

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HALL İTME MOTORLARININ BOYUTLARINA GÖRE
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OKAN SÖNMEZ

1109151002

ANABİLİM DALI: FİZİK

PROGRAMI: FİZİK

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. AYŞEGÜL YILMAZ

HAZİRAN 2014

T.C. İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HALL İTME MOTORLARININ BOYUTLARINA GÖRE
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OKAN SÖNMEZ

1109151002

Tezin Enstitüye Teslim Edildiği Tarih: 6 Haziran 2014

Tezin Savunulduğu Tarih: 23 Haziran 2014

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Ayşegül YILMAZ (İ.K.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri:

Prof. Dr. Sevim AKYÜZ (İ.K.Ü)

Doç. Dr. Göksel ESMER DAYLAN (İ.Ü)

HAZİRAN 2014

ÖNSÖZ

Bu projenin hazırlanmasında ve sunulmasında başından sonuna kadar yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Ayşegül YILMAZ' a sonsuz teşekkürlerimi arz ederim.

Ayrıca tüm yaşamım boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen sevgili aileme de şükranlarımı arz etmeyi bir borç bilirim.

06.2014

Okan SÖNMEZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
SİMGE LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xiv
BİRİNCİ BÖLÜM.....	1
1. GİRİŞ	1
1.1. HALL İTME MOTORLARI HAKKINDA BAZI TEMEL BİLGİLER	1
1.2. SABİT PLAZMA İTİCİLERİ (SPT)	2
1.2.1. SPT' NİN SAHİP OLDUĞU BAZI AVANTAJLAR.....	4
1.3. HALL İTME MOTORLARININ ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	4
1.4. HET ÜZERİNE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
İKİNCİ BÖLÜM.....	6
2. TEK YÜKLÜ BİR PLAZMA İÇİN HALL İTME MOTORLARINDA VERİM VE PERFORMANSIN İNCELENMESİ.....	6
2.1. VERİM	6
2.1.1. ANOT KULLANIM VERİMİ.....	7
2.1.2. AKIM KULLANIM VERİMİ	7
2.1.3. KÜTLE KULLANIM VERİMİ.....	8
2.1.4. VOLTAJ KULLANIM VERİMİ.....	9

2.2. PERFORMANS	10
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	12
3. BAŞLICA DENEYSEL ALETLER VE UZAY ARACI TAHRİK SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ	12
3.1. BAŞLICA DENEYSEL ALETLER.....	12
3.1.1. HALL İTME MOTORU.....	12
3.1.2. VAKUM TESİSİ	13
3.1.3. İTME MOTORU STANDI.....	14
3.1.4. FARADAY PROBU.....	15
3.1.5. DEŞARJ PROBU	17
3.1.6. HALL PROBU VE GAUSSMETRE	17
3.2. UZAY ARACI TAHRİK SİSTEMLERİ	18
3.2.1. KİMYASAL TAHRİK SİSTEMLİ UZAY ARAÇLARI.....	18
3.2.2. ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMLİ UZAY ARAÇLARI	18
3.2.2.1. NİÇİN ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMLERİ	18
3.2.3. ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMLERİNE KARŞIN KİMYASAL TAHRİK SİSTEMLERİ	20
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	21
4. HET İÇİN PLAZMA PARAMETRELERİNİN BULUNMASI VE SİSTEMİN GÜCÜ	21
BEŞİNCİ BÖLÜM	24
5. METODOLOJİ	24
5.1. SOĞAN MODELİ.....	24
5.2. SOĞAN MODELİNİ KULLANARAK PERFORMANS PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI	25
5.2.1. İTME KUVVETİ.....	25

5.2.2. KÜTLE AKIŞI.....	27
5.2.3. SPESİFİK İMPULS.....	27
5.2.4. SAYISAL YOĞUNLUK.....	28
5.2.5. VOLTAJ, VOLTAJ VERİMİ VE İYON AKIMI.....	28
ALTINCI BÖLÜM	29
6. BULGULAR	29
YEDİNCİ BÖLÜM	38
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	38
KAYNAKLAR	39
EKLER.....	42
EK-1.....	42
EK-2.....	49
EK-3.....	56
ÖZGEÇMİŞ.....	63

KISALTMALAR

HET	=	Hall İtme Motoru (Hall Effect Thruster)
SPT	=	Sabit Plazmalı İtme Motorları (Stationary Plasma Thruster)
SEP	=	Güneş Enerjili Elektrik Tahrik Sistemi (Solar Electric Propulsion System)
EPS	=	Elektrik Tahrik Sistemli Uzay Araçları (Electric Propulsion System)
PPU	=	Güç İşlem Birimi (Power Processing Unit),
PMS	=	Yakıt Yönetim Sistemi (Propellant Management System)
NEP	=	Nükleer Elektrik Tahrik Sistemi (Nuclear Electric Propulsion System)

TABLO LİSTESİ

Tablo 1.1 SPT Tarihi	2
Tablo 3.1 Faraday Probu oluşturulurken kullanılan parçaların boyutları.	15
Tablo 6.1 Tablo 6.1. Üç farklı itme motoru için, performans parametrelerinin karşılaştırılması	37

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 SPT Güç ve itme.	4
Şekil 3.1 NASA-173Mv2 Hall itme motorunun bir fotoğrafı	12
Şekil 3.2 Vakum Tesisinin Şematik Bir Resmi	13
Şekil 3.3 Şekil’ de, iyon akım yoğunluluğunu ölçen faday propları, itme motorunun standı ve itme motor standı üzerinde bulunan NASA 173Mv2 itme motoru ve Vakum tesisi yer almakatadır	14
Şekil 3.4 Faraday probunun şematik gösterimi ve bir fotoğrafı.	15
Şekil 3.5 Faraday probu Elektirksel Şeması	16
Şekil 5.1 Bir Hall İtme Motorunda Meydana Gelen Pülüm Resmi	24
Şekil 6.1 HET-100-ALTA İçin, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen itme kuvvetinin, pülüm boyunca değişim grafiği	29
Şekil 6.2 HET-100-ALTA İçin, soğan modelinin modelinin kullanılmasıyla elde edilen kütle akışının, pülüm boyunca değişim grafiği.	30
Şekil 6.3 HET-100-ALTA İçin, soğan modelinin modelinin kullanılmasıyla elde edilen kapa sabitinin, pülüm boyunca değişim grafiği.....	30
Şekil 6.4 HET-100-ALTA da, itme motoruna uygulanan farklı giriş voltajları için, pülüm boyunca oluşan itme kuvvetinin değişim grafiği..	31
Şekil 6.5 HET-100-ALTA da, farklı voltaj verim değerleri için, itme motorunun pülümünde oluşturulan itme kuvvetinin değişim grafiği.	31
Şekil 6.6 SPT-30 için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen itme kuvvetinin, pülüm boyunca değişim grafiği	32
Şekil 6.7 SPT-30 için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kütle akışının, pülüm boyunca değişim grafiği.i	32

Şekil 6.8 SPT-30 da, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kapa sabitinin, pülüm boyunca değişim grafiği.....	33
Şekil 6.9 SPT-30 da, itme motoruna uygulanan farklı giriş voltajları için, pülüm boyunca oluşan itme kuvvetinin değişim grafiği.	33
Şekil 6.10 SPT-30 da, farklı voltaj verim değerleri için, itme motorunun pülümünde oluşturulan itme kuvvetinin değişim grafiği.	34
Şekil 6.11 ALTA-2 KW içi, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen itme kuvvetinin, pülüm boyunca değişim grafiği	34
Şekil 6.12 ALTA-2 KW için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kütle akışının, pülüm boyunca değişim grafiği.....	35
Şekil 6.13 ALTA-2 KW için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kapa sabitinin, pülüm boyunca değişim grafiği.....	35
Şekil 6.14 ALTA-2 KW da, itme motoruna uygulanan farklı giriş voltajları için, pülüm boyunca oluşan itme kuvvetinin değişim grafiği.	36
Şekil 6.15 ALTA-2 KW da, farklı voltaj verim değerleri için, itme motorunun pülümünde oluşturulan itme kuvvetinin değişim grafiği.....	36

SİMGE LİSTESİ

SABİTLER

g	=	gravitasyonel kütle çekim kuvveti, 9,80665	[m/s ²]
e	=	elektron yükü, $1,6022 \times 10^{-19}$	[C]
m_e	=	elektronun kütlesi, $9,1094 \times 10^{-31}$	[kg]
m_{Xe}	=	kisenon atomunun kütlesi, $2,18 \times 10^{-25}$	[kg]
ϵ	=	boş alan dielektrik sabiti, $8,8542 \times 10^{-12}$	[F/m]
μ	=	boş alan geçirgenliği, $1,25664 \times 10^{-6}$	[H/m]

DEĞİŞKENLER

A_{ex}	=	itme motorunun çıkışındaki kesit alan	[m ²]
\vec{E}	=	elektrik alan vektörü	[V/m]
E_r	=	elektrik alan vektörünün radyal bileşeni	[V/m]
E_z	=	elektrik alan vektörünün aksenal bileşeni	[V/m]
\vec{B}	=	manyetik alan vektörü	[T]
B_r	=	manyetik alan vektörünün radyal bileşeni	[T]
B_z	=	manyetik alan vektörünün aksenal bileşeni	[T]
η_a	=	anot verimi	[-]
η_q	=	yük kullanım verimi	[-]
η_v	=	voltaj kullanım verimi	[-]
η_b	=	akım kullanım verimi	[-]
η_m	=	kütle kullanım verimi	[-]

I_d	=	deşarj akımı	[A]
I_e	=	eksenel elektron akımı	[A]
I_b	=	iyon ışın akımı	[A]
I_{sp}	=	spesifik impuls	[A]
I_{sp}^+	=	tek iyon için spesifik impuls	[A]
$I_{sp,a}^+$	=	tek yüklü bir plazma için anot spesifik impulsu	[A]
\dot{m}	=	yakıtın kütle akış oranı	[kg/s]
\dot{m}_a	=	anot kütle akış oranı	[kg/s]
\dot{m}_b	=	iyon ışınının kütle akış oranı	[kg/s]
\dot{m}_n	=	nötral gazların kütle akış oranı	[kg/s]
\dot{m}_n^+	=	tek yüklü bir plazma için nötral gazların kütle akış oranı	[kg/s]
\dot{m}_b^+	=	tek yüklü bir plazma için iyon ışınının kütle akış oranı	[kg/s]
\dot{m}_t	=	iticideki toplam yakıtın kütle akış oranı	[kg/s]
\dot{m}_i	=	i' ninci dereceden iyon için kütle akış oranı	[kg/s]
P_d	=	deşarj gücü	[W]
i	=	iyon yük durum indeksi (1,2,3,...)	[-]
\vec{j}	=	akım yoğunluk vektörü	[A/m ²]
N	=	iyon türlerinin toplam sayısı	[-]
T	=	tahrik sistemi tarafından üretilen itme	[N]
$W = (dm/dt)g$	=	Birim zamandaki ağırlık	[kg/s]
ξ	=	Değişim oranı	[-]
\vec{v}_{exz}	=	taşıttan dışarı atılan parçacıkların ortalama hızı	[m/s]

\bar{v}_B	=	bohm hızı	[m/s]
Δv	=	Hızdaki artış	[m/s]
$\langle v_1^+ \rangle$	=	tek yüklü bir plazma için ortalama iyon hata hızı	[m/s]
V_d	=	deşarj voltajı	[V]
V_b	=	ortalama hızlanma voltajı	[V]
V_b^+	=	tek yüklü bir plazma için ortalama hızlanma voltajı	[V]
n_b	=	iyon sayısal yoğunluğu	[1/m ³]
n_e	=	elektron sayısal yoğunluğu	[1/m ³]
n_{ex}	=	çıkıştaki sayısal yoğunluk	[1/m ³]
ρ	=	itme motoru odacığının yarıçapı	[m]

ÖZET

Bu çalışmada Hall itme motorunun pülüm geometrisini geliştirmek için kullanılan, Soğan Modeli kullanılarak, Hall itme motorunun çeşitli performans parametreleri ve voltaj verimi incelenmiştir. Modelden elde edilen verilere göre, Hall itme motorunun pülmü boyunca oluşan itme kuvveti işlemi sırasında, belli bir aralıkta plazma parçacıklarının izlediği yolun eğri bir yol olduğu, daha sonra ise eğriliğin sıfıra çok çok yaklaşarak, bu parçacıkların paralel bir yol izlediği aşikar olarak ortaya konmakta, bu iniş ve çıkışların ise, oradaki çarpışmalardan kaynakladığı anlaşılmaktadır. Bu sonuç itibari ile de, model verileri ile literatürden alınan deney verilerinin örtüştüğü yine bu çalışmada ortaya konmaktadır.

SUMMARY

We studied the variations of performance parameters and voltage efficiency with the size of Hall thruster by using onion model developed for the geometry of the Hall thruster plume and experimental result corresponding to three mini-Hall thrusters. When the result from the model were compared with the experimental studies from literature, it was found that performance parameters and voltage efficiency of a mini-Hall thruster exhibit fluctuations on the hump of plume and remain constant along the tail of the plume and the size of hump depends on radial size of the thruster as expected. Also, the curvature of particle trajectories on the plume fluctuated in the hump and approaches to zero along the tail. To conclusion, in the hump region the collisions between the exhausted particles could lead to the higher curvature of radius. Along the tail the particles from beams, without making collisions. Numerical values of performance parameters in the tail are the same with the experimental values for a certain particle densities.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ

Hall itme motorları, 1950 yılında Eski Sovyetler Birliğinde ve Amerika Birleşik Devletlerinde, birbirinden bağımsız olarak, magnetronlar üzerinde yapılan çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Hall itme motorları, elektrik ve manyetik alanın etkileşmesi sonucu oluşan plazma kaynaklarıdır. Roket motorları olarak, uydunun istasyona kenetlenmesini ve de yörünge üzerinde çeşitli manevralar yapabilmesine olanak sağlamak için kullanılmaktadırlar [1,2].

1970' ler boyunca, Hall itme motorları çoğunlukla Amerika da ihmal edilen konumdaydı. Burada odaklanılan konu, çoğunlukla, iyon itme motorları için ızgaralı elektrik tahrik sistemleri üzerineydi. Çünkü, gezegenler arası yolculukta iyon itme motorlarının çok daha iyi bir görev aracı oldukları düşüncesi hakimdi. Diğer bir tarafta ise, Sovyetler Birliğinde araştırma ve geliştirme çalışmaları yoğun bir şekilde devam etmekteydi ve bu gayretler neticesini 1972 yılında gösterdi. Çeşili Sovyet uzay araçlarında bu cihazlar kullanılmaya başlandı. Yirmi yıldan daha fazla bir birikimle, etkili bir araştırma ve teknoloji biriktirildi. Bu dönem zarfındaki bu çalışmaların çok büyük bir bölümü yalnızca Rusyada yayımlandı [3]

1.1. HALL İTME MOTORLARI HAKKINDA BAZI TEMEL BİLGİLER

Literatürde Hall itme motorları, Hall Etki itme motorları olarak da adlandırılabilirler. Çeşitli tip Hall itme motoru söz konusu olmaktadır. Bunlar, Sabit Plazmalı İtme Motorları (SPT), Manyetik Leyirli İtme Motorları ve diğer modelleri şeklindedir. Tüm bu isimler aslında aynı cihazı karakterize etmektedirler. Yalnızca cihazın bazı kısımlarında değişiklik yapılarak, farklı isimlerle atfedilmişlerdir. Örneğin, manyetik alanında yapılan değişiklikle, Manyetik Leyirli Hall itme motoru olarak isimlendirilebilirler. Ayrıca plazma kanalının sahip olduğu yalıtkan maddeye görede çeşitli isimler alabilmektedirler [4]. Örneğin, boron nitrit duvarlı (BN), borosil duvarlı (BN-SiO₂) ya da alüminyum duvarlı (AL₂O₃) gibi. Bu duvarlar, itme etkisi yaratan gazın, iyonize edilmesi öncesi ve sonrasında da oluşanlar

çerçevesinde, düşük emisyon katsayısına sahip olduklarından elektornların dışarı kaçımını büyük oranda azaltmakta ve yine sahip oldukları dayanımla aşınımı büyük oranda azaltıcı etki göstermektedirler.

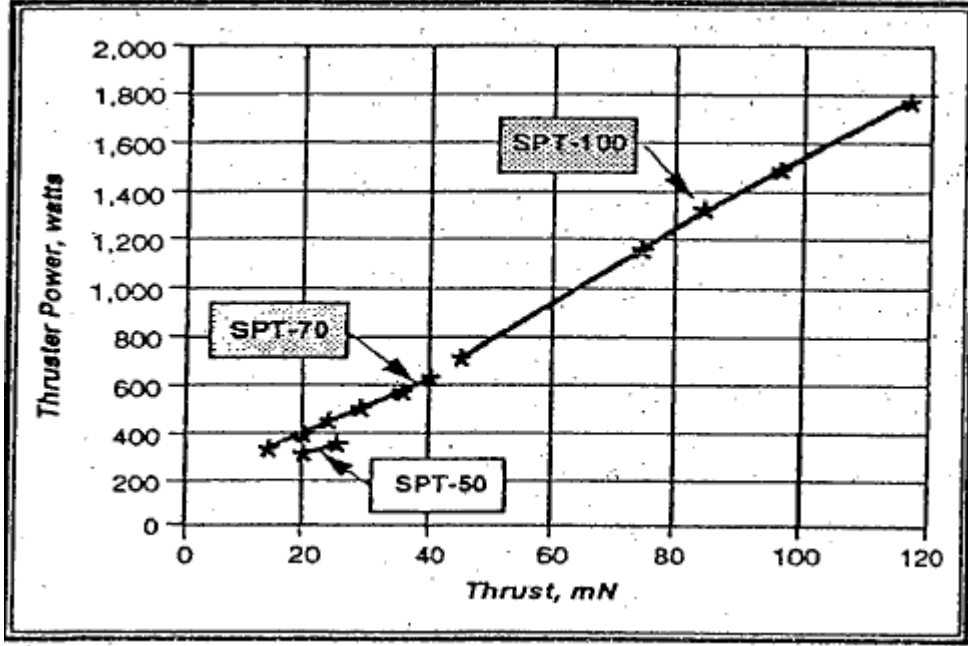
1.2. SABİT PLAZMALI İTME MOTORLARI (SPT)

1960' Lı yılların sonlarına doğru Rus bilim adamlarınca geliştirilen SPT' ler, uzayda 70' in üzerinde görev yaptılar ve bunlardan %100 a yakın bir başarı elde edildi. İlk SPT 1971 yılında uçtu ve SPT-60 olarak nitelendirildi [2]. Eski Sovyetler Birliğinde bir meteor uydusu olarak görev yaptı. Daha sonra sırayla.1980'li yıllardan itibaren, SPT-70 ve SPT-100 geliştirildi.

Tablo 1.1 SPT Tarihi [2].

Uzay aracı	İtici Tipi	Fırlatılma Tarihi	Görevi
Meteor	SPT-60	30.12.1971	İlk Uçuşu / Mükemmel Gerçekleşme
Meteor	SPT-60	09.07.1974	Test Uçuşu
Meteor	SPT-50	05.05.1976	Deneysel
Kosmos	SPT-70	18.05.1982	İletişim Uydusu
Kosmos	SPT-70	02.03.1984	İletişim Uydusu
Kosmos	SPT-70	04.04.1986	İletişim Uydusu
Kosmos	SPT-70	01.10.1987	İletişim Uydusu
Kosmos	SPT-70	02.08.1988	İletişim Uydusu
Kosmos	SPT-70	19.09.1990	İletişim Uydusu

Uzay aracı	İtici Tipi	Fırlatılma Tarihi	Görevi
Kosmos	SPT-70	11.12.1991	İletişim Uydusu
Luch	SPT-70	10.10.1985	İletişim Uydusu
Luch	SPT-70	26.11.1987	İletişim Uydusu
Luch	SPT-70	27.12.1988	İletişim Uydusu
Kosmos	SPT-70	02.02.1987	Topaz Reaktör Testi
Kosmos	SPT-70	10.07.1987	Topaz Reaktör Testi
Kosmos	SPT-70	26.01.1994	İletişim Uydusu
Kosmos	SPT-70	10.10.1994	İletişim Uydusu
GALS	SPT-100	26.01.1994	İletişim Uydusu
EXPRESS	SPT-100	10.10.1994	İletişim Uydusu



Şekil 1.1 SPT Güç ve itme [2].

1.2.1. SPT' NİN SAHİP OLDUĞU BAZI AVANTAJLAR

- Basit yapılıdır. Bundan mütevellit, ihtiyaç duyduğu elektronik cihazların sayısını da azaltmış olarak, karmaşık bir yapının söz konusu olmaması sağlanmış olur
- Uzun dayanım ömrüne sahiptirler.
- Yakıt haznesinin az yer teşkil etmesi, bir çok faydalı faktörizasyonun doğmasına yol açmaktadır.

1.3. HALL İTME MOTORLARININ ÇALIŞMA PRENSİBİ

Eksenel elektrik alan, dairesel bir kanal içerisinde ki anot ile, deşarj kanalının dışarısında yer alan bir katot tüpü arasında oluşturulur. Enine bir manyetik alan (radyal yönde) katottan anota doğru direkt olarak elektron akışına engel olur. Bunun yerine elektronlar, manyetik alan çizgileri boyunca spiraller şeklinde ve $E \times B$ (sayfa içine doğru) nin bir sonucu olarak, kanal boyunca azmütal yönde ilerler ve sonuç olarak elektronlar anota ve kanal duvarlarına elektrostatik dalgalanmalarla ve çarpışma işlemleriyle nüfuz ederler. Daha sonra elektronlar, anottan püskürtülen yakıtın çok

büyük bir kısmını iyonize ederler. Enine manyetik alan ile oluşmuş olan aksenal elektron mobilitesi, kanal ekseni boyunca dağıtmakta olan uygulamalı deşarj voltajıyla birleşince, kanal içerisindeki iyonlar hızlanır ve sonuç olarak, itme motor ışını oluşturur. Bu yüzden, Hall İtici motorları, elektrostatik cihazlar olarak da adlandırılmaktadırlar. Çünkü, manyetik alanın sürece kritik müdahalesi olsa bile, iyonlar uygulanan elektrik alanla hızlandırılmaktadırlar.

Burada bu plazma bombardımanın sonucunda iyonlar, kanal çıkışının yakınındaki yalıtkan duvarların aşınmasına sebep olurlar. Bu da itme motorunun çalışma ömrünü belirleyen en önemli etkenlerden biridir.

Harici katot plazma tüpü, yalnızca deşarj oluşumu için bir elektron kaynağı değil, aynı zamanda iyon ışını nötrale etmek için de elektron temin eder. Tek katotlu Hall itme motorlarında da katot, iki katot tüpünün yaptığı işi tek başına yapar.

1.4. HET ÜZERİNE YAPILAN ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Hall Efekt İtme motorlarının modellenmesi için yapılan çalışmaları, öncelikle üç kısma ayırmamız gerekir. İlk olarak; simülasyonla modelleme, ikinci olarak deneyle modelleme, üçüncü ve son modelleme şekli ise; teorik olarak modellemedir. Yine benimde bu çalışmada yaptığım, teorik olarak oluşturulmuş bir model üzerinden çeşitli bulguları elde etmek olmuştur.

Simülasyonla modellemelerden en önemli olan iki tanesi; DSMC ve PIC-MCC dir. DSMC (Direct simulation Monte Carlo), ağır partiküllerin çarpışmalarını modeller (iyonlar ve atomlar). PIC-MCC (Particle-in Cell plus Monte Carlo Collisions) ise; elektrik alan içerisindeki iyonların yönelimini inceler [5].

Deneyle modelleme için ise; bölüm 3' te de bahsettiğim deneysel araç ve gereçler konusunda olduğu gibi, deneysel araç ve gereçler kullanılarak yapılan ölçümler neticesinde, çeşitli bulguların elde edilmesiyle oluşan modelleme şeklidir.

İKİNCİ BÖLÜM

2. TEK YÜKLÜ BİR PLAZMA İÇİN HALL İTME MOTORLARINDA VERİM VE PERFORMANSIN İNCELENMESİ

2.1. VERİM

İtme motorları, çeşitli hipotezler göz önünde bulundurularak tasarlanmaktadır. Geliştirilen itme motorları ile elde edilen maksimum verim aslında modern manyetik alan tasarımının bir sonucudur. Başarılı bir manyetik alan için ise, elektron hall parametresi, eksenel elektron akımı ve manyetik alan arasındaki ilişkiler büyük önem arz etmektedirler. Bu değerlendirmede elektronlar aynı zamanda yüksek iyonizasyonu ve hızlandırma verimini belirleyen başlıca etkeni teşkil etmektedir. Aşikâr olarak, elektron dinamiğinin anlaşılabilmesi, itme fiziği için de hayati bir önem teşkil etmekle birlikte, Hall itme motorları için verimin belirlenmesindeki başlıca kriteri oluşturmaktadır [1,6]

Aşikâr olarak, elektron dinamiğinin anlaşılabilmesi, itme fiziği için de hayati bir önem teşkil etmektedir. Ne yazık ki; itme fiziğini belirlemek için ise, Hall itme içerisindeki eksenel elektron akışını belirlemek gerekmektedir; Bu da oldukça güç bir problemdir ki yıllardır araştırılan ve üzerinde çalışmalar yapılan bir konudur. Bu temel olarak aykırı difüzyon mekanizmasının varlığından kaynaklanmaktadır, bu da, elektron taşınmasında artan manyetik alanın ötesinde, klasik taşıma teorisi tahmin edilmektedir. İki adayın, bu aykırı taşımadan sorumlu olabilecekleri düşünüldü. 1960 yılından beri, hangi mekanizmanın baskın olduğuna yönelik tartışmalarda, araştırmalar, teoriler, deneyler, gözlemler ve simülasyonlu testler gösterdiği, her iki mekanizmanında baskın rol oynadığı çeşitli bölgeler söz konusudur.

Yüksek spesifik impulsta ki etkili bir çalışma başarısı için Manyetik alanın önemi, NASA-173Mv2 Hall itmelerde doğrulanmıştır [1]. Çeşitli İticilerin mukayesesi göstermektedir ki, verim; spesifik impuls için, plazma lenslerinin konkavlığı değiştirilerekten optimize edilebilmektedir.

2.1.1. ANOT KULLANIM VERİMİ

Anot verimi, iyonizasyon ve hızlandırma verimi ile belirlenmektedir. Anot verimi aşağıdaki kullanım verimleri ile tanımlanmaktadır[1,6];

1. çoklu fraksiyonlar – plazma içerisindeki yüklü iyonlar, yani, yük kullanım verimi
2. aksenal olarak iyon hızını yönlendiren voltaj devinimi, yani, voltaj kullanım verimi
3. deşarj akımını içeren iyon akım fraksiyonu, yani; akım kullanım verimi
4. nötral kütle akışının iyon kütle akışına doğru devinimi, yani, kütle kullanım verimi

Anot verimi, verilmekte olan bu dört işlemin bir ürünüdür. Akım, kütle ve yük kullanım verimi, İyon ve iyon akım fraksiyonlarına bağımlı olarak ilişkilendirilmektedir. Anot verimi voltajla monoton olarak artar. Trim bobini performansa tutarlı bir etki sağlamaktadır. Trim bobini kullanıldığında, anot verimi artar. Trim bobini ile toplam verim artar. Trim bobini aynı zamanda plazma salınımlarının genliğini ve frekansını ve pülüm ıraksamasını azaltıcı etki göstermektedir. Anot kullanım verimi denklem 2.4 deki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\eta_a = \frac{T^2}{2m_a P_d} = \eta_q \eta_v \eta_b \eta_m \quad (2.1)$$

2.1.2. AKIM KULLANIM VERİMİ

Hall itme motorunun deşarj odacığının içerisinde, yakıtın iyonizasyonu sonucunda elektron akımı ve itme üretmek için kullanılan iyon akımı net akım akışıyla birleştirilmektedir. Kirişof yasasının uygulanmasıyla, deşarj akımı; iyon ve elektron akımının toplanması şeklindedir[1,6].

$$I_d = I_b^+ + I_e^+ \quad (2.2)$$

Elektron akım fraksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır

$$\varepsilon^+ \equiv \frac{I_e^+}{I_d} \quad (2.3)$$

ve akım kullanım verimi de iyon ışınının deşarj akımına oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$\eta_b^+ \equiv \frac{I_b^+}{I_d} \quad (2.4)$$

Tüm bu sonuçlardan sonraki denklem (2.2) nin boyutsuz şekli aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\eta_b^+ = 1 - \varepsilon^+ \quad (2.5)$$

Akım kullanım verimi, yakıtı iyonize etmek için kullanılan elektronların nasıl daha efektif olarak kullanılacağını karakterize etmektedir. 200 V un üzerinde çalışma şartlarına sahip olan Hall itme motorları tipik olarak %70 ve daha fazla oranda akım kullanım verimine sahiptirler [7]. Sonuç olarak, Hall itme tasarımında elektron akımını minimize etmek için bir hayli çaba sarf edilmektedir, fakat deşarjı sürdürebilmek için elektronlara ihtiyaç duyulacağından bu sınırlamanın da bir limiti olmalıdır.

2.1.3. KÜTLE KULLANIM VERİMİ

Anot kütle akış oranı, iyon üretmek için kullanılan yakıt arzıdır. Anot kütle akış oranı, iyon ve nötrallerin akış oranlarının toplamı şeklinde ayrıştırılabilmektedir[1].

$$\dot{m}_a = \dot{m}_b^+ + \dot{m}_n^+ \quad (2.6)$$

Burada iyon kütle akış oranı, iyon ve deşarj akımı ile ilişkilendirilebilmektedir.

$$\dot{m}_b^+ = \frac{m_x e I_b^+}{e} = \frac{m_x e \eta_b^+ I_d}{e} \quad (2.7)$$

ve çevirme parametresi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\xi \equiv \frac{m_x e I_d}{\dot{m}_a e} \quad (2.8)$$

Kütle kullanım verimi, iyonların kütle akış oranının, anot kütle akış oranına bölümü şeklinde bulunmaktadır.

$$\eta_m^+ \equiv \frac{\dot{m}_b^+}{\dot{m}_a} = \frac{m_{Xe} \eta_b^+ J_d}{\dot{m}_a e} = \zeta \eta_b^+ \quad (2.9)$$

Kütle akış oranı, anot boyunca nötrallerin akışının nasıl daha efektif olarak karakterize olabileceğini belirler

Toplam parçacık yoğunluğunu, nötral ve iyon parçacık yoğunluklarının toplamı şeklinde ifade edersek,

$$n_t \equiv n_n^+ + n_b^+ \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir.

2.1.4. VOLTAJ KULLANIM VERİMİ

Voltaj kullanım verimi (bazıları tarafından hızlandırma verimi olarak tanımlanmaktadır) hızlanma voltajının deşarj voltajına oranı şeklinde tanımlanmaktadır[1].

$$\eta_v^+ = \frac{V_b^+}{V_d} \quad (2.11)$$

Hall itme motorları içerisinde, bir elektrostatik süreç boyunca iyon hızlanması, aksenal elektrik alana [8], ya da eşit bir biçimde azmütal elektron akımı ve radyal manteyik alanın bir elektromanyetik etkileşimine bağlıdır [9].

Elektrostatik bakış açısından, iyonun ortalama çıkış hızı uygulanana enerjini korunumuyla hesaplanabilmektedir.

$$eV_b^+ = \frac{1}{2} m_{Xe} \langle v_b^+ \rangle^2 \quad (2.12)$$

İyonun ortalama çıkış hızı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\langle v_b^+ \rangle = \sqrt{\frac{2eV_b^+}{m_{Xe}}} = \sqrt{\frac{2e\eta_v^+ V_d^+}{m_{Xe}}} = \sqrt{\frac{2e(V_d - V_l^+)}{m_{Xe}}} \quad (2.13)$$

ve kayıp voltajlar [10] göz önünde bulundurularaktan hata hızı aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

$$\langle v_l^+ \rangle = \sqrt{\frac{2eV_l^+}{m_{Xe}}} \quad (2.14)$$

2.2. PERFORMANS

İtme kuvveti, kütle akış oranının ve iyonların ortalama çıkış hızlarının çarpımının bir sonucudur[1].

$$T^+ = \dot{m}_b^+ \langle v_b^+ \rangle = \eta_b^+ I_d \sqrt{\frac{2m_{Xe}\eta_v^+ V_d}{e}} = \eta_b^+ I_d \sqrt{\frac{2m_{Xe}(V_d - V_l^+)}{e}} \quad (2.15)$$

İtme kuvveti bu yüzden deşarj akımıyla orantılıdır. İtme kuvvetinin, güce oranı, deşarj gücü göz önüne alınarak,

$$\frac{T^+}{P_d} = \eta_b^+ \sqrt{\frac{2m_{Xe}\eta_v^+}{eV_d}} = \frac{\eta_b^+}{V_d} \sqrt{\frac{2m_{Xe}(V_d - V_l^+)}{e}} \quad (2.16)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Anot için spesifik impuls ise,

$$I_{sp,a}^+ = \frac{T^+}{\dot{m}_a g} = \frac{\eta_m^+}{g} \sqrt{\frac{2e(V_d - V_l^+)}{m_{Xe}}} \quad (2.17)$$

Şeklindedir. İhmal hızları ve anot spesifik impuls için denklemlerin birleştirilmesi alternatif bir form verir ve itmenin güce oranı, aşağıdaki gibidir.

$$\frac{T^+}{P_d} = \frac{2\eta_m^+\eta_b^+}{gI_{sp,a}^+} \frac{1}{1 + \left(\frac{\langle v_l^+ \rangle \eta_m^+}{gI_{sp,a}^+}\right)^2} \quad (2.18)$$

Denklem (2.18) in irdelenmesi bize gösteriyor ki; maksimum itmenin güce oranı için spesifik impuls aşağıdaki gibi yazılabilir

$$I_{sp}^+ = \frac{\langle v_i^+ \rangle \eta_m^+}{g} \quad (2.19)$$

ve yine bu yüzden, maksimum itmenin güce oranı aşağıdaki gibidir.

$$\left[\frac{T^+}{P_d} \right]_{\max} = \frac{\eta_b}{\langle v_i^+ \rangle} \quad (2.20)$$

Son olarak da, anot verimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\eta_a^+ = \frac{(T^+)^2}{2m_a P_d} = \eta_b^+ \eta_m^+ \eta_v^+ = (1 - \varepsilon)^2 \xi \left[1 - \frac{V_i^+}{V_d} \right] \quad (2.21)$$

Denklem (2.21) bize gösteriyor ki, daha öncede vurguladığımız üzere, tek yüklü bir plazma için Hall itmemizin anot verimi; akım, kütle ve voltaj verimlerine bağlıdır.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BAŞLICA DENEYSEL ALETLER VE UZAY ARACI TAHRİK SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

3.1. BAŞLICA DENEYSEL ALETLER

3.1.1. HALL İTME MOTORU

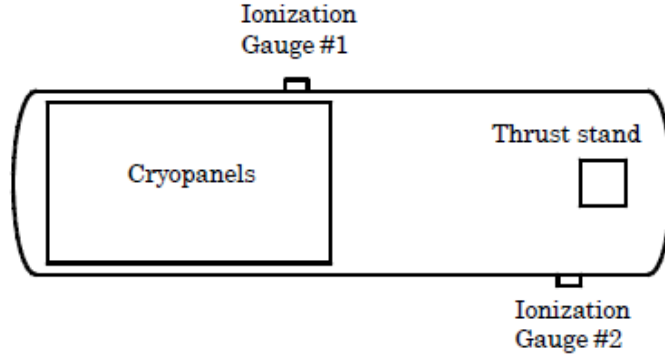
NASA-173Mv2 labaratuvar modeli, 5kW gücünde nominal boyutlara sahip, manyetik leyırlı, tek kademeli bir Hall itme motorudur (Şekil 3.1' de dataylı olarak gösterilmektedir [1]). Deşarj odacığı 173 mm dış çapa sahip ve boron nitritten yapılmıştır. Demir kutup parçalarından, bir giriş bobini (IC), bir çıkış bobini (OC) ve temel manyetik çemberden oluşmaktadır. İyi bir manyetik alan, i harici düzenleme bobini (ITC) ve dış harici düzenleme bobini (ETC) ile sağlanmaktadır. İ harici düzenleme bobini temel olarak, deşarj odacığı içerisindeki radyal manyetik alanı etkiler, dış harici düzenleme bobini ise katotun yakınındaki çıkış düzlemindeki manyetik alan akışına etki eder [1].



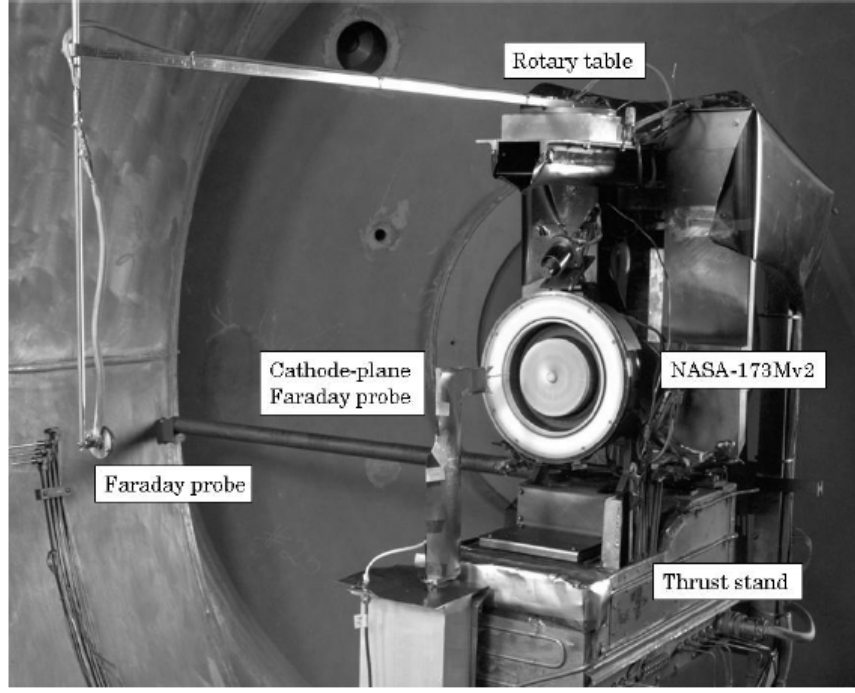
Şekil 3.1 NASA-173Mv2 Hall itme motorunun bir fotoğrafı [1]

3.1.2. VAKUM TESİSİ

Tüm deneyler vakum tesisinde yürütülmektedir. Vakum tesisine örnek olarak, NASA GRC (Glenn Araştırma Merkezi) deki Vakum Tesisi 12 (VF12) yi örnek olarak gösterebiliriz. Vakum tesisinin şematik bir resmi şekil 3.2’ de gösterilmektedir. Şekil 3.2 de yeralan fotoğrafta, VF12 nin içi gösterilmektedir. VF12 Silindirik şeklindedir. Paslanmaz çelikten bir vakum odacığı vardır. Bu vakum odacığı 3 metre çapında ve 9,6 metre uzunluğundadır. Tesis, yoğunlaşmayan gazların çıkarılması için saniye de 1000 [1/s] kez pompalama işlemini yapan bir turbomoleküler pompa ile desteklenen bir kriyojenik tesisdir.



Şekil 3.2 Vakum Tesisinin Şematik Bir Resmi [1]



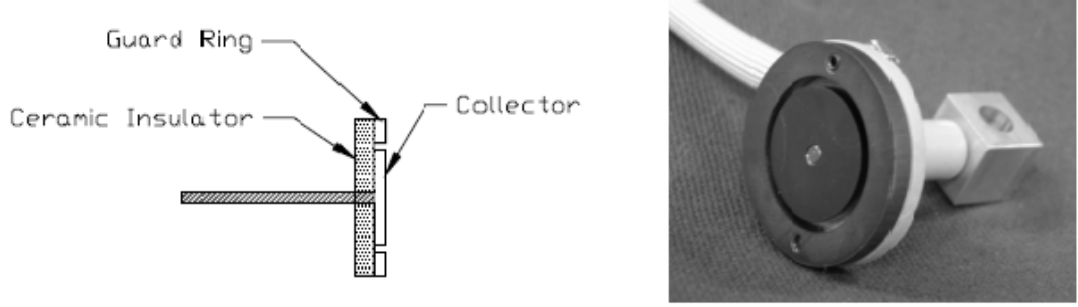
Şekil 3.3 Şekil' de, iyon akım yoğunluğunu ölçen faday propları, itme motorunun standı ve itme motor standı üzerinde bulunan NASA 173Mv2 itme motoru ve Vakum tesisi yer almaktadır [1].

3.1.3. İTME MOTORU STANDI

İtme motorunu ve ona ait elektrikselsel bir takım parçalar üzerinde çeşitli işlemlerin yapılabilmesi için, tüm bu öğeleri üzerinde barındıran destekleyici deney ögesidir. Kendisine konumlandırılmış bir sarkaç aracılığıyla yönün sapması, bir veri yazıcı aracılığıyla (LVDT), çıkan lineer voltajın kaydedilmesiyle izlenmektedir [1,10]. İtmenin eğimi benzer olarak, bir meyil ölçerden çıkan voltajla kaydedilmektedir. Daha sonra gerekli düzeltmeler veri yazıcısı ve eğim ölçerden alınan bilgilere göre yapılmaktadır. Kalibre işlemi ise, itme motorunun çalışmasından önce ve sonra gerçekleştirilmektedir. Termal sürüklenmeyi en aza indirmek için, 10° C de korunan bir su soğutmalı tabaka ile itme motor standı bileşenleri çevrilmiştir. Bu metod kullanılarak, itme ölçümlerindeki belirsizlik $\pm 1,5\%$ olmaktadır

3.1.4. FARADAY PROBU

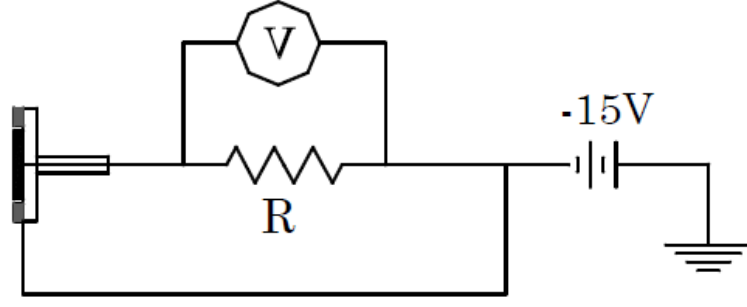
İtme motorunun verimini maksimum kılan bobin akımı belirlendikten sonra, itme motorundaki iyon akım yoğunluğu ölçümleri, bir Faraday probu kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 3.4’ de Faraday probu gösterilmektedir. Yine Tablo 3.1. de boyutlarına göre Faraday propları özetlenmektedir.



Şekil 3.4 Faraday probunun şematik gösterimi ve bir fotoğrafı [1].

Tablo 3.1 Faraday Probu oluşturulurken kullanılan parçaların boyutları [1].

	Boyutları (cm)
Kollektör	
Dış Çapı	1.94
Derinliği	0.32
Koruma Halkası	
İç Çapı	2.22
Outer Diameter	3.20
Derinliği	0.32
Alümina Yalıtım	
Dış Çapı	3.20
Derinliği	0.32



Şekil 3.5 Faraday probu Elektriksel Şeması [1].

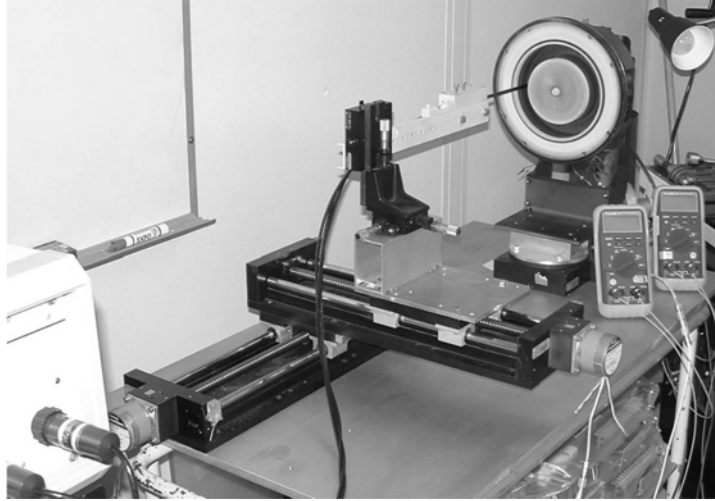
Şekil 3.5’ de Faraday probunun elektriksel bir şeması gösterilmektedir. Kollektör ve koruma halkası 15 V altındaki elektronları geçirmemektedir. Prop yüzü, çıkış paneli üzerinde akış yönüne doğru, itme motorunun merkezi üzerinde yerini alır. Açısal bir koordinat sistemi tanımlanmaktadır. Örneğin itme motor merkezi sıfır derece olarak referans edilmektedir. Saat yönüne doğru yapılan açı pozitif yön tayin edilemektedir. Tarama işlemi -100° den $+100^{\circ}$ arasında 1° artış ile gerçekleşmektedir. Her lokasyonda 1000 data noktası yer almaktadır. Bu prop, 1 kHz ve 502Ω ortalama dirence ve 16 bit yakalama hızına sahiptir. İyon akım yoğunluğunun açısal yönelimi, pülüm ıraksama açısının hesaplanması için kullanılmaktadır. Pülüm ıraksama açısı, yarım açı olarak itme motor merkezi üzerinde tanımlanmaktadır. Burada yani itme motorunun merkezi üzerindeki iyon akım yoğunluğu %95 ve derece olarak $\pm 90^{\circ}$ ve üstü olarak belirlenmiştir. Hiç bir düzeltme yapılmaksızın ölçülen iyon akım yoğunluğu, vakum tesisi içerisinde plazma yük değişimi için iyapılmaktadır. [11].

3.1.5. DEŞARJ PROBU

İtici verimini maksimum kılan bobin akımı belirlendikten sonra deşarj akımın salınımlarının ölçülmesi için 8 Bit ve 500 MHz' lik bir osiloskop ve 50 MHz bir akım probu kullanılmaktadır. Bu prop, kapasitörün pozitif terminalinden sonra yerleştirilmektedir. Bu osiloskop, 2 ms de 250 kHz deşarj akımı için örneklenmektedir. Deşarj akımının salınımları, örneklendirilmiş periyod üzerindeki deşarj akımının standart sapmaları heasplanarak bulunmaktadır.

3.1.6. HALL PROBU VE GAUSSMETRE

Atmosferik şartlarda (plazmasız) NASA-173Mv2 Hall itme motorunun manyetik alan ölçümleri, 3 eksenli bir Hall probu ve bir gaussmetre ile yapılmaktadır. Hall probu, %25 lineerliğe sahiptir. NASA-173Mv2 için deney kurulumu şekil 3.6' da gösterilmektedir. Benzer kurulum NASA-173Mv1 için de geçerlidir.



Şekil 3.6 NASA-173Mv2 için deney kurulumu [1].

3.2. UZAY ARACI TAHRİK SİSTEMLERİ

3.2.1. KİMYASAL TAHRİK SİSTEMLİ UZAY ARAÇLARI

Kimyasal tahrik sistemli uzay araçları, itme işlemini termodinamik olarak yani, yakıtın ısıtılıp genişlemesiyle ortaya çıkarırlar. Kimyasal tahrik sistemlerinde performans, yakıtın mevcut reaksiyon enerjisi ile sınırlanmaktadır. Yani yakıtın kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşturduğu itme kuvvetinin limitleri vardır.

3.2.2. ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMLİ UZAY ARAÇLARI

Elektrik tahrik sistemli uzay araçları (EPS) kimyasal yakıt sistemli tahrik sistemlerine göre daha yüksek spesifik impuls üreten ve kapasitesi ve performans düzeyi artsa bile yörünge kontrolü ve manevra kabiliyet becerileri son derece yüksek olan, yüksek bir teknoloji ürünüdür [12,13]. Elektrik tahrik sistemleri 5 temel parçadan oluşmaktadır. Bunlar; güç kaynağı, güç işlem birimi (PPU), yakıt yönetim sistemi (PMS), kontrol bilgisayarı ve Hall itme motorudur. Güç kaynağı, herhangi bir elektrik enerjisinden elde edilebilir, ama güneş ve nükleer birincil seçenektir. Bir güneş enerjili elektrik tahrik sistemi (SEP) için, güneşe ve güneş enerjisini elektriğe dönüştürecek güneş panellerine ihtiyaç duyulacaktır. Bir nükleer elektrik tahri sistemi (NEP) nükleer bir ısı kaynağına bağlı olarak elektrik üretebilir. Güç işlem birimi (PPU), güç kaynağı tarafından üretilmiş olan gücü, Hall itme motorunun her bir komponenti için gerekli olan güce göre ayarlama yapar. Ayrıca Hall itme motor kanalı için gerekli olan yüksek voltajı ve katot için de gerekli olan yüksek akımı üretir. Yakıt yönetim sistemi (PMS), yakıt tankından itme motoruna ve katota giden yakıt akışını kontrol eder. Kontrol bilgisayarı, sistem performansını kontrol eder ve sürekli olarak izler. Hall itme motoru daha sonra, çalışabilmek için güç ve yakıtı işler.

3.2.1.1. NİÇİN ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMLERİ

Geleneksel kimyasal tahrik sistemlerinin Newton hareket yasalarına göre sahip olduğu sınırlar, ve tabiki yenilikçi bir takım şeyler yapma isteği; gelişmekte olan Elektrik Tahrik Sistemlerini teşvik etmekte önemli faktörler arasında yer almaktadırlar [14].

Roket motorlu bir uzay aracı yakıtın deşarjı sonucu oluşan hızlandırma etkisiyle hareket eder ve hareket eşitlikleri doğrudan taşıtın ve yakıt akışı için toplam momentumun korunumunu izler. Buna göre;

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{dm}{dt} v_{ex} \quad (3.1)$$

kütle atımının zamana göre türevi ile egzoz hızının çarpımı yakıt sistemi tarafından üretilen itme olarak nitelendirilmektedir.

$$T = \frac{dm}{dt} v_{ex} \quad (3.2)$$

İtme kuvvetinin zamana göre integrali ya da momentum değişimi; impuls olarak tanımlanmaktadır. İtmenin, birim ağırlıkta ölçülen yakıt atımına oranına spesifik impuls olarak tanımlanmaktadır.

$$I_{sp} = \frac{T}{w} = \frac{\frac{dm}{dt} v_{ex}}{\frac{dm}{dt} g} = \frac{v_{ex}}{g} \quad (3.3)$$

3.2.3. ELEKTRİK TAHRİK SİSTEMLERİNE KARŞIN KİMYASAL TAHRİK SİSTEMLERİ

Kimyasal tahrik sistemleri, enerjilerini sahip oldukları yakıtla sağlarken, elektrik tahrik sistemleri ise, güneş panellerinden ürettikleri enerjiyi kullanmaktadırlar. Elektrik tahrik sistemlerinde güç üretmek için güneş panellerinin kullanılması, güneş elektrik tahrik sistemi olarakta (SEP) adlandırılmaktadır. Gelecek görevler, yüksek güç düzeyinde ya da güneşten müthiş mesafelerde çalışması için alternatif bir güç kaynağı gerekecektir. Güven kaygıları söz konusu ise, güç, bir nükleer elektrik tahrik sistemi tarafından temin edilebilmektedir. Burada elektrik üretmek için bir reaktördeki ısı kullanılmaktadır [15].

Kimyasal tahrik sistemleri sınırlı enerji olarak adlandırılmaktadır çünkü, birim kütle başına düşen enerji miktarı sabittir. Bu da egzoz hızı ya da spesifik impulsu sınırlar ama, yakıt kendi enerji kaynağı olduğu için, kimyasal yapısı itibari ile de çok yüksek itme gücüne sahip olabilmektedirler.

Elektrik tahrik sistemlerinde enerji sınırlı değildir. Bir çok farklı dış kaynaktan enerji sağlanabilmektedir. Sorun, onların sağlamış olduğu itmenin, kimyasal tahrik sistemine nazaran çok düşük olmasıdır. Bunun için sınırlı güç söz konusudur. Buna karşın elektrik tahrik sistemli araçlar kütle oranlarına göre düşük itmeye sahip olsalar bile, yüksek miktarda spesifik impulsa sahiptirler.

Kimyasal tahrik sistemli araçlar kütle oranlarına göre yüksek itme sağlasalar bile, düşük spesifik impulslarda çok kısa sürede çok çabuk yakıt tüketmektedirler.

Elektrik tahrik sistemli araçlar ise çok az yakıtla çok daha uzun süreler çalışabilmektedirler.

Yine iki sistem karşılaştırıldığında kimyasal yakıt sistemli araçlar için kullanılan yakıt haznesi oldukça büyük bir yer kaplarken, elektrik tahrik sistemli araçlarda bu durum oldukça basit düzeyde yer almaktadır.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

4. HET İÇİN PLAZMA PARAMETRELERİNİN BULUNMASI VE SİSTEMİN GÜCÜ

İtme motorunun performansı; uzay aracı ve plazma sistemine ilişkin toplam momentumun korunumundan üretilen itme kuvveti, birim zamandaki yakıtın kütle akış oranı \dot{m} , taşıttan dışarı atılan plazma parçacıklarının itme vektörü doğrultusundaki ortalama hızı \bar{v}_{ex} , çıkıştaki iyon ve gazların toplam sayısal yoğunluğu n_{ex} , spesifik impuls I_{sp} ve itme motorunun verimi ile belirlenebilir[1]. İtme kuvveti,

$$m_{sc} \frac{d\bar{v}_{sc}}{dt} = \dot{m} \bar{v}_{ex} = \bar{T} \quad (4.1)$$

şeklindedir. Burada m_{sc} ; uzay aracının kütlesi, $\frac{d\bar{v}_{sc}}{dt}$ ise; uzay aracının ivmesidir. Spesifik impuls,

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{m}g} \quad (4.2)$$

şeklinde tanımlanır. İtme motorunun verimliliği ise;

$$\eta = \frac{P_T}{P_d} \quad (4.3)$$

olarak tanımlanır. Burada P_d elektrik gücü girdisi ya da sistemin gücü ve P_T ise itme motorunun gücüdür.

$$P_T = \frac{T^2}{2\dot{m}} \quad (4.4)$$

Hemen hemen yüksüz bir plazma için $n_e \approx n_b$, itme motorundan dışarı kütle akışı \dot{m} anottaki kütle akış hızına eşittir.

$$\dot{m} = m_b n_e v_b A_{ex} \quad (4.5)$$

Bohm hızı, iyon akustik hızına eşittir.

$$\bar{v}_B = \sqrt{\frac{kT_e}{m_b}} \quad (4.6)$$

İtme motoru çıkışında enerji korunumunu kullanarak,

$$eV_d = \frac{1}{2} m_b v_{ex}^2 \quad (4.7)$$

plazma sırasında dışarı atılan parçacıkların itme vektörü doğrultusundaki ortalama hızı \bar{v}_{ex}

$$\bar{v}_{ex} = \sqrt{\frac{2eV_d}{m_b}} \quad (4.8)$$

elde edilir. Burada m_b iyon kütlesi, V_d ise itme motoru odacığında uygulanan voltajdır. Sistemin gücü ise P_d ;

$$P_d = J_d V_d \quad (4.9)$$

Burada J_d itme motoru odacığında, uygulanan voltajdan ötürü oluşan akım yoğunluğudur.

BEŞİNCİ BÖLÜM

5. METODOLOJİ

Uzay taşıtlarında iyonların, gazların ve(ya) diğer şeyler dış ortama atıldıklarında pülümü (plume) diğer bir adıyla, sogucu oluştururlar. Bu çalışmada pülüm sonucunda elde edilen çeşitli veriler ile itme motoruna ilk başta uygulanan çeşitli parametre (V_d , P_d gibi...) değerlerinin ışığında, itme motorunun performans parametreleri, soğan modeli kullanılarak incelenmiş ve grafik üzerinde elde edilmiş olunan veriler, literatürden alınan deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır [16].



Şekil 5.1 Bir Hall İtme Motorunda Meydana Gelen Pülüm Resmi [17].

5.1. SOĞAN MODELİ

Pülümün geometrisini modellememize imkan veren; Soğan Modeli [16], $\rho_{(z)}$ itme kuvveti doğrultusundaki pülüm uzunluğunun bir fonksiyonu olmak üzere, pülümün yarıçap uzunluğu, $\rho_{(ch)}$ da itme motorunun deşarj kanalının yarıçap uzunluğu olmak üzere,

$$\rho_{(z)} = 10^{-8} z + \frac{(1,1)\rho_{(ch)}}{0,05(z-2)^3 + 1,5} \quad (5.1)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

5.2. SOĞAN MODELİNİ KULLANARAK PERFORMANS PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

5.2.1. İTME KUVVETİ

Soğan Modelini kullanarak, en genel ifadesiyle itme kuvveti denklemini,

$$T_{pl} = T_{ex} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (5.2)$$

şekli ile ifade edilebiliriz. Burada,

$$T_{ex} = A_{ch} m_{Xe} n_{ex} v_{ex}^2 \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \quad (5.3)$$

olduğundan, daha açık bir ifadeyle itme kuvveti denklemini,

$$T_{pl} = A_{ch} m_{Xe} n_{ex} v_{ex}^2 \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \quad (5.4)$$

olarak da ifade edebiliriz. Yine itme motorunun kanal alanını;

$$A_{ch} = \pi(\rho_{ch}^{o2} - \rho_{ch}^{i2}) \quad (5.5)$$

olarak, pülüm hızını;

$$v_{pl} = v_{ex} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2} \quad (5.6)$$

olarak, egzoz hızını da;

$$v_{ex} = \sqrt{\frac{2eq_i V_b}{m_{Xe}}} \quad (5.7)$$

olarak yazarsak, en açık ifadesiyle pülüm hızını,

$$v_{pl} = \sqrt{\frac{2eq_i V_b}{m_{Xe}}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho(z, \rho_{ch})}{\partial z}\right)^2} \quad (5.8)$$

İfadesi ile tanımlayabiliriz. Yine burada eksponansiyel terimi üzerinde yer alan kapa terimimizi de,

$$\kappa(z, \rho_{ch}) = \frac{\left| \frac{\partial^2 \rho(z, ch)}{\partial z^2} \right|}{\left[1 + \left(\frac{\partial \rho(z, ch)}{\partial z}\right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (5.9)$$

olarak tanımlıyoruz.

5.2.2. KÜTLE AKIŞI

Kütle akışı denklemi,

$$\dot{m}_{pl} = n_{exz} m_{Xe} A_{ch} v_{ex} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2} \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \quad (5.10)$$

şeklindeki gibi ifade edilebilmektedir.

5.2.3. SPESİFİK İMPULS

Spesifik impuls denklemi,

$$I_{sp} = \frac{T_{pl} [\text{mN}]}{\dot{m} g} = \frac{A_{ch} n_{ex} m_{Xe} v_{ex}^2 \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2\right) \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch}))}{g A_{ch} n_{exz} m_{Xe} v_{ex} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2} \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch}))} \quad (5.11)$$

şeklinde olup, daha sade biçimde,

$$I_{sp} = \frac{v_{ex}}{g} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2} \quad (5.12)$$

olarak da ifade edebiliriz.

5.2.4. SAYISAL YOĞUNLUK

Sayısal yoğunluk,

$$n_{pl} = \frac{n_{ex}}{\rho_{ch}} \rho(z) \quad (5.13)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.

5.2.5. VOLTAJ, VOLTAJ VERİMİ VE İYON AKIMI

Farklı voltaj değerlerinde pülümün değişimini, farklı voltaj verim değerleri için pülümün değişimini ve hatta farklı iyon akım değerleri için pülümün değişimini aşağıdaki formül yardımıyla bulabiliyoruz.

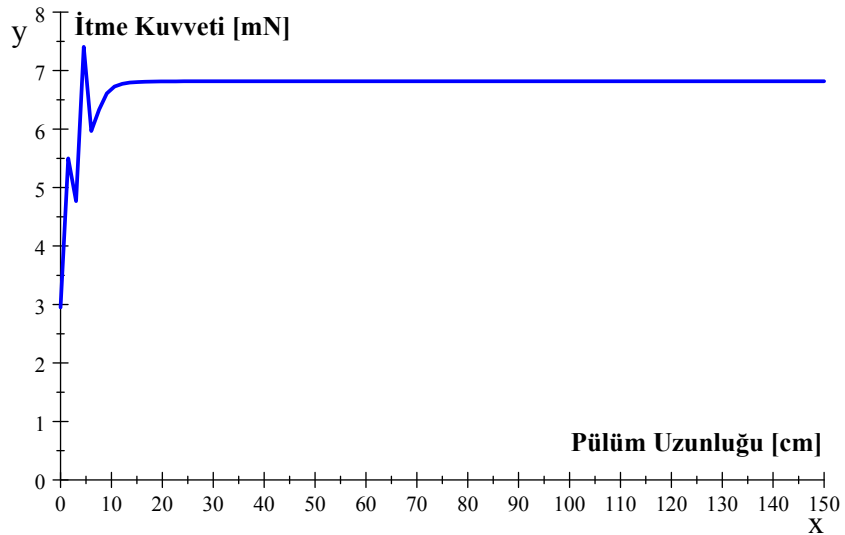
$$T_{pl} = \frac{2A_{ch} m_{Xe} n_{ex} q_i I_b \eta_v V_d}{\dot{m}_b} \exp^{-\rho_{ch} \kappa(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) \quad (5.14)$$

ALTINCI BÖLÜM

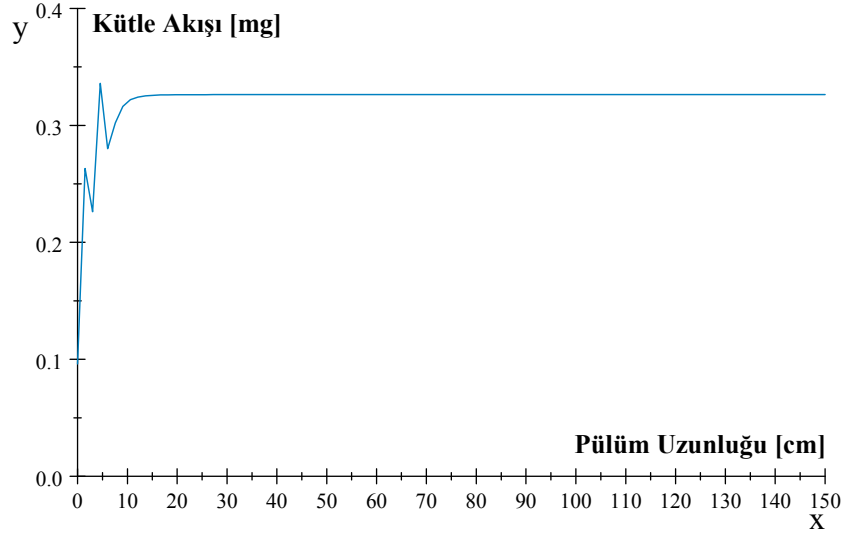
6. BULGULAR

Soğan modeli kullanılarak, HET-100-ALTA, SPT-30 ve ALTA-2 KW Hall itme motorları için, performans parametrelerinin, simetri eksenini boyunca gerçekleşen değişimi, HET-100-ALTA için; şekil 6.1, şekil 6.2 ve şekil 6.4 de, SPT-30 için; şekil 6.6, şekil 6.7 ve şekil 6.9 da ve de ALTA-2 KW için de şekil 6.11, şekil 6.12 ve şekil 6.14 de gösterilmektedirler. Bu itme motorları için voltaj verimlilikleri ise, sırasıyla; şekil 6.5, şekil 6.10 ve şekil 6.15 de yer almaktadır.

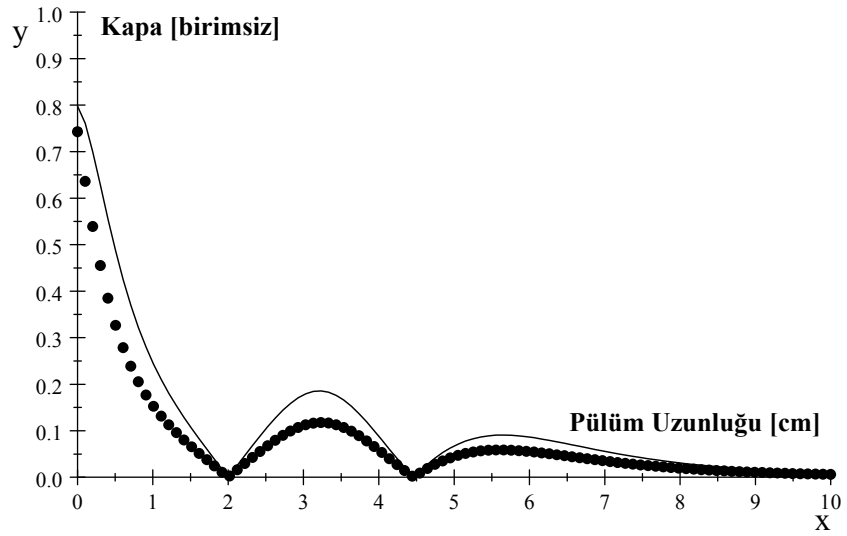
Geriye kalan son grafikler ise, kapa grafikleridir. Bu grafikler bizlere HET-100 ALTA ve SPT -30 için, orjinden itibaren pülüm eksenini boyunca yaklaşık olarak 10 cm, ALTA-2 KW için ise, yaklaşık olarak 15 cm lik bir uzaklığa kadar olan kısımda, itme kuvvetinin izlenmiş olduğu yolun bir eğri olduğunu, bu uzaklıklardan sonra ise, eğriliğin sıfıra çok çok yaklaştığı ve paralel bir kuvvet bileşeni haline geldiğini göstermektedirler. Yine, kapa grafikleri ile itme kuvvetinin grafikleri, tüm modeller için karşılaştırıldığında, tutarlı olduğu ve eğriliğin aynı bölgelerde olduğu gözlemlenmektedir. Bu haliyle de deneysel değerlere haiz olduğu aşikar olarak ortaya konmaktadır.



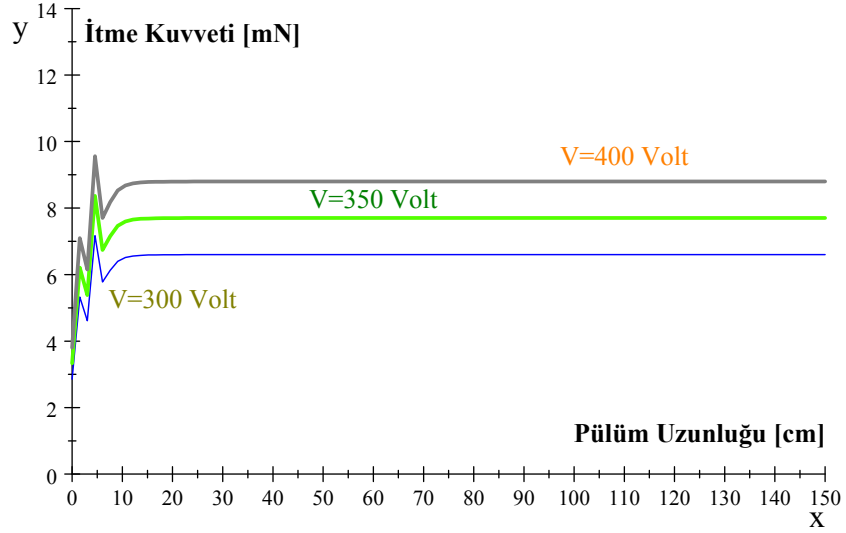
Şekil 6.1 HET-100-ALTA için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen itme kuvvetinin, pülüm boyunca değişim grafiği



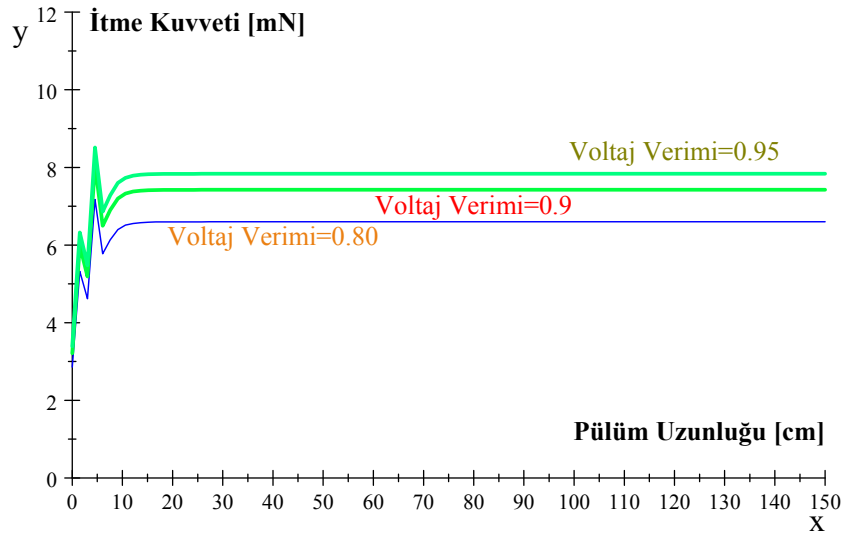
Şekil 6.2 HET-100-ALTA İçin, soğan modelinin modelinin kullanılmasıyla elde edilen kütle akışının, pülüm boyunca değişim grafiği.



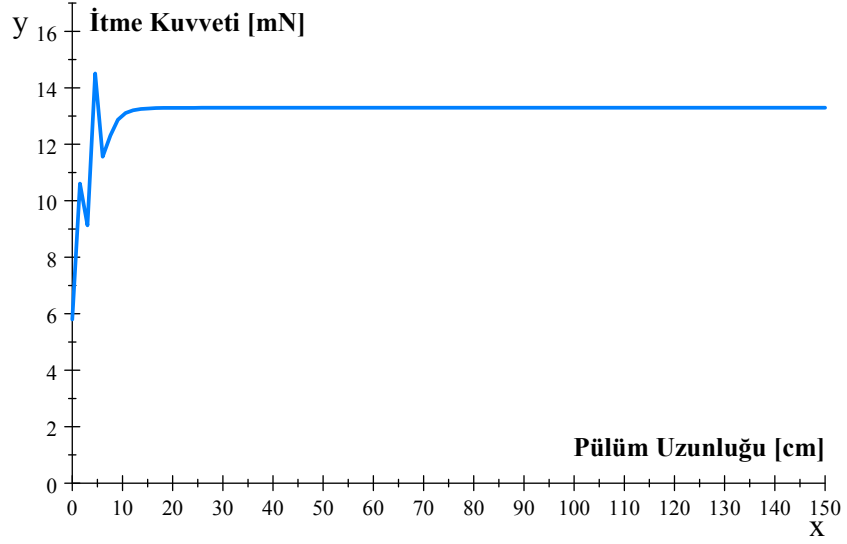
Şekil 6.3 HET-100-ALTA İçin, soğan modelinin modelinin kullanılmasıyla elde edilen kapa sabitinin, pülüm boyunca değişim grafiği.



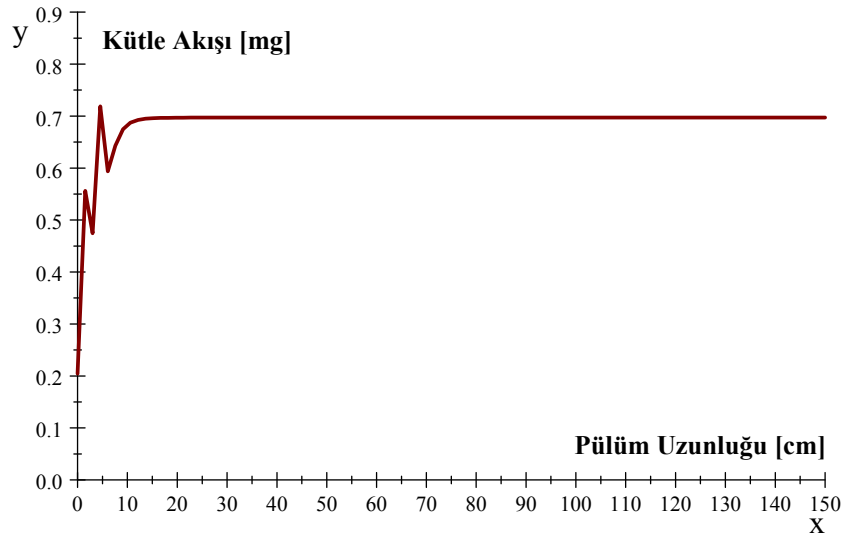
Şekil 6.4 HET-100-ALTA da, itme motoruna uygulanan farklı giriş voltajları için, pülüm boyunca oluşan itme kuvvetinin değişim grafiği.



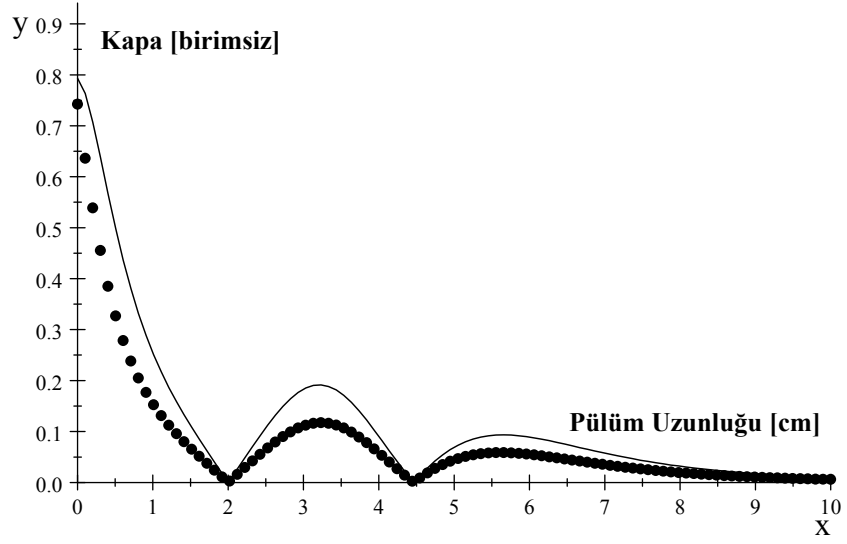
Şekil 6.5 HET-100-ALTA da, farklı voltaj verim değerleri için, itme motorunun pülümünde oluşturulan itme kuvvetinin değişim grafiği.



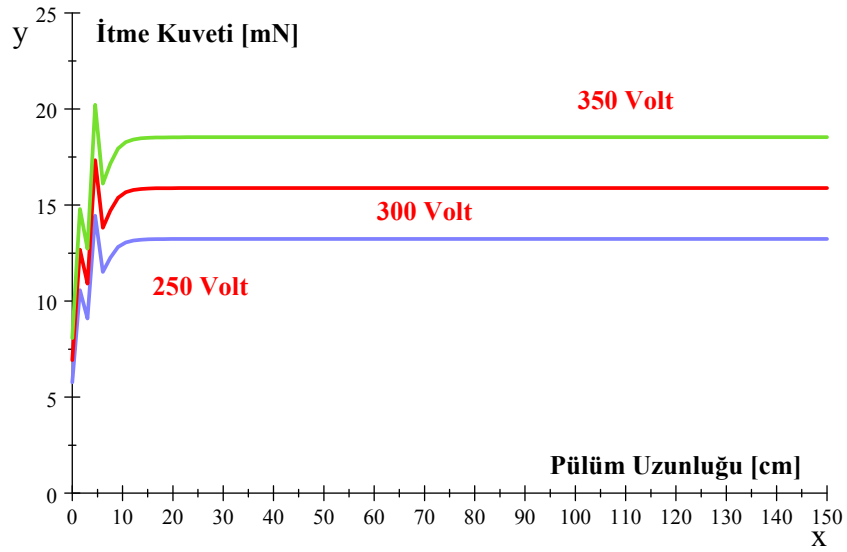
Şekil 6.6 SPT-30 için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen itme kuvvetinin, pülüm boyunca değişim grafiği



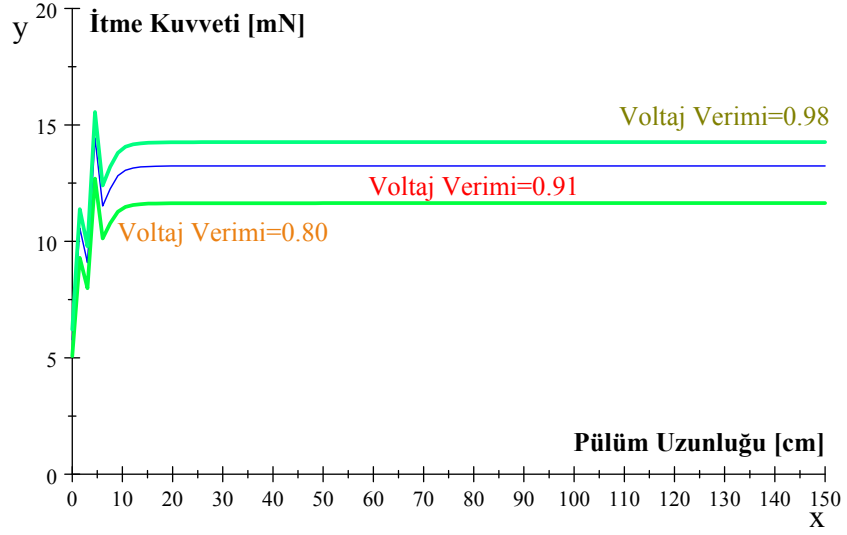
Şekil 6.7 SPT-30 için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kütle akışının, pülüm boyunca değişim grafiği.



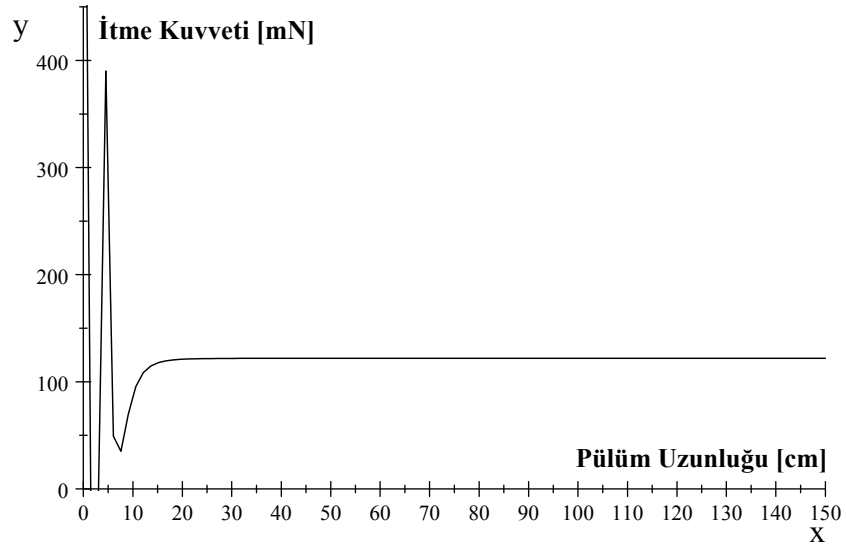
Şekil 6.8 SPT-30 da, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kapa sabitinin, pülüm boyunca değişim grafiği.



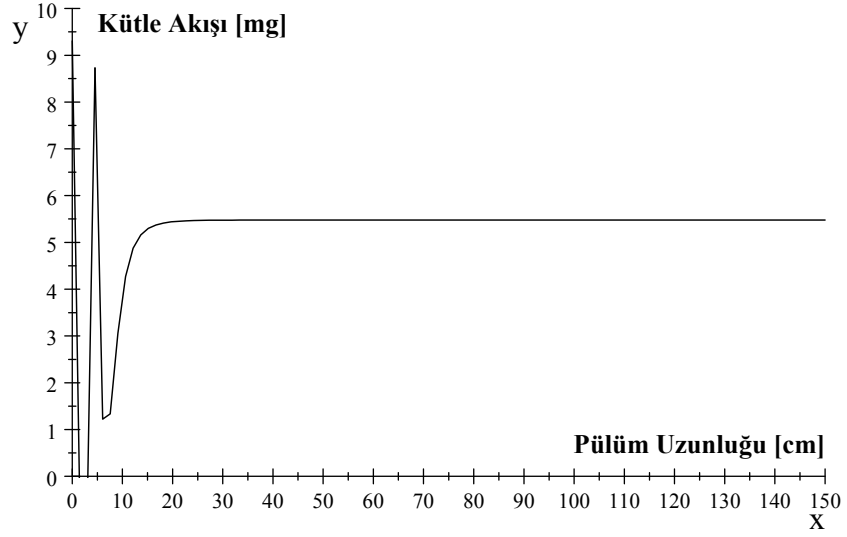
Şekil 6.9 SPT-30 da, itme motoruna uygulanan farklı giriş voltajları için, pülüm boyunca oluşan itme kuvvetinin değişim grafiği.



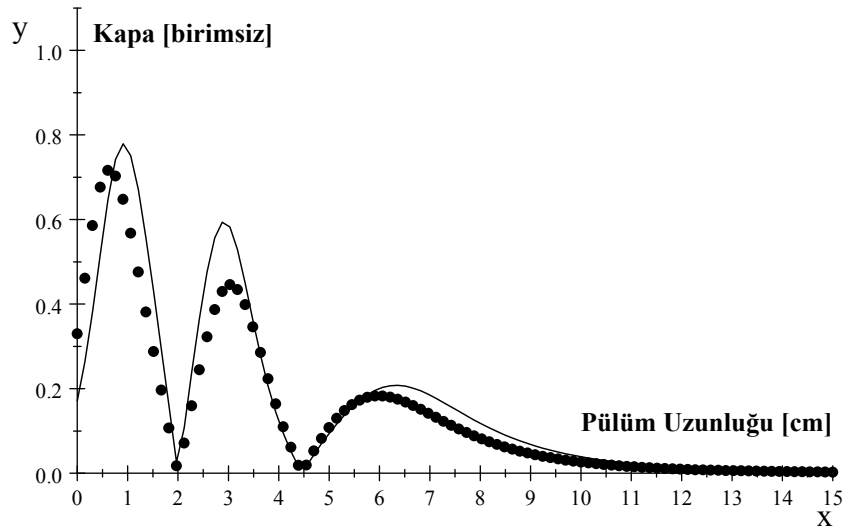
Şekil 6.10 SPT-30 da, farklı voltaj verim değerleri için, itme motorunun pülümünde oluşturulan itme kuvvetinin değişim grafiği.



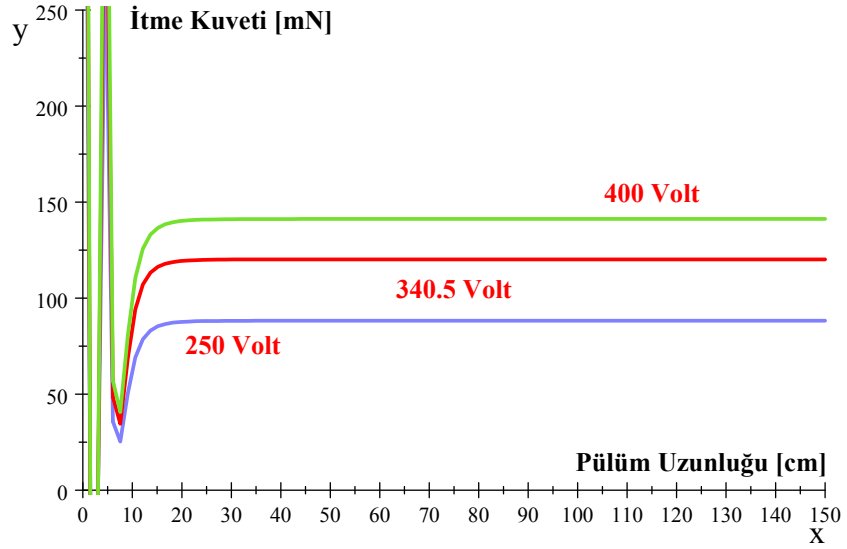
Şekil 6.11 ALTA-2 KW içi, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen itme kuvvetinin, pülüm boyunca değişim grafiği



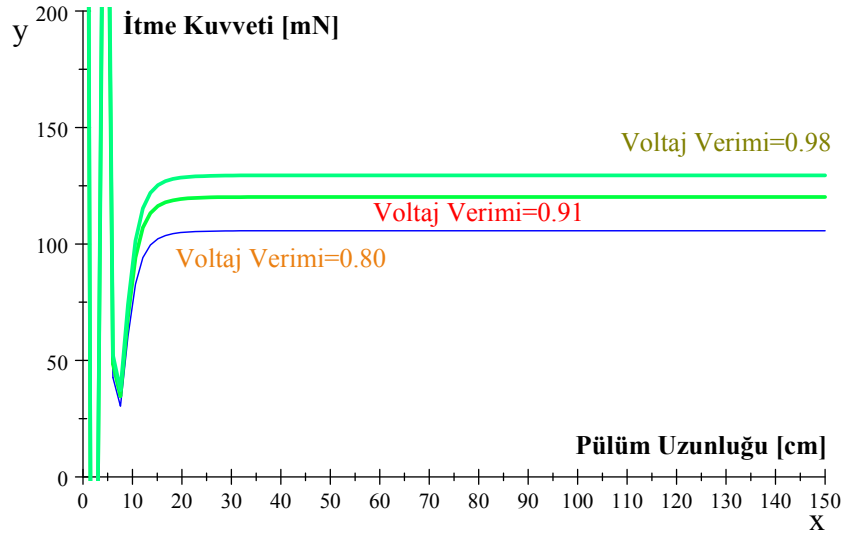
Şekil 6.12 ALTA-2 KW için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kütle akışının, pülüm boyunca değişim grafiği.



Şekil 6.13 ALTA-2 KW için, soğan modelinin kullanılmasıyla elde edilen kapa sabitinin, pülüm boyunca değişim grafiği.



Şekil 6.14 ALTA-2 KW da, itme motoruna uygulanan farklı giriş voltajları için, pülüm boyunca oluşan itme kuvvetinin değişim grafiği.



Şekil 6.15 ALTA-2 KW da, farklı voltaj verim değerleri için, itme motorunun pülümünde oluşturulan itme kuvvetinin değişim grafiği.

Tablo 6.1 Üç farklı itme motoru için, performans parametrelerinin karşılaştırılması [18]

PERFORMANS PARAMETRELERİ	DENEY VERİLERİ		MODEL VERİLERİ	
	T	\dot{m}	T	\dot{m}
HET-100-ALTA	6.8	0.5	6.8	0.33
SPT-30	13.2	0.98	13.2	0.7
ALTA-2 KW	121	6.6	121	5.5

YEDİNCİ BÖLÜM

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Üç farklı itme motoru için, pülüm boyunca oluşan itme kuvveti hesaplandı ve deneylerde elde edilen sonuçlara ulaşıldı.

Üç farklı itme motoru için, itme motoru çıkışındaki kütle akışı, itme motor kuvveti baz alınarak hesaplandı ve de literatürden alınan deney verileri ile karşılaştırıldı. Sonuç olarak; deney verilerine çok yakın değerler elde edildiği gözlemlendi.

Bu çalışmada ele alınan üç farklı itme motoru için, pülüm boyunca oluşan itme kuvveti ve kütle akışı gibi tasarım parametreleri ile itme motorunun farklı voltaj ve voltaj verimi değerleri için, itme motorunda oluşan itme kuvvetinin model ve deney sonuçları karşılaştırıldı. Bu karşılaştırmalar sonucunda; pülüm boyunca oluşan itme kuvvetinin belli bir değere kadar iniş çıkışlar yaşadığı, daha sonra ise pülüm eksenine paralel olarak bir yol izlediği gözlemlenmektedir. Daha açık bir ifadeyle, itme motorundan atılan parçacıkların ilk başlarda eğri bir yol izlediği, pülümden belli bir uzaklıkta ise, bu eğriliğin sıfıra çok çok yaklaşarak, parçacıkların paralel bir yol izlediği anlaşılmaktadır. Bu iniş ve çıkışların sebebinin ise, orada meydana gelen parçacıklar arasındaki çarpışmalardan kaynaklandığı deneysel sonuçlardan anlaşılmaktadır [19,20]. Yine bu bağlamda, modelden elde edilen sonuçların, deneysel sonuçlarla örtüştüğü anlaşılmaktadır.

Farklı voltaj ve voltaj verimi değerlerinin neticesinde oluşan itme kuvveti grafikleriyle, itme ve kapa (eğrilik) grafikleri de karşılaştırıldıklarında, çarpışma bölgelerinin, yine aynı bölgeler olduğu gözlemlenmektedir. Bu bağlamda da deney ve model sonuçları örtüşmektedir.

Bu çalışmada; üzerinde çalışılan tüm itme motorları için, model verileri ile deney verilerinin örtüştüğü aşikar olarak ortaya konmuştur. Herhangi bir itme motorunun tasarım parametreleri bilindiğinde, soğan modeli kullanılarak, o itme motoruna ait itme kuvveti ve kütle akışı bulunabilir, çeşitli parametreler ile de ilişkileri saptanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Hofer, R. R., "Development and characterization of high-efficiency, high-specific impulse xenon Hall thrusters," Ph.D. dissertation, Dept. of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 2004.
- [2] Craig W. Clauss, Dennis L Tilley, David A. Barnhart, "Benefits Of Low-Power Stationary Plasma Thruster Propulsion For Small Satellites", Atlantic Research Corporation, Gainesville, VA, Air Force Phillips Laboratory; Edwards AFB, CA.
- [3] M.H.Moghimi, "Physical Features and Parameters Calculations of a Hall Thruster", Presented at the 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden – Germany, September 11 – 15, 2011, IEPC-2011-002.
- [4] N. Gascona, M. Dudeck and S. Barral, "Wall material effects in stationary plasma thrusters", N. Gascona and M. Dudeck; Laboratoire d'Aérodynamique, Centre National de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans, France, S. Barral; Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Science, 00049 Warsaw, Poland.
- [5] Ye.A. Bondar, V.A. Schweigert and M.S. Ivanov, "Modeling of the Hall-Effect Thruster Plume by Combined PIC-MCC/DSMC Method", Institute of Theoretical and Applied Mechanics Novosibirsk, 630090, Russia
- [6] Richard R. Hofer and Alec D. Gallimore "Efficiency Analysis of A High- Specific Impulse Hall Thruster", AIAA-2004-3602, 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Ft. Lauderdale, Florida, July 11-14,2004.
- [7] H. R. Kaufman, "Technology of Closed-Drift Thrusters," AIAA Journal, vol. 23, no. 1, pp. 78–87, 1985.
- [8] Kim, V., "Main physical features and processes determining the performance of stationary plasma thrusters," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, pp. 736-743, 1998.
- [9] Haas, J. M., "Low-perturbation interrogation of the internal and near-field plasma structure of a Hall thruster using a high-speed probe positioning system," Ph.D. Dissertation, Dept. of Aerospace Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 2001.

- [10] Pote, B., Hruby, V., and Monheiser, J., "Performance of an 8 kW Hall thruster," IEPC-99-080, 26th International Electric Propulsion Conference, Kitakyushu, Japan, Oct. 17-21, 1999.
- [11] Walker, M. L. R., Hofer, R. R., and Gallimore, A. D., "The effects of nude Faraday probe design and vacuum facility backpressure on the measured ion current density profile of Hall thruster plumes," AIAA-2002-4253, 38th Joint Propulsion Conference, Indianapolis, IN, July 7-10, 2002.
- [12] European Space Agency, "Science and Technology", 15-June-2004).
- [13] S. D. Grishin and L. V. Leskov, "Electrical Rocket Engines of Space Vehicles", Moscow, Russia: Mashinostroyeniye Publishing House (published in Russian) , 1989.
- [14] European Space Agency, ESA, "Science and Technology", 11-November-2013, 12:11:57.
- [15] European Space Agency, ESA, "Science and Technology", 11-November-2013, 12:12:40.
- [16] A.Yilmaz, "Semi-Onion Model for Hall Effect Thruster's Plume", 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit AIAA 2011-6078 31 July-03 August, San Diego, California, AIAA Technical Papers AIAA-2011-6078 (2011).
- [17] Bruce Pote and Rachel Tedrake, "Performance of a High Specific Impulse Hall Thruster", Busek Co. Inc., 11 Tech Circle, Natick, MA 01760-1023, busek@busek.com, 508-655-5565, IEPC-01-35.
- [18] Tommaso Misuri , Francesco Battista and Mariano Andrenucci, "HET Scaling Methodology Improvement and Assessment", Tommaso Misuri; Ph.D. Student, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Università di Pisa, Pisa, 56122, Italy. t.misuri@ing.unipi.it, Francesco Battista; Research engineer, CIRA Italian Aerospace Research Centre, Capua, 83100, Italy. Ph.D. Student, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Università di Pisa, Pisa, 56122, Italy. f.battista@cira.it, Mariano Andrenucci; Professor, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Università di Pisa, Pisa, 56122, Italy. Chairman and CEO, ALA-TASpA, Ospedaletto, Pisa, 56121, ITALY
- [19] Daniel L. Brown and Alec D. Gallimore, "Evaluation of Facility Effects on Ion in a Hall Thruster Plume", JOURNAL OF PROPULSION AND POWER, Vol.. 27, No. 3, May-June 2011, DOI: 10.2514/1.B34068.

[20] Shigeru Yokota a, Daichi Sakoh a, Makoto Matsui a, Kimiya Komurasaki b, Yoshihiro Arakawa, "Charge exchange ion number density distribution in Hall thruster plume", *Vacuum* 83 (2009) 57-602008 Elsevier Ltd. All rights reserved. Doi: 10.1016/j.vacuum.2008.03.024.

EKLER

EK-1

MINI HET-100 İçin, Scientific WorkPlace Programını Kullanarak Elde Ettiğim Grafiklerin Açık Olarak Hesaplanması:

$$\rho_{ch}^o = 1.45\text{cm}$$

$$\rho_{ch}^i = 0.9\text{cm}$$

$$\rho_{ch}^m = 1.175\text{cm}$$

$$m_{xe} = 2.02 * 10^{-25} \text{kg}$$

$$n_{ex} = 1.905 * 10^{17} \text{m}^{-3}$$

$$I_b = 0.44\text{A}$$

$$V = 300\text{V}$$

$$\eta_V = 0.80$$

Grafik 6.1.

$$T_{pl} [\text{mN}] = m_{xe} n_{ex} v_{ex}^2 \pi \left((\rho_{ch}^o)^2 \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) - (\rho_{ch}^i)^2 \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) \right)$$

$$(1.\text{Kısım}) * (2.\text{Kısım} * 3.\text{Kısım} - 4.\text{Kısım} * 5.\text{Kısım})$$

1.Kısım

$$(10)^{-4} (10)^3 (20889)^2 (1.905 * 10^{17}) (2.02 * 10^{-25}) (\pi)$$

2. Kısım

$$(1.45)^2 \exp \left(-1.45 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

3. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left(-0.9 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.2.

$$\dot{m}_{pl} [\text{mg}] = n_{\text{exz}} m_{\text{Xe}} A_{\text{ch}} v_{\text{ex}} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2} \exp(-\rho_{\text{ch}} \kappa(z, \rho_{\text{ch}}))$$

$$(1.\text{Kısım}) * (2.\text{Kısım} * 3.\text{Kısım} - 4.\text{Kısım} * 5.\text{Kısım})$$

1. Kısım

$$(10)^6 (10)^{-4} (20889) (1.905 * 10^{17}) (2.02 * 10^{-25}) (\pi)$$

2.Kısım

$$(1.45)^2 \exp \left[-1.45 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

3.Kısım

$$\sqrt{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

4.Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left[-0.9 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5.Kısım

$$\sqrt{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

Grafik 6.3.

$$T_{pl} [\text{mN}] = \frac{2A_{ch} m_{Xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{m_b} \exp^{-\rho_{ch} \kappa (\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1. Kısım

$$\frac{(10)^3 (2)(2.02 * 10^{-25})(1.905 * 10^{17})(1)(0.80)(0.44)(300,350,400)(10)^{-4} (\pi)}{0.5 * 10^{-6} * 0.7}$$

2. Kısım

$$(1.45)^2 \exp \left[-1.45 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

3. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left[-0.9 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.4.

$$T_{pl} [mN] = \frac{2A_{ch} m_{Xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{\dot{m}_b} \exp^{-\rho_{ch} \kappa(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2) (2.02 * 10^{-25}) (1.905 * 10^{17}) (1) (0.80) (0.44, 0.64, 0.84) (300) (10)^{-4} (\pi)}{0.5 * 10^{-6} * 0.7}$$

2.Kısım

$$(1.45)^2 \exp^{-1.45 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3}}{1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp^{-0.9 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3}}{1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2} \right)^{\frac{3}{2}}}$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.5.

$$T_{pl} [\text{mN}] = \frac{2A_{ch} m_{xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{m_b} \exp^{-\rho_{ch} K(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2) (2.02 * 10^{-25}) (1.905 * 10^{17}) (1) (0.80, 0.90, 0.95) (0.44) (300) (10)^{-4} (\pi)}{0.5 * 10^{-6} * 0.7}$$

2.Kısım

$$(1.45)^2 \exp^{-1.45 * \left(\frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) * \frac{(x-2) (2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)}$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left[-0.9 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * (x-2) (2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right) \right. \\ \left. \left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.6.

$$n_{pc} = \frac{n_{ex}}{\rho_{ch}} \rho(z)$$

$$\frac{1.905 * 10^{17}}{11.75 * 10^{-3}} * \left(x(10^{-8}) + \frac{(1.5 - 8 * 0.05) 11.75 * 10^{-3}}{0.05(x-2)^3 + 1.5} \right)$$

EK-2

SPT-30 İçin, Scientific WorkPlace Programını Kullanarak Elde Ettiğim Grafiklerin Açık Olarak Hesaplanması:

$$\rho_{ch}^o = 1.5\text{cm}$$

$$\rho_{ch}^i = 0.9\text{cm}$$

$$\rho_{ch}^m = 1.2\text{cm}$$

$$m_{xe} = 2.02 * 10^{-25} \text{ kg}$$

$$n_{ex} = 4.0012 * 10^{17} \text{ m}^{-3}$$

$$I_b = 0.78\text{A}$$

$$V = 250\text{V}$$

$$\eta_V = 0.91$$

Grafik 6.7.

$$T_{pl} [\text{mN}] = m_{xe} n_{ex} v_{ex}^2 \pi \left((\rho_{ch}^o)^2 \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) - (\rho_{ch}^i)^2 \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) \right)$$

$$(1.\text{Kısım}) * (2.\text{Kısım} * 3.\text{Kısım} - 4.\text{Kısım} * 5.\text{Kısım})$$

1.Kısım

$$(10)^{-4} (10)^3 (19069)^2 (4.0012 * 10^{17}) (2.02 * 10^{-25}) (\pi)$$

2. Kısım

$$(1.5)^2 \exp \left(-1.5 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3}}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left(-0.9 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.8.

$$\dot{m}_{pl} [mg] = n_{exz} m_{Xe} A_{ch} v_{ex} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2} \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch}))$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$(10)^{-4} (10)^6 (19069) (4.0012 * 10^{17}) (2.02 * 10^{-25}) (\pi)$$

2.Kısım

$$(1.45)^2 \exp \left[-1.45 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

3.Kısım

$$\sqrt{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

4.Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left[-0.9 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5.Kısım

$$\sqrt{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

Grafik 6.9.

$$T_{pl} [mN] = \frac{2A_{ch} m_{Xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{m_b} \exp^{-\rho_{ch} K(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2)(2.02 * 10^{-25})(4.0012 * 10^{17})(1)(0.78)(0.91)(250,300,350)(10)^{-4} (\pi)}{0.98 * 10^{-6}}$$

2.Kısım

$$(1.5)^2 \exp \left(-1.5 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left(-0.9 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.10.

$$T_{pl} [mN] = \frac{2A_{ch} m_{Xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{\dot{m}_b} \exp^{-\rho_{ch} \kappa(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2) (2.02 * 10^{-25}) (4.0012 * 10^{17}) (1) (0.5, 0.78, 0.94) (0.91) (250) (10)^{-4} (\pi)}{0.98 * 10^{-6}}$$

2.Kısım

$$(1.5)^2 \exp^{-1.5 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3}}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)}$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp^{-0.9 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3}}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)}$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.11.

$$T_{pl} [mN] = \frac{2A_{ch} m_{xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{m_b} \exp^{-\rho_{ch} K(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2) (2.02 * 10^{-25}) (4.0012 * 10^{17}) (1) (0.78) (0.80, 0.91, 0.98) (250) (10)^{-4} (\pi)}{0.98 * 10^{-6}}$$

2.Kısım

$$(1.5)^2 \exp^{-1.5 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) * \frac{(x-2) (2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3}}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.5) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right)}$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 1.45) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(0.9)^2 \exp \left[-0.9 * \left(\frac{2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) * (x-2) (2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right) \right. \\ \left. \left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 0.9) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.12.

$$n_{pc} = \frac{n_{ex}}{\rho_{ch}} \rho(z)$$

$$\frac{4.0012 * 10^{17}}{12 * 10^{-3}} * \left(x(10^{-8}) + \frac{(1.5 - 8 * 0.05) 12 * 10^{-3}}{0.05(x-2)^3 + 1.5} \right)$$

EK-3

ALTA-2KW İçin, Scientific WorkPlace Programını Kullanarak Elde Ettiğim Grafiklerin Açık Olarak Hesaplanması:

$$\begin{aligned}\rho_{ch}^o &= 1.5\text{cm} \\ \rho_{ch}^i &= 0.9\text{cm} \\ \rho_{ch}^m &= 1.2\text{cm} \\ m_{xe} &= 2.02 * 10^{-25} \text{kg} \\ n_{ex} &= 1.94 * 10^{17} \text{m}^{-3} \\ I_b &= 5.2\text{A} \\ V &= 340.5\text{V} \\ \eta_V &= 0.91\end{aligned}$$

Grafik 6.13.

$$T_{pl} [\text{mN}] = m_{xe} n_{ex} v_{ex}^2 \pi \left((\rho_{ch}^o)^2 \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) - (\rho_{ch}^i)^2 \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch})) \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right) \right)$$

$$(1.\text{Kısım}) * (2.\text{Kısım} * 3.\text{Kısım} - 4.\text{Kısım} * 5.\text{Kısım})$$

1.Kısım

$$(10)^{-4} (10)^3 (22255)^2 (1.94 * 10^{17}) (2.02 * 10^{-25}) (\pi)$$

2. Kısım

$$(6)^2 \exp \left[-6 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(4)^2 \exp \left[-4 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.14.

$$\dot{m}_{pl} [mg] = n_{exz} m_{xe} A_{ch} v_{ex} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2} \exp(-\rho_{ch} \kappa(z, \rho_{ch}))$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$(10)^{-4} (10)^6 (22255) (1.94 * 10^{17}) (2.02 * 10^{-25}) (\pi)$$

2.Kısım

$$(6)^2 \exp \left[-6 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

3.Kısım

$$\sqrt{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

4.Kısım

$$(4)^2 \exp \left[-4 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5.Kısım

$$\sqrt{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}$$

Grafik 6.15.

$$T_{pl} [mN] = \frac{2A_{ch} m_{Xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{m_b} \exp^{-\rho_{ch} \kappa (\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.Kısım) * (2.Kısım * 3.Kısım - 4.Kısım * 5.Kısım)$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2)(2.02 * 10^{-25})(1.94 * 10^{17})(1)(0.78)(0.91)(250,340.5,400)(10)^{-4} (\pi)}{6.6 * 10^{-3}}$$

2.Kısım

$$(6)^2 \exp \left[-6 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(4)^2 \exp \left[-4 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.16.

$$T_{pl} [\text{mN}] = \frac{2A_{ch} m_{Xe} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{\dot{m}_b} \exp^{-\rho_{ch} \kappa(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.\text{Kısım}) * (2.\text{Kısım} * 3.\text{Kısım} - 4.\text{Kısım} * 5.\text{Kısım})$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2) (2.02 * 10^{-25}) (1.94 * 10^{17}) (1) (3,5,2,8) (0.91) (340.5) (10)^{-4} (\pi)}{6.6 * 10^{-3}}$$

2.Kısım

$$(6)^2 \exp \left[-6 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(4)^2 \exp \left[-4 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.17.

$$T_{pl} [\text{mN}] = \frac{2A_{ch} m_{xc} n_{ex} I_b \eta_v V_d}{m_b} \exp^{-\rho_{ch} \kappa(\rho_{ch}, z)} \left(1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right)$$

$$(1.\text{Kısım}) * (2.\text{Kısım} * 3.\text{Kısım} - 4.\text{Kısım} * 5.\text{Kısım})$$

1.Kısım

$$\frac{(10)^3 (2) (2.02 * 10^{-25}) (1.94 * 10^{17}) (1) (5.2) (0.80, 0.91, 0.98) (340.5) (10)^{-4} (\pi)}{6.6 * 10^{-3}}$$

2.Kısım

$$(6)^2 \exp \left[-6 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) * \frac{(x-2) (2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]}$$

3.Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 6) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

4. Kısım

$$(4)^2 \exp \left[-4 * \frac{\left| 2 * (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) * \frac{(x-2)(2 * 0.05 * (x-2)^3 - 1.5)}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^3} \right|}{\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}} \right]$$

5. Kısım

$$\left(1 + \left(10^{-8} - (3 * 0.05 * (1.5 - 8 * 0.05) * 4) \frac{(x-2)^2}{(0.05 * (x-2)^3 + 1.5)^2} \right)^2 \right)$$

Grafik 6.18.

$$n_{pc} = \frac{n_{ex}}{\rho_{ch}} \rho(z)$$

$$\frac{1.94 * 10^{17}}{50 * 10^{-3}} * \left(x(10^{-8}) + \frac{(1.5 - 8 * 0.05) 50 * 10^{-3}}{0.05(x-2)^3 + 1.5} \right)$$

ÖZGEÇMİŞ

20 Ağustos 1986 İstanbul-Üsküdar da doğdu. İlk ve Ortaokulu Mebruke Salih Koçak İlköğretim Okulunda tamamlayıp, ortaokuldan sonra, Şişli Teknik ve Endüstri Meslek Lisesine gitmeye hak kazandı. Lise birinci sınıfta puanlarının yüksek olması sebebiyle, Şişli Teknik Lisesine başvuruda bulundu ve kazandı. İkinci sınıftan itibaren şişli teknik lisesine gitmeye başladı. Teknik Liseler o dönemde dört seneydi. Henüz üçüncü sınıfı bitirdikten sonra, üniversite sınavlarına daha iyi hazırlanabilmek gayesiyle, endüstri meslek lisesi diploması alarak, teknik liseden ayrıldı. Ayrıldığında; takvim yaprakları 2003 yılını işaret ediyordu. Bir senelik dersane macerasından sonra 2004 yılında marmara üniversitesi dört yıllık otomotiv öğretmenliği bölümüne gitmeye hak kazandı ve 2008 yılında buradan mezun oldu. Yaklaşık 2-2,5 senelik bir iş hayatından sonra ideali olan fizik çalışmaları için istanbul kültür üniversitesi Fizik bölümüne başvuruda bulundu ve daha sonra burada, bir senelik zorunlu bilimsel hazırlık sınıfından sonra, fizik yüksek lisansı derslerini almaya hak kazandı. Yüksek lisans derslerini başarıyla tamamladıktan, ve de bir kez tez değiştirmek zorunda bırakıldıktan sonra ise; bugün için yüksek lisansını tamamlamış bulunmaktadır.

İstanbul, 2014..