **5**(4), 1905–1908.
- [51] **Guo, B. ve Wang, X.** (2005). Power Absorption of High-Frequency Electromagnetic Waves in a Partially Ionized Magnetized Plasma, *Plasma Science & Technology*, **7**(1), 2645–2648.

- [52] **Gürel, Ç.. ve Öncü, E.** (2009). Plasma Slab with Partially Linear and Sinusoidal Electron Density Profile, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, **12**, 171–181.
- [53] **Jia, J., Yuan, C., Gao, R., Wang, Y., Liu, Y., Gao, J., Zhou, Z., Sun, X., Wu, J., Li, H. ve Pu, S.** (2015). Propagation of Electromagnetic Waves in a Weakly Ionized Dusty Plasma, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **48**, 1–8.
- [54] **Laroussi, M.** (1995). Interaction of Microwaves with Atmospheric Pressure Plasmas, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **16**(12), 2069–2083.
- [55] **Jasinski, M., Kropiewski, L., Zakrzewski, Z. ve Mizeraczyk, J.** (2008). Atmospheric Microwave Plasma Source, *II Central European Symposium on Plasma Chemistry*, Brno, Czech Republic.
- [56] **Georghiou, G.E., Papadakis, A.P., Morrow, R. ve Metaxas, A.C.** (2005). Numerical Modelling of Atmospheric Pressure Gas Discharges Leading to Plasma Production, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **38**, R303–R328.
- [57] **Kabouzi, Y., Graves, D., Castaños-Martínez, E. ve Moisan, M.** (2007). Modeling of Atmospheric-Pressure Plasma Columns Sustained by Surface Waves, *Physical Review E*, **75**(1), 1–14.
- [58] **Lee, C., Graves, D., Lieberman, M. ve Hess, D.** (1994). Global Model of Plasma Chemistry in a High Density Oxygen Discharge, *Journal of Electrochemical Society*, **141**(6), 1546–1555.
- [59] **Nam, S.K. ve Verboncoeur, J.P.** (2009). Global Model for High Power Microwave Breakdown at High Pressure in Air, *Computer Physics Communications*, **180**(4), 628–635.
- [60] **Baeva, M. Bösel, A. Ehlbeck, J. Loffhagen, D.** (2012). Modeling of Microwave-Induced Plasma in Argon at Atmospheric Pressure, *Physical Review E*, **85**(5), 1–9.
- [61] **Yildiz, M.S. ve Celik, M.** (2015). Global Energy Transfer Model of Microwave Induced Plasma in a Microwave Electrothermal Thruster, *34th International Electric Propulsion Conference*, Kobe, Japon, IEPC-2015-266.
- [62] **Balanis, C.A.** (1989). *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc., 1. sürüm.
- [63] **Pozar, D.M.** (2012). *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 4th sürüm.
- [64] **Blum, J.H.**, (2009). Performance Evaluation and Optimization of 8 GHz Microwave Electrothermal Thruster, *Yüksek Lisans Tezi*, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.
- [65] **Fleisch, D., Lemons, D.S. ve Bernstein, J.** (2008). *A Student's Guide to Maxwell's Equations*, Cambridge University, New York, 1. sürüm.

- [66] **Yıldız, M.S., Ünaldi, N. ve Celik, M.** (2014). Geometry Optimization of a 2.45 GHz Microwave Electrothermal Thruster Resonant Cavity, *4th Space Propulsion Conference*, Colonge, Germany, SP2014-2980822.
- [67] **Nowakowska, H., Jasiński, M. ve Mizeraczyk, J.** (2011). Numerical Analysis of Tuning Procedure of a Waveguide-Based Microwave Plasma Source, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **39**(11), 2906–2907.
- [68] **Lieberman, M.A. ve Allan J. Lichtengberg** (2005). *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, John Wiley & Sons, Inc., 2. sürüm.
- [69] **Yıldız, M.S. ve Celik, M.** (2015). Evaluation of Plasma Properties in a Microwave Electrothermal Thruster Resonant Cavity Using Two Fluid Global Model, *51st Joint Propulsion Conference*, Orlando, FL, AIAA-2015-3926.
- [70] **Jankowski, K.J. ve Reszke, E.** (2011). *Microwave Induced Plasma Analytical Spectrometry*, The Royal Society of Chemistry Press, Cambridge, UK.
- [71] **Yıldız, M.S. ve Celik, M.** (2016). Experimental Performance Analysis of the BUSTLab Microwave Electrothermal Thruster, *52nd Joint Propulsion Conference*, Salt Lake City, UT, AIAA-2015-3926.
- [72] **Hawley, C., Asmussen, J., Filpus, J.W., Whitehair, S., Hoekstra, C. ve Chapman, R.** (1989). Review of Research and Development on the Microwave Electrothermal Thruster, *Journal of Propulsion and Power*, **5**(6), 703–712.
- [73] **Nowakowska, H., Jasiński, M. ve Mizeraczyk, J.** (2013). Modelling of Discharge in a High-Flow Microwave Plasma Source (MPS), *The European Physical Journal D*, **67**(7), 1–8.
- [74] **Martinez, E.C., Kabouzi, Y., Makasheva, K. ve Moisan, M.** (2004). Modeling of Microwave-Sustained Plasmas at Atmospheric Pressure with Application to Discharge Contraction, *Physical Review E*, **70**, 1–12.
- [75] **Chen, X. ve Han, P.** (1999). On the Thermodynamic Derivation of the Saha Equation Modified to a Two-Temperature Plasma, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **32**(14), 1711–1718.
- [76] **Janssen, G.M., van Dijk, J., Benoy, D.A., Tas, M.A., Burm, K., Goedheer, W.J., van der Mullen, J. ve Schram, D.C.** (1999). PLASIMO, a General Model: Applied to an Argon Cascaded Arc Plasma, *Plasma Sources Science and Technology*, **8**, 1–14.
- [77] **Raizer, Y.P.** (1991). *Gas Discharge Physics*, 2 sürüm.
- [78] **Piel, A.** (2010). *Plasma Physics*, Springer.
- [79] **Potts, H. ve Hugill, J.** (2000). Studies of High-Pressure, Partially Ionized Plasma Generated by 2.45 GHz Microwaves, *Plasma Sources Science and Technology*, **9**, 18–24.
- [80] **Inan, U.S. ve Golkowski, M.** (2011). *Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists*, Cambridge University Press, 2 sürüm.

- [81] **Jonkers, J., Sande, M.V.D., Sola, A., Gamero, A. ve Mullen, J.V.D.** (2003). On the Differences Between Ionizing Helium and Argon Plasmas at Atmospheric Pressure, *Plasma Sources Science and Technology*, **12**(1), 30–38.
- [82] **Çengel, Y.A.** (2002). *Heat Transfer*, McGraw-Hill, 2nd. sürüm.
- [83] **Boulos, M.I., Fauchais, P. ve Pfender, E.** (1994). *Thermal Plasmas: Fundamentals and Applications*, Springer Science Business Media, LLC, New York.
- [84] **Welty, J.R., Wicks, C.E., Wilson, R.E. ve Rorrer, G.L.** (2008). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, John Wiley and Sons, Inc.
- [85] **www.comsol.com**, <https://www.comsol.com>.
- [86] **Balaam, P. ve Micci, M.M.** (1992). Investigation of Free Floating Resonant Cavity Microwave Plasmas for Propulsion, *Journal of Propulsion and Power*, **8**(1), 103–109.
- [87] **Markusict, T., Jones, J. ve Cox, M.** (2004). Thrust Stand for Electric Propulsion Performance Evaluation, *40th Joint Propulsion Conference*, Fort Lauderdale, Florida, AIAA-2004-3441.

EKLER

EK A : Rezonans Kavite için Elektromanyetik Denklem Çözümleri

EK B : Elektron Sürekllilik ve Akı Denklemleri

EK C : BUSTLab MET Teknik Çizimleri

EK A

Rezonans Kavite için Elektromanyetik Denklem Çözümleri

TM_{011} Modda Çalışan Bir Silindirik Rezonans Kavite için Dalga Denklemi Çözümü

Zamana göre harmonik dalga denklemi yük kaynağı olmayan bir ortam için aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\nabla^2 \mathbf{E} = j\omega\mu\sigma\mathbf{E} - \omega^2\mu\epsilon\mathbf{E} = \gamma^2\mathbf{E} \quad (\text{A.1})$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (\text{A.2})$$

$$\mathbf{E}(\rho, \phi, z) = \hat{a}_\rho E_\rho(\rho, \phi, z) + \hat{a}_\phi E_\phi(\rho, \phi, z) + \hat{a}_z E_z(\rho, \phi, z) \quad (\text{A.3})$$

Eğer hiç bir sökümleme olmuyorsa;

$$\nabla^2(\hat{a}_\rho E_\rho + \hat{a}_\phi E_\phi + \hat{a}_z E_z) = -\beta^2(\hat{a}_\rho E_\rho + \hat{a}_\phi E_\phi + \hat{a}_z E_z) \quad (\text{A.4})$$

Z yönü için düzenlediğimizde;

$$\nabla^2(\hat{a}_z E_z) = \hat{a}_z \nabla^2 E_z \quad (\text{A.5})$$

$$\nabla^2 E_z + \beta^2 E_z = 0 \quad (\text{A.6})$$

Elektrik alanın diğer bileşenleri için çözüm aşağıdaki gibi yapılabilir;

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\beta^2 \mathbf{E} \quad (\text{A.7})$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\beta^2 \mathbf{E} \quad (\text{A.8})$$

$$\nabla^2 E_\rho + \left(-\frac{E_\rho}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\phi}{\partial \phi}\right) = -\beta^2 E_\rho \quad (\text{A.9})$$

$$\nabla^2 E_\phi + \left(-\frac{E_\phi}{\rho^2} - \frac{2}{\rho^2} \frac{\partial E_\rho}{\partial \phi}\right) = -\beta^2 E_\phi \quad (\text{A.10})$$

Şimdi de tanımlanan bir $\psi(\rho, \phi, z)$ fonksiyonu için çarpanlara ayırma yöntemi uygularsak;

$$\psi(\rho, \phi, z) = f(\rho)g(\phi)h(z) \quad (\text{A.11})$$

$$gh \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + gh \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} + fh \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 g}{\partial \phi^2} + fg \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -\beta^2 fgh \quad (\text{A.12})$$

Eğer denklemin iki tarafını da fgh ile bölersek;

$$\frac{1}{f} \frac{\partial^2 f}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \rho} + \frac{1}{g} \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 g}{\partial \phi^2} + \frac{1}{h} \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = -\beta^2 \quad (\text{A.13})$$

Son terim sadece z 'nin fonksiyonu olduğu için;

$$\frac{d^2h}{dz^2} = -\beta_z^2 h \quad (\text{A.14})$$

Eğer **A.14** denklemi **A.13** denklemi içerisine koyarsak ve her iki tarafında ρ^2 ile çarparsak, aşağıdaki denklemi elde ederiz;

$$\frac{\rho^2}{f} \frac{d^2f}{d\rho^2} + \frac{\rho}{f} \frac{df}{d\rho} + \frac{1}{g} \frac{d^2g}{d\phi^2} + (\beta^2 - \beta_z^2) \rho^2 = 0 \quad (\text{A.15})$$

Üçüncü terim sadece ϕ 'nin bir fonksiyonu olduğu için aşağıdaki gibi bir eşitlik önerelimiz;

$$\frac{1}{g} \frac{d^2g}{d\phi^2} = -m^2 \Rightarrow \frac{d^2g}{d\phi^2} = -m^2 g \quad (\text{A.16})$$

ve β için aşağıdaki önermeyi yaparsak,

$$\beta^2 = \beta_\rho^2 + \beta_z^2 \quad (\text{A.17})$$

ve **A.16** denklemi **A.15** denkleminde yerine yazıp denklemin her iki tarafını f ile çarparsak;

$$\rho^2 \frac{d^2f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{d\rho} + [(\beta_\rho \rho)^2 - m^2] f = 0 \quad (\text{A.18})$$

denklemi elde edilir ve böylece $\psi(\rho, \phi, z) = f(\rho)g(\phi)h(z)$ denkleminin çözümü için dört ayrı denklem elde etmiş oluruz,

$$\rho^2 \frac{d^2f}{d\rho^2} + \rho \frac{df}{d\rho} + [(\beta_\rho \rho)^2 - m^2] f = 0 \quad (\text{A.19})$$

$$\frac{d^2g}{d\phi^2} = -m^2 g \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{d^2h}{dz^2} = -\beta_z^2 h \quad (\text{A.21})$$

$$\beta^2 = \beta_\rho^2 + \beta_z^2 \quad (\text{A.22})$$

Bu denklem seti için aşağıdaki çözümler önerilebilir ;

$$f_1(\rho) = A_1 J_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y_m(\beta_\rho \rho) \quad (\text{A.23})$$

ya da

$$f_2(\rho) = C_1 H_m^{(1)}(\beta_\rho \rho) + D_1 H_m^{(2)}(\beta_\rho \rho) \quad (\text{A.24})$$

$$g_1(\phi) = A_2 e^{-jm\phi} + B_2 e^{+jm\phi} \quad (\text{A.25})$$

ya da

$$g_2(\phi) = C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi) \quad (\text{A.26})$$

$$h_1(z) = A_3 e^{-j\beta_z z} + B_3 e^{+j\beta_z z} \quad (\text{A.27})$$

ya da

$$h_2(z) = C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z) \quad (\text{A.28})$$

$J_m(\beta_\rho \rho)$ ve $Y_m(\beta_\rho \rho)$ birinci ve ikinci türden Bessel fonksiyonunu ifade etmektedir ve bu fonksiyonlar fiziksel olarak bir duran dalgayı temsil edebilirler. Öte yandan $H_m^{(1)}(\beta_\rho \rho)$ ve $H_m^{(2)}(\beta_\rho \rho)$ birinci ve ikinci türden Hankel fonksiyonunu temsil etmektedirler ve fiziksel olarak bir yürüyen dalgayı temsil edebilirler. Aynı zamanda üstel bir fonksiyon yürüyen dalgayı, sinüs ve kosinüs fonksiyonları ise duran dalgayı ifade edebilir.

Manyetik Vektör Potansiyeli A

Yüksüz bir ortamda manyetik akı yoğunluğu \mathbf{B} sürekli selonoidaldir $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ve başka bir vektörün bükümünü (curl) ifade etmek için kullanılabilir $\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0$

$$\mathbf{B}_A = \mu \mathbf{H}_A = \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{A.29})$$

$$\mathbf{H}_A = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \quad (\text{A.30})$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} + \beta^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (\text{A.31})$$

$$\mathbf{E}_A = -j\omega \mathbf{A} - j\frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) \quad (\text{A.32})$$

Elektrik Alan Potansiyeli F

Yüksüz bir ortamda elektriksel akı yoğunluğu \mathbf{D} sürekli selonoidaldir $\nabla \cdot \mathbf{D} = 0$ ve başka bir vektörün bükümünü (curl) ifade etmek için kullanılabilir $\nabla \cdot (-\nabla \times \mathbf{F}) = 0$

$$\mathbf{D}_F = -\nabla \times \mathbf{F} \quad (\text{A.33})$$

$$\mathbf{E}_F = -\frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{F} \quad (\text{A.34})$$

$$\nabla^2 \mathbf{F} + \beta^2 \mathbf{F} = -\epsilon \mathbf{M} \quad (\text{A.35})$$

$$\mathbf{H}_F = -j\omega \mathbf{F} - j\frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) \quad (\text{A.36})$$

Toplam alan aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_F \quad (\text{A.37})$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_A + \mathbf{H}_F \quad (\text{A.38})$$

Öncelikle $\nabla^2 \mathbf{A} + \beta^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}$ ve $\nabla^2 \mathbf{F} + \beta^2 \mathbf{F} = -\epsilon \mathbf{M}$ denklemleri çözülür. Bulunan \mathbf{A} ve \mathbf{F} terimlerinden yararlanılarak \mathbf{E} ve \mathbf{H} için çözümler elde edilir.

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_F = -j\omega \mathbf{A} - j\frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \frac{1}{\epsilon} \nabla \times \mathbf{F} \quad (\text{A.39})$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_A + \mathbf{H}_F = \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} - j\omega \mathbf{F} - j\frac{1}{\omega \mu \epsilon} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) \quad (\text{A.40})$$

$$\mathbf{A}(\rho, \phi, z) = \hat{a}_\rho A_\rho(\rho, \phi, z) + \hat{a}_\phi A_\phi(\rho, \phi, z) + \hat{a}_z A_z(\rho, \phi, z) \quad (\text{A.41})$$

$$\mathbf{F}(\rho, \phi, z) = \hat{a}_\rho F_\rho(\rho, \phi, z) + \hat{a}_\phi F_\phi(\rho, \phi, z) + \hat{a}_z F_z(\rho, \phi, z) \quad (\text{A.42})$$

TE modu

TE modu için çözümler \mathbf{A} ve \mathbf{F} 'in aşağıdaki eşitlikleri için elde edilebilir.

$$\mathbf{A} = 0 \quad (\text{A.43})$$

$$\mathbf{F} = \hat{a}_z F_z(\rho, \phi, z) \quad (\text{A.44})$$

$$E_\rho = -\frac{1}{\epsilon\rho} \frac{\partial F_z}{\partial \phi} \quad (\text{A.45})$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial \rho} \quad (\text{A.46})$$

$$E_z = 0 \quad (\text{A.47})$$

$$H_\rho = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \frac{\partial^2 F_z}{\partial \rho \partial z} \quad (\text{A.48})$$

$$H_\phi = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon\rho} \frac{\partial^2 F_z}{\partial \phi \partial z} \quad (\text{A.49})$$

$$H_z = -j \frac{1}{\omega\mu\epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) F_z \quad (\text{A.50})$$

$$\nabla^2 \mathbf{F} + \beta^2 \mathbf{F} = 0 \quad (\text{A.51})$$

$$\frac{\partial^2 F_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 F_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} + \beta^2 F_z = 0 \quad (\text{A.52})$$

$$\begin{aligned} F_z(\rho, \phi, z) &= [A_1 J_m(\beta_\rho \rho) + B_1 Y_m(\beta_\rho \rho)] \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \\ &\quad \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] \end{aligned} \quad (\text{A.53})$$

$A_1, B_1, C_2, D_2, C_3, D_3$ aşağıdaki sınır şartları kullanılarak bulunabilir

1. $E_\phi(\rho = a, \phi, z) = 0$
2. Alan çizgileri her yerde sonlu olmalı
3. Her 2π radyanda alan tekrar etmeli ϕ

İlk sınır şartına göre $B_1 = 0$ 'dır ve $Y_m(\rho = 0) = \infty$ ikinci sınır şartını sağlamamaktadır. Üçüncü sınır şartına göre ise $m=0,1,2,3,\dots$ olmalıdır.

$$\begin{aligned} F_z(\rho, \phi, z) &= A_{mn} J_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \\ &\quad \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] \end{aligned} \quad (\text{A.54})$$

$$E_\phi = \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial F_z}{\partial \rho} \quad (\text{A.55})$$

$$E_\phi = \beta_\rho \frac{A_{mn}}{\epsilon} J'_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \\ \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] \quad (\text{A.56})$$

$$E_\phi(\rho = a, \phi, z) = \beta_\rho \frac{A_{mn}}{\epsilon} J'_m(\beta_\rho a) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \\ \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] = 0 \quad (\text{A.57})$$

$$J'_m(\beta_\rho a) = 0 \Rightarrow \beta_\rho a = \chi_{mn}' \Rightarrow \beta_\rho = \frac{\chi'_{mn}}{a} \quad (\text{A.58})$$

χ_{mn}' Bessel fonksiyonunun ilk türünün (J_m) türevinin n 'inci kökünü ifade etmektedir. β_z bulmak için başka bir sınır şartına daha ihtiyaç duyuyor ve bu sınır şartı aşağıdaki gibi ifade edilebilinir;

$$E_\rho(0 \leq \rho \leq a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z = 0) = E_\rho(0 \leq \rho \leq a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z = h) = 0 \quad (\text{A.59})$$

$$E_\phi(0 \leq \rho \leq a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z = 0) = E_\phi(0 \leq \rho \leq a, 0 \leq \phi \leq 2\pi, z = h) = 0 \quad (\text{A.60})$$

Yukarıda verilen sınır şartları uygulandığında

$$E_\phi(\rho = a, \phi, z) = \beta_\rho \frac{A_{mn}}{\epsilon} J'_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \\ \times [C_3(1) + D_3(0)] = 0 \quad (\text{A.61})$$

$$\Rightarrow C_3 = 0$$

$$E_\phi(\rho = a, \phi, z) = \beta_\rho \frac{A_{mn}}{\epsilon} J'_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \\ \times [D_3 \sin(\beta_z h)] = 0 \quad (\text{A.62})$$

$$\sin(\beta_z h) = 0 \Rightarrow \beta_z h = \sin^{-1}(0) = p\pi \quad (\text{A.63})$$

$$\beta_z = \frac{p\pi}{h} \Rightarrow p = 1, 2, 3 \dots \quad (\text{A.64})$$

$$(f_r)^{TE_{mnp}^z} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu}\epsilon} \sqrt{(\frac{\chi'_{mn}}{a})^2 + (\frac{p\pi}{h})^2} \quad (\text{A.65})$$

ifadeleri elde edilir.

TM modu

TM modu için çözümler **A** ve **F**'yi aşağıdaki gibi yazarak elde edilebilinir;

$$\mathbf{A} = \hat{a}_z A_z(\rho, \phi, z) \quad (\text{A.66})$$

$$\mathbf{F} = 0 \quad (\text{A.67})$$

$$H_\rho = \frac{1}{\mu\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \phi} \quad (\text{A.68})$$

$$H_\phi = -\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial \rho} \quad (\text{A.69})$$

$$H_z = 0 \quad (\text{A.70})$$

$$E_\rho = -j \frac{1}{\omega\mu\varepsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} \quad (\text{A.71})$$

$$E_\phi = -j \frac{1}{\omega\mu\varepsilon\rho} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi \partial z} \quad (\text{A.72})$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega\mu\varepsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) A_z \quad (\text{A.73})$$

$$\begin{aligned} A_z(\rho, \phi, z) &= B_{mn} J_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \\ &\quad \times [C_3 \cos(\beta_z z) + D_3 \sin(\beta_z z)] \end{aligned} \quad (\text{A.74})$$

$$\begin{aligned} \beta_\rho &= \frac{\chi_{mn}}{a} \\ m &= 0, 1, 2, 3 \dots \end{aligned} \quad (\text{A.75})$$

$$\begin{aligned} E_\phi(\rho, \phi, z) &= -j B_{mn} \frac{m\beta_z}{\omega\mu\varepsilon} \frac{1}{\rho} J_m(\beta_\rho \rho) \times [-C_2 \sin(m\phi) + D_2 \cos(m\phi)] \\ &\quad \times [-C_3 \sin(\beta_z z) + D_3 \cos(\beta_z z)] \end{aligned} \quad (\text{A.76})$$

Eğer bir önceki bölümdeki sınır şartları yeniden uygulanırsa;

$$\begin{aligned} E_\phi(\rho, \phi, z) &= -j B_{mn} \frac{m\beta_z}{\omega\mu\varepsilon} \frac{1}{\rho} J_m(\beta_\rho \rho) \times [-C_2 \sin(m\phi) + D_2 \cos(m\phi)] \\ &\quad \times [-C_3(0) + D_3(1)] = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.77})$$

$$\Rightarrow D_3 = 0$$

ve $z = h$ için

$$\begin{aligned} E_\phi(\rho, \phi, h) &= j B_{mn} \frac{m\beta_z}{\omega\mu\varepsilon} \frac{1}{\rho} J_m(\beta_\rho \rho) \times [-C_2 \sin(m\phi) + D_2 \cos(m\phi)] \\ &\quad \times [C_3 \sin(\beta_z h)] = 0 \end{aligned} \quad (\text{A.78})$$

$$\sin(\beta_z h) = 0 \Rightarrow \beta_z h = p\pi \quad (\text{A.79})$$

$$\beta_z = \frac{p\pi}{h} \Rightarrow p = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (\text{A.80})$$

$$A_z(\rho, \phi, z) = B_{mn} J_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \times C_3 \cos(\beta_z z) \quad (\text{A.81})$$

$$(f_r)_{mnp}^{TM^z} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{\chi_{mn}}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{h}\right)^2} \quad (\text{A.82})$$

TM_{011} Modu için Örnek Çözüm

Bu bölümde TM_{011} modunda çalışan silindirik bir kavitenin elektrik alan dağılımı için çözüm yapılacaktır.

$$A_z(\rho, \phi, z) = B_{mn} J_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \times C_3 \cos(\beta_z z) \quad (\text{A.83})$$

$$E_\rho = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \rho \partial z} \quad (\text{A.84})$$

$$E_\phi = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon \rho} \frac{\partial^2 A_z}{\partial \phi \partial z} \quad (\text{A.85})$$

$$E_z = -j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \beta^2 \right) A_z \quad (\text{A.86})$$

$$(\text{A.87})$$

$$\beta_\rho = \frac{\chi_{mn}}{a} \quad (\text{A.88})$$

$$\beta_z = \frac{p\pi}{h} \quad (\text{A.89})$$

$$\beta^2 = \beta_\rho^2 + \beta_z^2 \quad (\text{A.90})$$

$$E_\rho = j \frac{B_{mn} \beta_z}{\omega \mu \epsilon} [J_m(\beta_\rho \rho)]' \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \times C_3 \sin(\beta_z z) \quad (\text{A.91})$$

Burada Bessel fonksiyonun özelliği kullanılırsa;

$$[J_m(\beta_\rho \rho)]' = -\beta_\rho J_{m+1}(\beta_\rho \rho) + \frac{m}{\rho} J_m(\beta_\rho \rho) \quad (\text{A.92})$$

$$E_\rho = j \frac{B_{mn} \beta_z}{\omega \mu \epsilon} \left[-\beta_\rho J_{m+1}(\beta_\rho \rho) + \frac{m}{\rho} J_m(\beta_\rho \rho) \right] \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \times C_3 \sin(\beta_z z) \quad (\text{A.93})$$

elde edilir ve denklemde $TM_{mnp}=TM_{011}$ değişikliği yapıp sabitleri B_{mn} terimi altında toplarsak;

$$E_\rho = -j \frac{B_{01} \beta_z \beta_\rho}{\omega \mu \epsilon} J_1(\beta_\rho \rho) \sin(\beta_z z) \quad (\text{A.94})$$

$$E_z = j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} B_{mn} J_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \times \beta_z^2 C_3 \cos(\beta_z z) \\ - j \frac{1}{\omega \mu \epsilon} (\beta_z^2 + \beta_\rho^2) B_{mn} J_m(\beta_\rho \rho) \times [C_2 \cos(m\phi) + D_2 \sin(m\phi)] \times C_3 \cos(\beta_z z) \quad (\text{A.95})$$

$$E_z = -j \frac{\beta_\rho^2}{\omega \mu \epsilon} B_{01} J_0(\beta_\rho \rho) \cos(\beta_z z) \quad (\text{A.96})$$

$$E_\phi = jB_{mn} \frac{m\beta_z}{\omega\mu\varepsilon\rho} \frac{1}{\rho} J_m(\beta_\rho \rho) \times [-C_2 \sin(m\phi) + D_2 \cos(m\phi)] \times [C_3 \sin(\beta_z z)] \quad (\text{A.97})$$

$m = 0 \Rightarrow E_\phi = 0$

ve E_ρ, E_z

$$-j \frac{\beta_\rho^2}{\omega\mu\varepsilon}$$

ile normalize edilirse;

$$E_z = B_{01} J_0 \left(\frac{\chi_{01}}{a} \rho \right) \cos \left(\frac{\pi}{h} \right) \quad (\text{A.98})$$

$$E_\rho = B_{01} \frac{\pi a}{\chi_{01} h} J_1 \left(\frac{\chi_{01}}{a} \rho \right) \sin \left(\frac{\pi}{h} \right) \quad (\text{A.99})$$

Elektrik alan bileşenleri bulunmuş olur.

Rezonans Kavite Kalite Faktörü

$$Q = \omega \frac{W}{P_d} \quad (\text{A.100})$$

$$W = \frac{\varepsilon}{2} \iiint_V |\mathbf{E}|^2 dV \quad (\text{A.101})$$

$$W = \left(\frac{\pi \varepsilon h a^2}{4} \right) \left(\frac{B_{011}}{\omega \mu \varepsilon} \right)^2 \left(\frac{\chi_{01}}{a} \right)^2 J_1^2(\chi_{01}) \left[\left(\frac{\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{\chi_{01}}{a} \right)^2 \right] \quad (\text{A.102})$$

$$P_d = \frac{R_s}{2} \iint_S |\mathbf{H}|^2 d\bar{S} \quad (\text{A.103})$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \quad (\text{A.104})$$

$$P_d = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma}} \left(\frac{B_{011}}{\mu} \right)^2 \left(\frac{\chi_{01}}{a} \right)^2 J_1^2(\chi_{01}) [h^2 + 2a^2] \quad (\text{A.105})$$

$$Q = \frac{ha^2}{ha + 2a^2} \left(\frac{\sigma}{2} \right)^{1/2} \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right)^{1/4} \left[\left(\frac{\pi}{h} \right)^2 + \left(\frac{\chi_{01}}{a} \right)^2 \right]^{1/4} \quad (\text{A.106})$$

EK B

Elektron Sürekliklilik ve Akı Denklemleri

$$\nabla^2 n + \frac{v_{iz}}{D} n = 0 \quad (\text{B.1})$$

Elektron süreklilik denklemi Denklem **B.2** $n(r, \phi, \theta)$ olmak üzere küresel koordinatlarda yazılsrsa;

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial n}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial n}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 n}{\partial \phi^2} + k^2 n = 0 \quad (\text{B.2})$$

Denklem **B.2** çarpanlara ayırma yöntemi kullanılarak çözülebilir. Bu denklemde $n(r, \phi, \theta) = F(r)\Theta(\theta)\varphi(\phi)$ olarak ifade edildiğinde Denklem **B.2**'yi tekrar yazar ve eşitliğin her iki tarafını $\frac{r^2}{F\Theta\varphi}$ ile çarparsak;

$$\frac{1}{F} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dF}{dr} \right) + k^2 r^2 + \frac{1}{\Theta \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) + \frac{1}{\varphi \sin^2 \theta} \frac{d^2 \varphi}{d\phi^2} = 0 \quad (\text{B.3})$$

sadece radyal bileşenleri içeren ifadeyi denklemden çekersek;

$$r^2 \frac{d^2 F}{dr^2} + 2r \frac{dF}{dr} + F k^2 r^2 = 0 \quad (\text{B.4})$$

$kr = x$ ifadesini kullanırsak;

$$\frac{dF}{dr} = \frac{dF}{dx} k \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{d^2 F}{dr^2} = \frac{d^2 F}{dx^2} k^2 \quad (\text{B.6})$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadeleri yerine yazarsak;

$$x^2 \frac{d^2 F}{dx^2} + 2x \frac{dF}{dx} + F x^2 = 0 \quad (\text{B.7})$$

denklemi elde edilir ve bu denklem bir küresel Bessel denklemidir. Bu denklemenin çözümü

$$j_0(x) = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2x}\right)} J_{1/2}(x) \quad (\text{B.8})$$

şeklinde ifade edilebilir.

$$j_0(kr) = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2kr}\right)} J_{1/2}(kr) \quad (\text{B.9})$$

$$n(r) = A \sqrt{\frac{\pi}{2kr}} J_{1/2}(kr) \quad (\text{B.10})$$

$r = 0$ 'da denklemi tekrar yazarsak;

$$n(0) = n_0 = A j_0(0) = A \quad (\text{B.11})$$

$r = R$ ise

$$n(R) = n_0 j_0(kR) = 0 \Rightarrow kR = \pi \quad (\text{B.12})$$

$$n(r) = n_0 \sqrt{\frac{R}{2r}} J_{1/2}\left(\frac{\pi}{R}r\right) \quad (\text{B.13})$$

elde edilir. Ayrıca Bessel foksiyonu için aşağıdaki eşitlik denklemin çözümnesini kolaylaştıracaktır.

$$J_{1/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin(x) \quad (\text{B.14})$$

$$J_{1/2}\left(\frac{\pi}{R}r\right) = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2R}{r}} \sin\left(\frac{\pi}{R}r\right) \quad (\text{B.15})$$

$$n(r) = \frac{n_0 R}{\pi r} \sin\left(\frac{\pi}{R}r\right) \quad (\text{B.16})$$

Plazma modelinde elektron yoğunluğunun hacimsel ortalaması kullanılmıştır. Hacimsel ortalama aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$n_e = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \int_0^R n(r) r^2 \sin\theta dr d\theta d\phi}{\forall_p} = \frac{3n_0}{\pi^2} \quad (\text{B.17})$$

elde edilir. Plazma duvarlarından gaz içerisine olan elektron akısı;

$$\Gamma_r = -D \frac{dn}{dr} = \frac{-Dn_0 R}{\pi} \left[\frac{\pi \cos(\pi r/R)}{Rr} - \frac{\sin(\pi r/R)}{r^2} \right] \quad (\text{B.18})$$

Yüzeylerden akan toplam akı;

$$\Gamma_T = \iint_S \Gamma_r dA = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \Gamma_r r^2 \sin\theta d\theta d\phi = 4\pi D R n_0 \quad (\text{B.19})$$

Elektronlar için süreklilik denklemini yazmak için hacim içerisinde iyonizasyonla ortaya çıkan toplam elektron sayısını toplam akı ile gaz içerisine karışana eşitlersek,

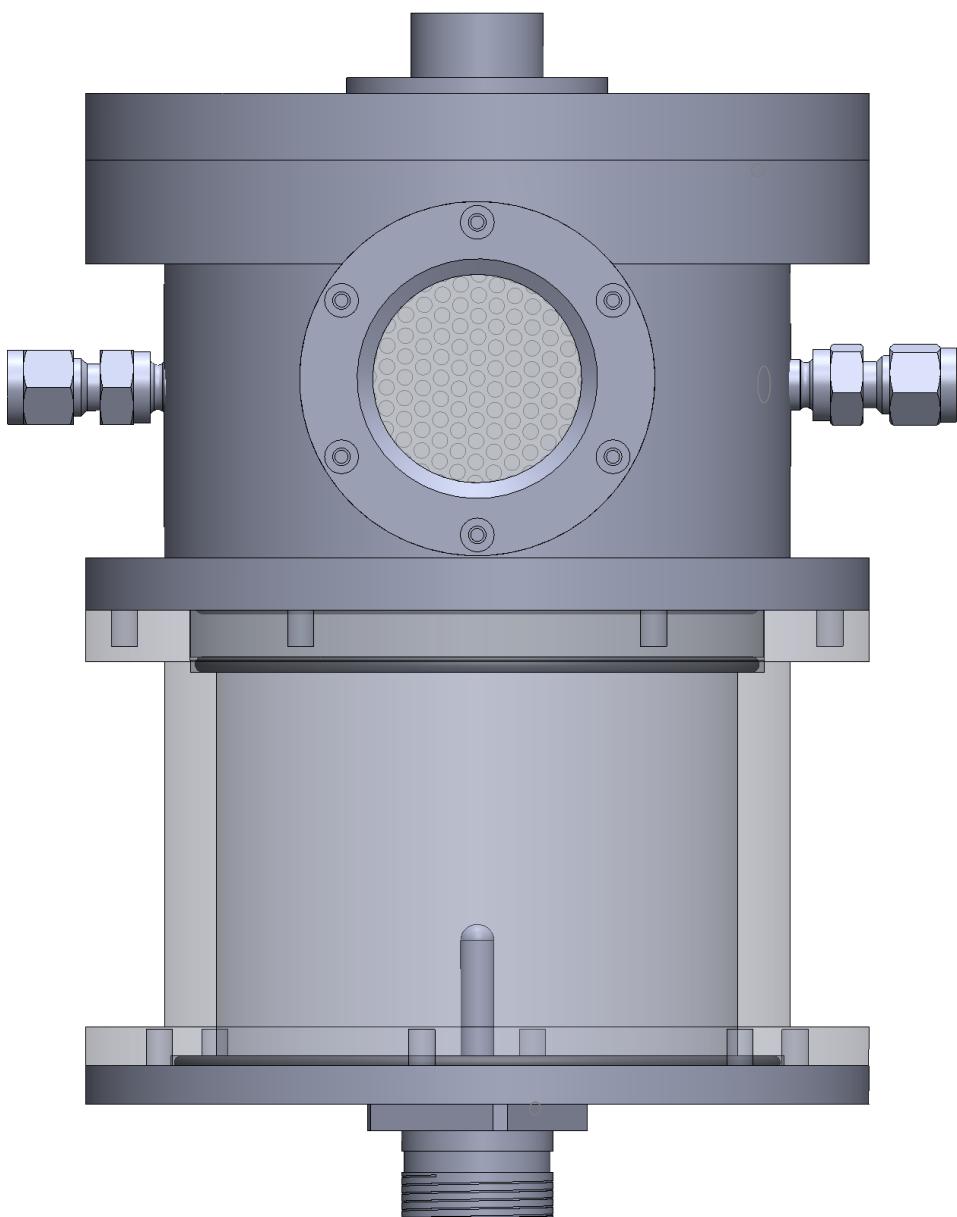
$$\Gamma_T = n_e v_{iz} \forall_p \quad (\text{B.20})$$

$$D - v_{iz} \frac{R^2}{\pi^2} = 0 \quad (\text{B.21})$$

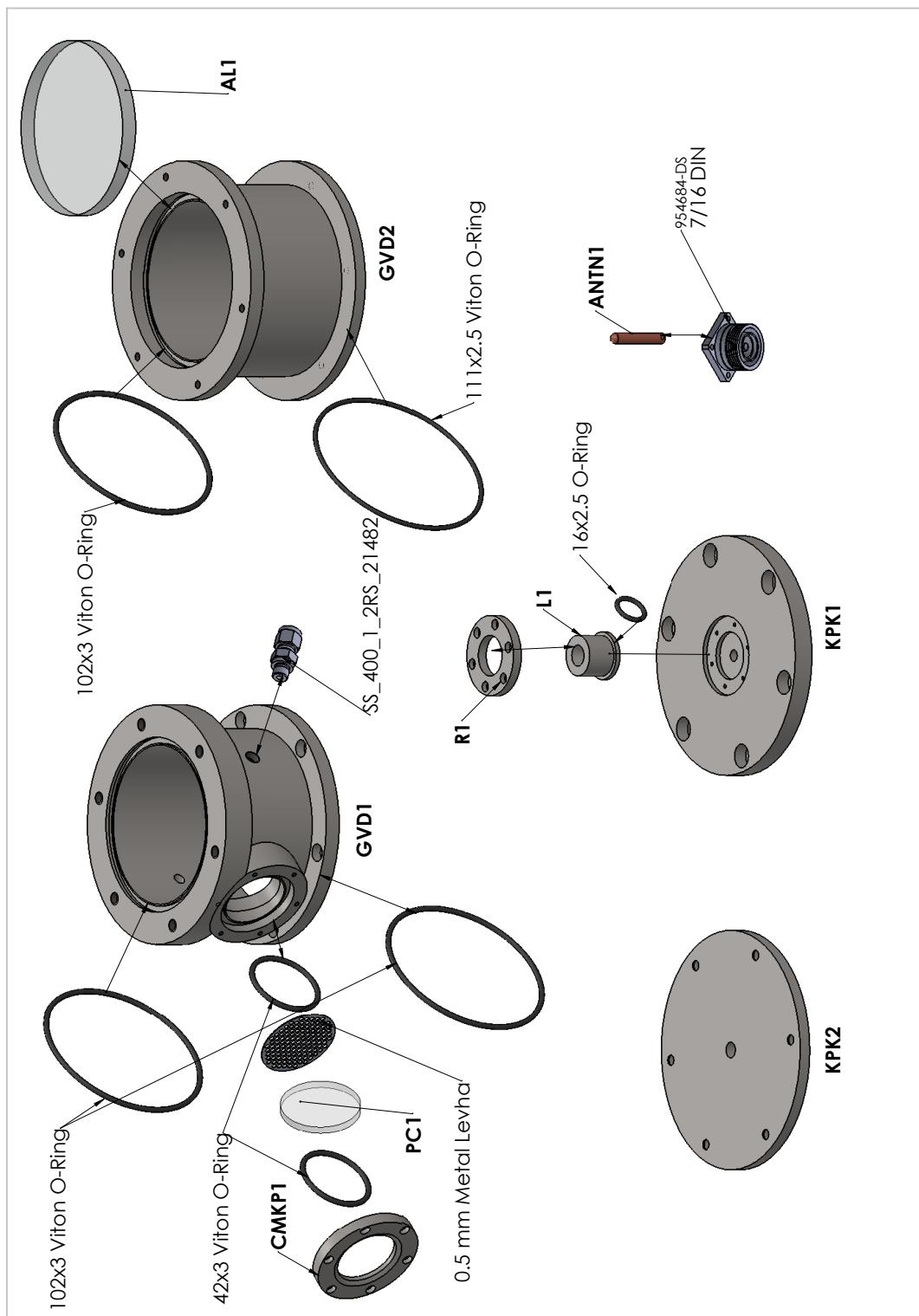
elde edilecektir.

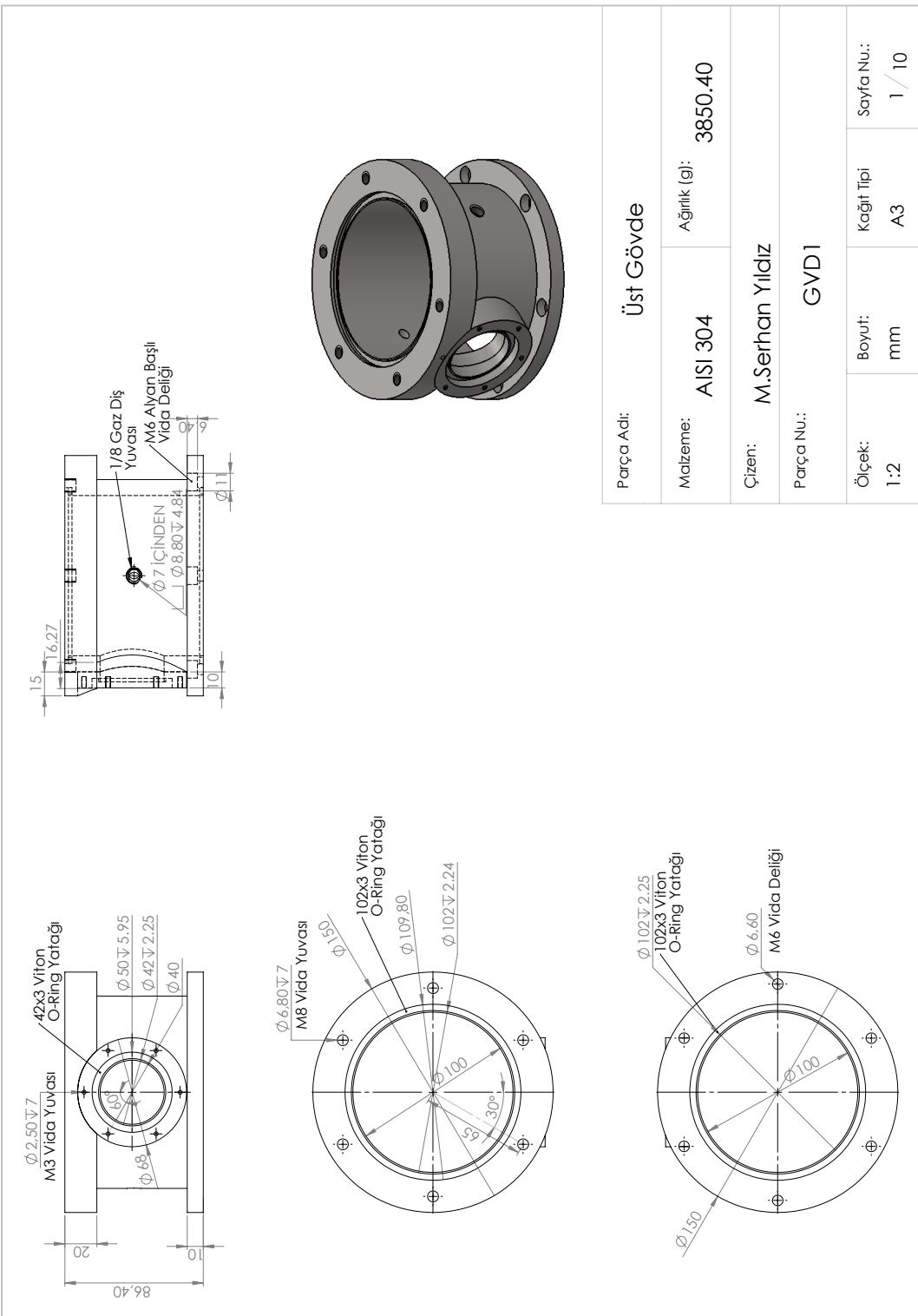
EK C

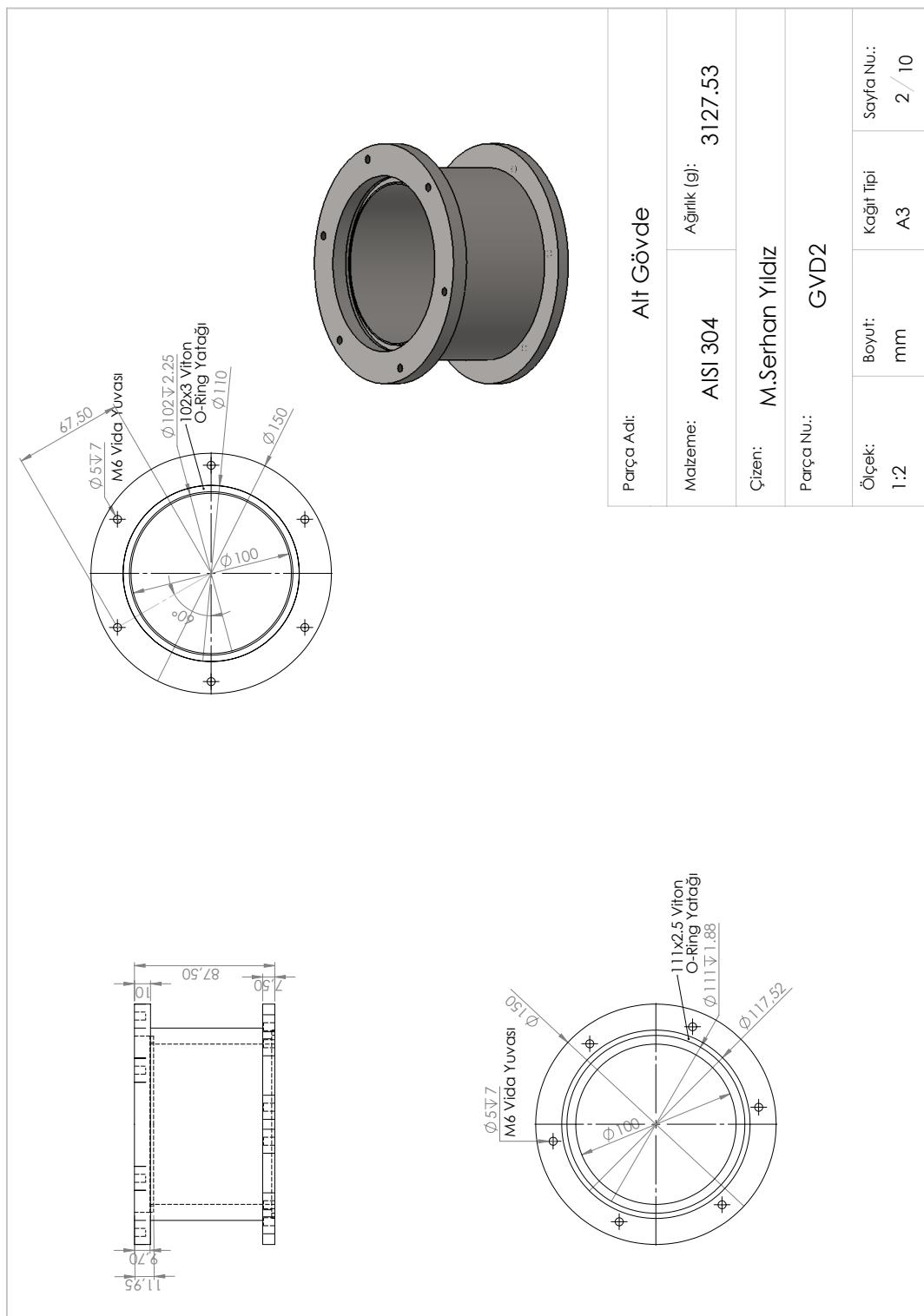
BUSTLab MET Teknik Resimleri

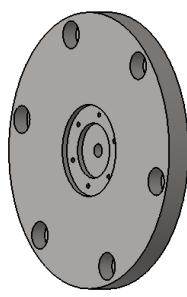
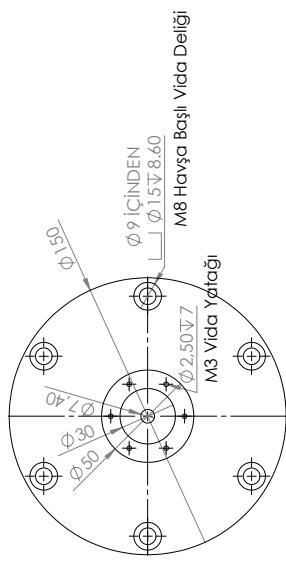


BUSTLab MET

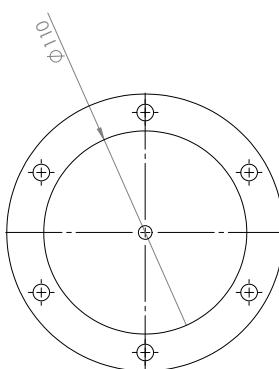
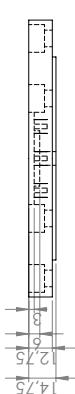


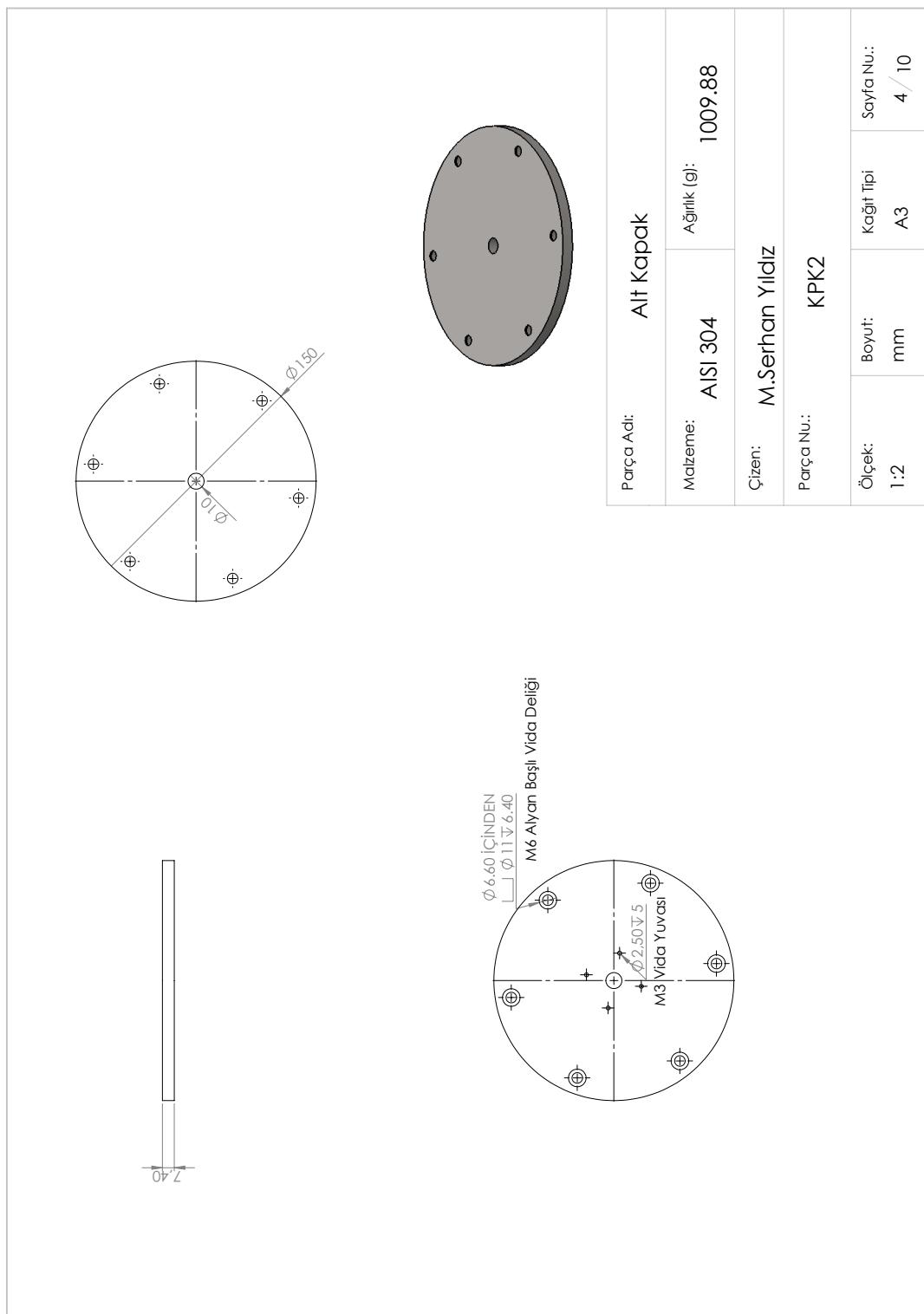


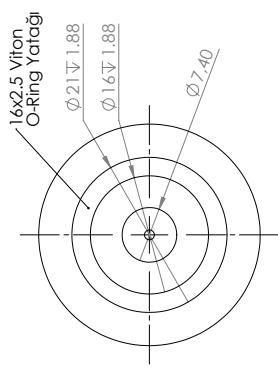
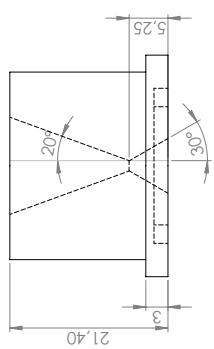
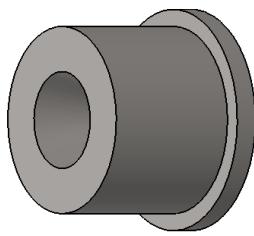
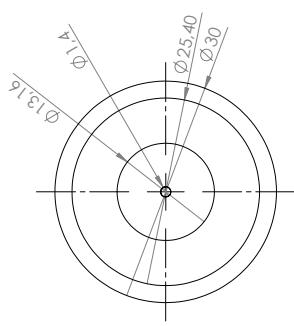




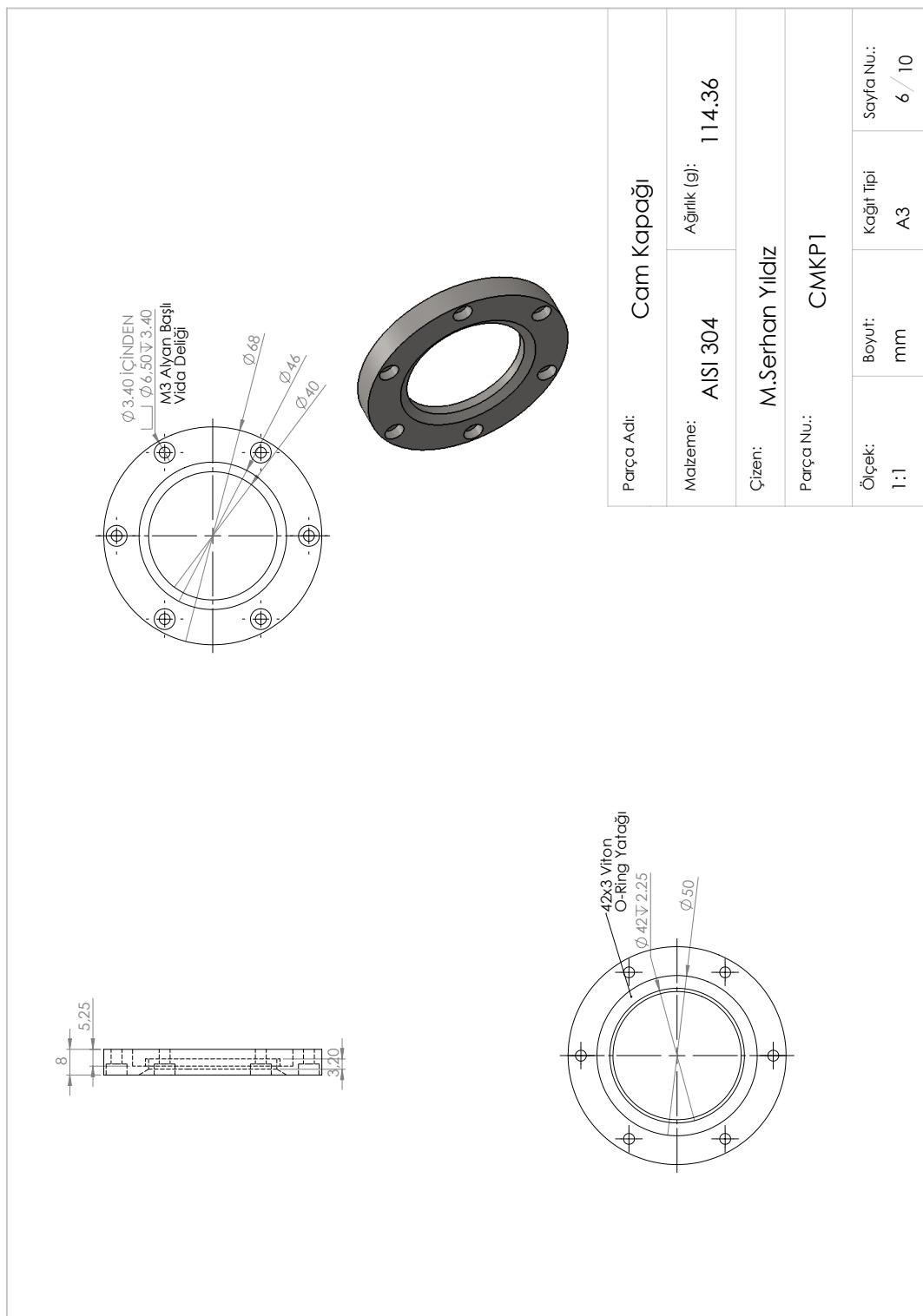
Parça Adı:	Üst Kapak		
Malzeme:	AlSi 304	Ağırlık (g):	1800.17
Çizen:	M.Serhan Yıldız		
Parça Nu.:	KPK1		

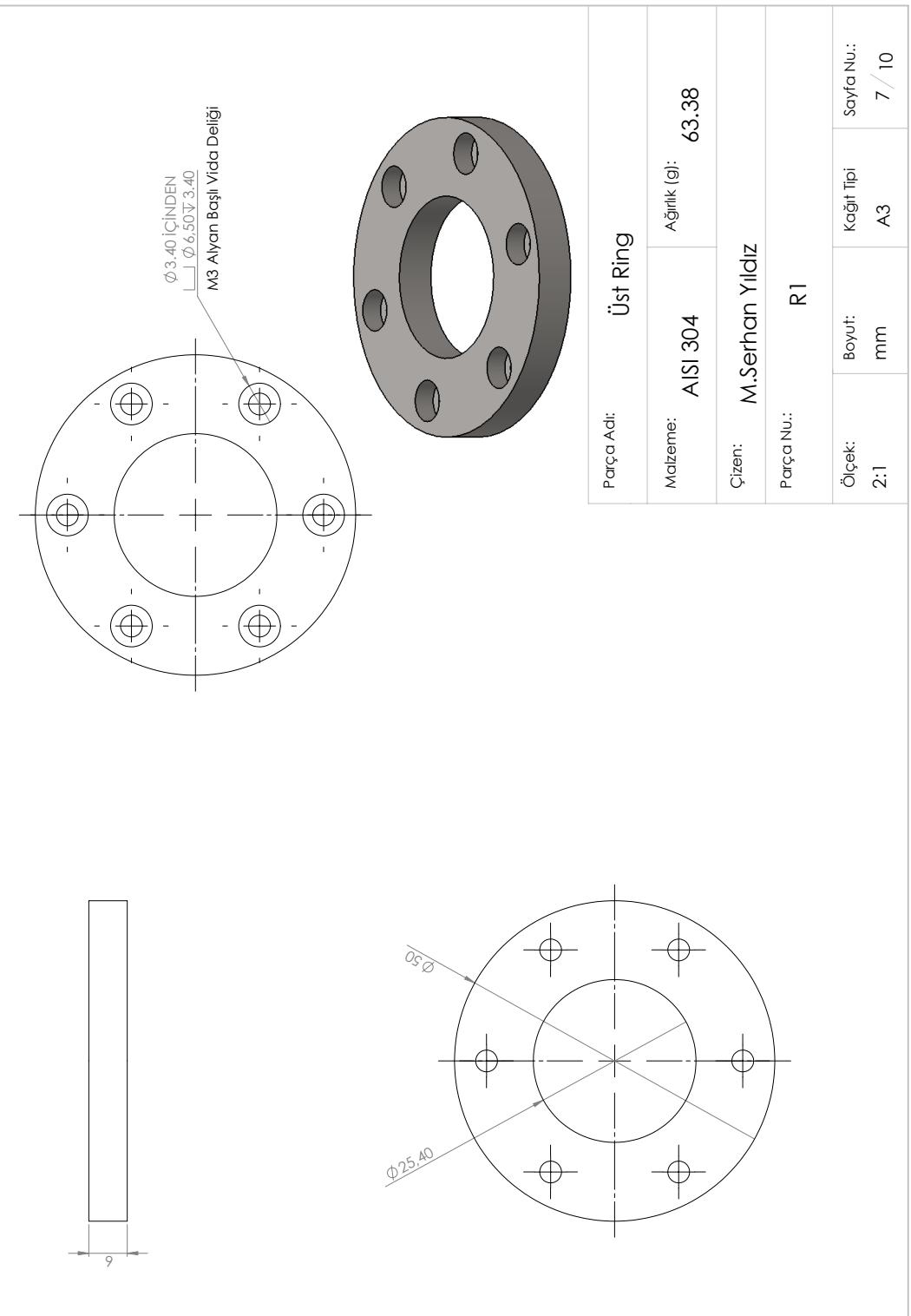


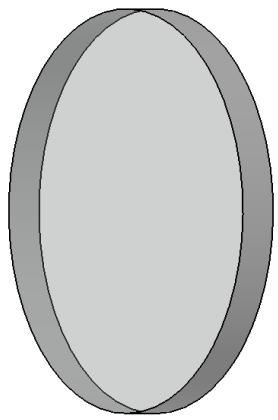




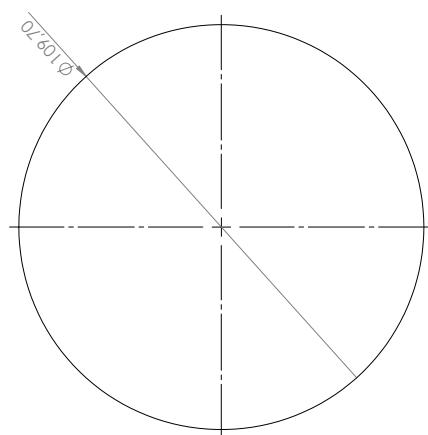
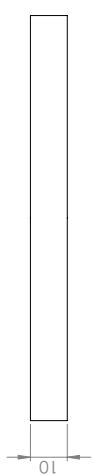
Parça Adı:	Lüle		
Malzeme:	AlSi 304	Ağırlık (g):	82.08
Çizen:	M.Serhan Yıldız		
Parça Nu.:	L1		

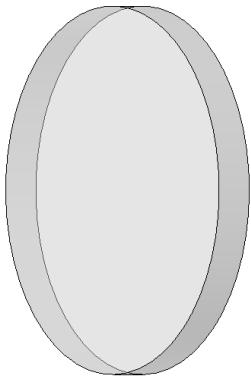




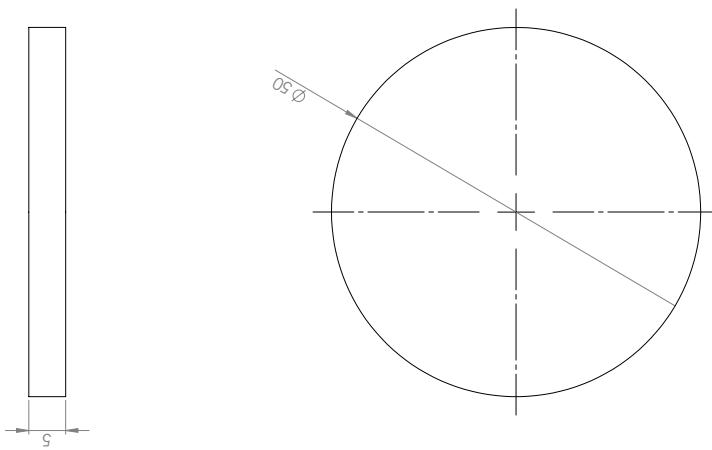


Parça Adı:	Ayırma Levhası		
Malzeme:	Kuvârs	Ağırlık (g):	250.37
Çizen:	M.Serhan Yıldız		
Parça Nu.:	AL1		
Ölçek:	Boyut: mm	Kağıt Tipi: A3	Sayfa Nu.: 8 / 10





Parça Adı:	Pencere Camı		
Malzeme:	Cam	Ağırlık (g):	24.54
Çizen:	M.Serhan Yıldız		
Parça Nu.:	PC1		
Ölçek:	Boyut: 2:1	Kağıt Tipi: A3	Sayfa Nu.: 9 / 10

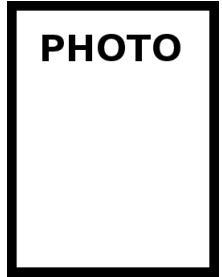




Parça Adı:	Anten		
Malzeme:	Bakır	Ağırlık (g):	10.41
Çizen:	M.Serhan Yıldız		
Parça Nu.:	ANTN1		
Ölçek:	Boyut: mm	Kağıt Tipi:	Sayfa Nu.:
2:1		A3	10 / 10



$\varnothing 2,50 \text{ mm}$ M3 Vida Yuvası



PHOTO

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Mehmet Serhan Yıldız

Doğum Yeri ve Tarihi: Konya, 13 Nisan 1980

Adres: Hava Harp Okulu K.lığı Yeşilyurt/İstanbul

E-Posta: syildiz@hho.edu.tr

Lisans: Havacılık Mühendisliği/Hava Harp Okulu, İstanbul

Y. Lisans: Uzay Bilimleri/Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, İstanbul

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Hava Harp Okulu Havacılık Mühendisliği, 1999-2003
- Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü Uzay Bilimleri Yüksek Lisans Programı Mezuniyeti, 2007-2009
- Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü Uzay Bilimleri Doktora Programı, 2011-
- Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü Öğrenci İşleri Subaylığı, 2014-
- 7'nci Uluslararası Uzay Teknolojilerindeki Son Gelişmeler-RAST2015 Konferansı Proje Subaylığı ve Organizasyon Komitesi Üyeliği, 2015
- "Uzay İtki Sistemi Olarak Mikrodalga İtki Sistemi Tasarımı, Üretimi ve Performans Analizi" TÜBİTAK 214M572 Projesinde doktora öğrenciliği, 2015-2016

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Yıldız Mehmet Serhan**, Celik Murat, 2014: "Numerical Study of Plasma Effect on Electric Field Distribution in 2.45 GHz Microwave Electrothermal Thruster Resonant Cavity", *1st International Middle East Plasma Science Conference*, 23 – 25 April 2014 Antalya, Turkey.
- **Yıldız Mehmet Serhan**, Ünalı Numan ve Celik Murat, 2014: "Geometry Optimization of a 2.45 GHz Microwave Electrothermal Thruster Resonant Cavity", *4th Space Propulsion Conference*, SP2014-2980822, May 19-22, 2014 Colonge, Germany.
- **Yıldız Mehmet Serhan**, Celik Murat, 2015: "Global Energy Transfer Model of Microwave Induced Plasma in a Microwave Electrothermal Thruster Resonant Cavity", *34th International Electric Propulsion Conference*, IEPC-2015-266, July 4–10, 2015, Hyogo-Kobe, Japan.
- **Yıldız M. Serhan**, Ünal A. Nadi, Özkan Ömer, Koç İbrahim, Celik Murat, 2015: "Electrothermal Propulsion System Selection for Communication Satellite NSSK Maneuver Using Multi Criteria Decision Making Method", *7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies-RAST2017*, June 16-19, 2015

Istanbul, Turkey.

- **Yıldız Mehmet Serhan**, Celik Murat, 2015: "Evaluation of Plasma Properties in a Microwave Electrothermal Thruster Resonant Cavity Using Two Fluid Global Model", *51st Joint Propulsion Conference*, AIAA 2015-3926, July 27-29, 2015, Orlando, FL.
- **Yıldız Mehmet Serhan**, Celik Murat, 2016: "Experimental Performance Analysis of the BUSTLab Microwave Electrothermal Thruster", *52nd Joint Propulsion Conference*, AIAA 2016-4949, July 25-27, 2016, Salt Lake City, UT.
- **Yıldız Mehmet Serhan**, Celik Murat, "Global Energy Transfer Model of a Microwave Electrothermal Thruster Operating with Helium Propellant at 2.45 GHz Frequency", *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE* (İnceleme aşamasında)