

İNDÜKTİF-EŞLİ RADYO FREKANSLI PLAZMA İYON İTİCİLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Erdal Bozkurt¹ ve Ümmügül Erözbek Güngör²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

Nafiz Alemdaroğlu³
Atılım Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmanın esas amacı, parametrik optimizasyonu yapılmış olan iki-ızgaralı silindir yapıdaki indüktif-eşli radyo frekanslı plazma (RF-ICP) iyon iticilerinin niceliksel itki ve I_{sp} analizlerini yapmaktır. Bu silindirik itici tasarımının simülasyonlarını yapmak için, COMSOL Multiphysics® yazılım programı kullanılmıştır. İtici sistemi, 300 W RF gücüyle, farklı gaz basınçlarında (30-230 mTorr) çalıştırılmıştır. Özgül itme hesapları için, hızlandırma potansiyeli 1110 V olarak alınmış ve yapılan hesaplar sonucunda, itki değerleri 0.411 mN, özgül itme ise 7459 saniye olarak hesaplanmıştır.

GİRİŞ

Günümüzde, basit ve kompakt bir tasarıma sahip olan plazma iticilerinin popülerliği, giderek artmaktadır. Çünkü kullandıkları yakıt miktarı, kimyasal iticilere göre çok daha azdır yani özgül itme değerleri yüksektir. Bu sayede, plazma itici sistemi ile çalışan uzay araçlarının faydalı yükü artmaktadır. Ama öte yandan kullandıkları elektriksel güç miktarı ürettikleri itki miktarına bir sınırlama getirmektedir. Dolayısıyla, bu iticiler megavat (MW) seviyesinde güç sağlaması koşuluyla, füzyon gücünde (Fusion Power) olduğu gibi, 5-6 Ay gibi bir sürede belirli bir ağırlıktaki uzay aracını Mars'a götürebileceklerdir.

Bir diğer önemli husus ise modelleme sonuçları ile gerçek iticiler arasındaki fiziksel yakınlığın çok yüksek olmasıdır. Bu nedenle, plazma iticileri daha iyi performans parametreleri elde edebilmek için geliştirilmek zorundadır. Bu tip iticilerden olan indüktif-eşli radio frekanslı plazma (RF-ICP) iyon iticileri de yüksek özgül itme ve yüksek verim sağladıklarından dolayı en çok tercih edilenlerdendir. İlk defa 1960 yılında, Alman bilim adamı Profesör Horst Loeb, RF-ICP iticileri üzerine araştırmalar yapmaya başladı. Daha sonra, 1922 yılında, Loeb'in araştırmaları öncülüğünde RIT 10 adı verilen itici EURECA uydusu üzerine yerleştirildi [Dobkevicius, 2017]. RF-ICP iyon iticileri, uzay araçlarının itişinde kullanılan bir tür roket motorlarıdır. Bu tip sistemlerin fiziksel çalışma prensipleri elektrohidrokinamik itkiye dayanmaktadır. RF-ICP iticiler, elektrot kullanmadan indüktif deşarj ile iyon üretmektedirler. Bu sayede katot erozyonun sebep olduğu negatif etkiler ortadan kalkar ve iticilerin ömrü daha uzun olur. Ayrıca bu tip iticilerde iyon üretimi ve hızlandırma mekanizmaları birbirinden bağımsız olduğundan daha az RF gücü ile çalışabilen ve daha küçük ebatlarda iticiler üretilebilmektedir.

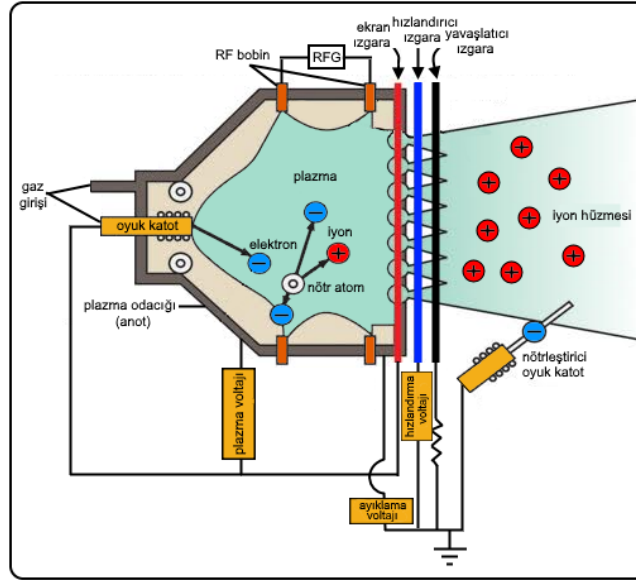
RF-ICP iyon iticileri Şekil-1'de görüldüğü gibi beş ana bölümden oluşmaktadır; plazma odası, RF bobinleri, RF jeneratörü ve uyarılama (matching) sistemi, iyon optik sistemi (IOS-ekran ızgarası, hızlandırıcı ızgarası ve yavaşlatma ızgarası) ve bir nötrleştirici. Genellikle, bu tip sistemlerde

¹ Mastır Öğrencisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., ODTÜ, E-posta: e169695@metu.edu

² Dr. Araştırma görevlisi, Fizik Böl., ODTÜ, E-posta: ummugul@metu.edu

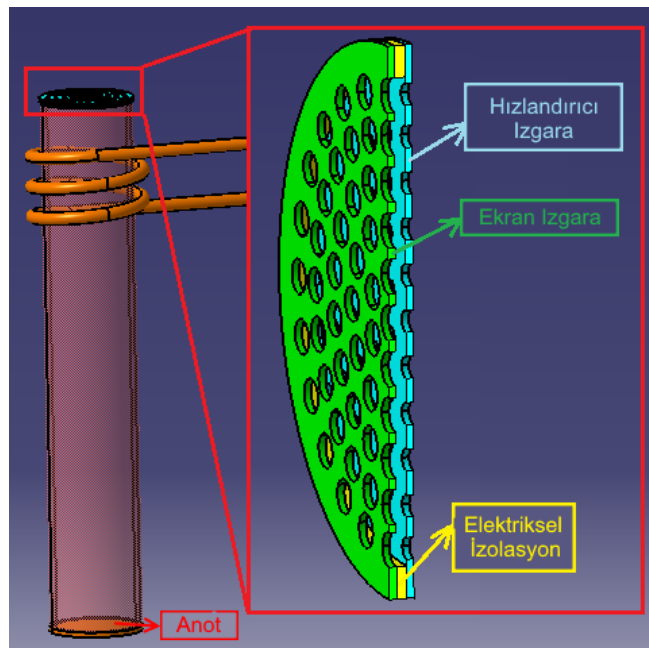
³ Prof. Dr., Sivil Havacılık Yük. O., Atılım Üni., E-posta: nafiz.alemdaroglu@atilim.edu.tr

iletken ve atom numarasının büyük olmasından dolayı yakıt (ortam gazı) olarak Xenon gazı kullanılır [Tsay, 2010]. Plazma odacığında (anotta) bulunan nötr Xenon gazı, RF jeneratöründen uygulanan güç yardımıyla iyonize edilerek plazma oluşturulur. Odacığın etrafına sarılmış olan bobinlerin oluşturduğu elektromanyetik alanların ve hızlandırıcı ızgaraya uygulanan yüksek voltajın etkisiyle de iyonlar hızlandırılarak odacığın dışına doğru püskürtülür. Dışarıda püskürtülerek oluşan iyon hüzmesi de bir oyuk katot yardımıyla nötralize edilir. Böylelikle iticinin yük dengesi korunur [Dobkevicius, 2017].



Şekil 1: Üç-ızgaralı RF-ICP iyon itici sistemi [Dobkevicius, 2017]

Bu çalışmada, iki-ızgaralı (ekran ve hızlandırıcı) silindirik RF-ICP iticinin performans analiz hesapları için COMSOL yazılım programı kullanıldı. Ortam gazı olarak Argon, RF kaynağı olarak da 13.56 MHz tercih edildi. İlk olarak, Şekil-2'deki gibi modellenen itki sisteminin hacmi (farklı en-boy oranı-AR), RF bobin lokasyonu (plazma odasının ortası ve ekran ızgarasına yakın olan kısmı) ve sarım sayısı (3-18) değiştirilerek üretilen plazmanın parametreleri optimize edildi. Daha sonra, elde edilen en verimli koşullarda, itki ve özgül itme hesaplamaları yapıldı.



Şekil 2: İki-İzgaralı silindirik RF-ICP iyon itici modellemesi [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

Şekil 2’de gösterilen itici modellemesinde, silindir yapıdaki plazma odacığı 1.6 mm kalınlığında kuvars camdan oluşturulmuştur. Çapı sabit olup, 0.0268 m’dir. Uzunluğu, AR değerleri 2, 3, 4, 5 ve 6 olacak şekilde değiştirilmiştir. Etrafına sarılan bobinin çapı 4 mm’dir. Odacığın tüm duvarları topraklanmıştır. Ekran ve hızlandırıcı ızgaralarının boyutları aşağıdaki Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1: İyon optik sisteminin ölçüleri

Ekran Izgara	kalınlık	0.4 mm
	delik çapı	1.9 mm
	İzolasyon kalınlığı	0.6 mm
Hızlandırıcı Izgara	kalınlık	0.4 mm
	delik çapı	1.2 mm

YÖNTEM

COMSOL Programı

RF-ICP iyon iticisinin bilgisayar hesap analizleri, COMSOL programının plazma modülünde yer alan frekans-alan ICP ve manyetik alan arayüzleri ve AC/DC modülü kullanılarak yapıldı. Sayısal analizlerin yapımında ise iki-boyutlu (2D) eksenel simetrik sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanıldı. Ayrıca, ICP arayüzü içinde çarpışma kesit hesabı için kullanılan kimyasal reaksiyonlar aşağıdaki Çizelge 2’de listelenmiştir [Bozkurt, Erözbek Güngör ve Alemdaroğlu, 2017].

Çizelge 2: Argon ICP plazma için modellenen kimyasal reaksiyonlar

No.	Çarpışma Çeşidi	Reaksiyon	$\Delta\epsilon$ (eV)
1	Elastik çarpışma	$Ar + e \rightarrow Ar + e$	0
2	Temel durum uyarma	$Ar + e \rightarrow Ar^* + e$	11.50
3	Temel durum iyonlaşma	$Ar + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	15.80
4	Adım adım iyonlaşma	$Ar^* + e \rightarrow Ar^+ + 2e$	4.427
5	Süperelastik çarpışmalar	$Ar^* + e \rightarrow Ar + e$	-11.50
6	Yarıkararlı havuzlama	$Ar^* + Ar^* \rightarrow Ar^+ + Ar + e$	0
7	İki-gövdeli sönm	$Ar + Ar^* \rightarrow Ar + Ar$	0

COMSOL ICP arayüz alan denklemleri, Akışkan (süreklilik veya sürüklenme-difüzyon denklemleri) ve Elektromanyetik (Maxwell denklemleri) alt modelleri ile tanımlanır. Bu alt modeller arasında parametrik olarak güçlü bir bağ vardır. EM alt modelinden hesaplanan elektrik ve manyetik alan değerleri, plazma parametre hesapları için Denklem (1) ve (2)’deki iki-boyutlu (2D) eksenel simetrik Akışkan alt modelinde kullanılır [Bozkurt, Erözbek Güngör ve Alemdaroğlu, 2017].

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot [-(\mu_e \cdot E)n_e - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e - (u \cdot \nabla)n_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_\epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot [-(\mu_\epsilon \cdot E)n_\epsilon - D_\epsilon \cdot \nabla n_\epsilon] + E \cdot \Gamma_e = R_\epsilon - (u \cdot \nabla)n_\epsilon \quad (2)$$

Burada e elektron, ϵ enerji, n yoğunluk, μ devinimlilik, E elektriksel alan, D yayılım, R_e elektron kaynak katsayısı, R_ϵ reaksiyonlar ve çarpışmalardan dolayı elektron enerjisinin kazancı ve kaybı, $E \cdot \Gamma_e$ jul (Om) ısıtma ve $(u \cdot \nabla)n_{e,\epsilon}$ konvektif (ihmal edilmiştir) terimlerdir.

Plazma parametrelerinin değerleri aynı zamanda başlangıç ve sınır koşullarına da bağlıdır. Bizim hesaplarımızda sınır olarak silindirik şeklindeki plazma odacığının duvarları seçilmiştir. Bu duvarların yapıldığı malzeme bile parametre değerlerini ciddi bir şekilde değiştirmektedir. Yapılan hesaplarda, termal emisyon akı ve ikincil elektron emisyon terimleri ihmal edilmiştir. Böylelikle elektron ve enerjinin sınır denklemlerinin son hali Denklem (3)'deki gibi olmuştur [Bozkurt, Erözbek Güngör ve Alemdaroğlu, 2017].

$$-\mathbf{n} \cdot \Gamma_e = \frac{1}{3} v_{e,th} n_e \quad \text{ve} \quad -\mathbf{n} \cdot \Gamma_\varepsilon = \frac{5}{9} v_{e,th} n_\varepsilon \quad (3)$$

Burada $\mathbf{n}$ yüzeye dik olan vektör ve $v_{e,th}$ elektron termal hızıdır.

Modelin en doğru sonucu vermesi için ilk önemli başlangıç koşulu, skaler potansiyeli başlangıç anında sıfır ($V=0$ V) almaktır. İkinci önemli koşul ise manyetik vektör potansiyelinin tüm bileşenlerinin (eksenel, radyal ve azimut) başlangıç değerlerini sıfır ($A=0(r, \Phi, z)$ Wb/m) kabul etmektir. Ayrıca, elektron yoğunluğunun ilk değeri ($n_{e,0}$) $1 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$, ortalama enerjinin ilk değeri (ε_0) 5 V, elektron devinimliliğinin ilk değeri (μ_{en}) $4 \times 10^{24} \text{ m}^{-1} \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ve ortamın gaz sıcaklığı 300 °K olarak ayarlanmıştır [Bozkurt, Erözbek Güngör ve Alemdaroğlu, 2017].

İtke ve Özgül İtme Hesabı

Üretilen uzay araçlarının performanslarını etkileyen en önemli iki faktör; itke (thrust) ve özgül itme (specific impulse) dir. İtke, motor tarafından uzay aracına sağlanan güçtür ve bu güç ızgara deliklerinden (grid holes) geçen atomlar ve iyonlar oluşturmaktadır. Uzay aracının kütlesi, itici motorun sebep olduğu tüketim nedeniyle zamanla değişim göstermektedir. Bu nedenle, itke hesabı Denklem (4)'de ifade edilen momentumun değişim hızı ile yapılır [Goebel ve Katz, 2008].

$$T_i = \dot{m}_i v_i \quad (4)$$

Burada $\dot{m}_i$ iyon kütle akış hızı (kg/s) ve v_i iyon egzoz hızıdır (m.s^{-1}).

Denklem (4)'de ifade edilen iyon kütle akış hızı ile iyon demeti akım yoğunluğu arasındaki bağıntı Denklem (5)'de verilmiştir [Goebel ve Katz, 2008].

$$\dot{m}_i = J_i(r) A \frac{M_i}{e} \quad (5)$$

Burada $J_i(r)$ ekran ızgara üzerinde radyal olarak değişen iyon demeti akım yoğunluğu (A.m^{-2}), A toplam ızgara deliği alanı (m^2), M_i Argon iyonunun kütlesidir (kg).

İyon egzoz hızı ise Denklem (6)'da verilen formülden hesaplanır [Goebel ve Katz, 2008].

$$v_i = \sqrt{\frac{2eV_{net}}{M_i}} \quad (6)$$

Burada V_{net} anot ile hızlandırıcı ızgara arasındaki potansiyel farkıdır (V).

Denklem (5) ve (6)'daki değerler, Denklem (4)'de yerine yerleştirilirse Denklem (7)'deki itke formülü elde edilir [Goebel ve Katz, 2008].

$$T_i = I_i \sqrt{\frac{2M_i V_{net}}{e}} \quad (7)$$

Burada itkinin birimi Newton'dur ve I_i toplam iyon demet akımını (A) ifade eder.

Uzay uygulamalarında kullanılan iticilerin itkileri, meganewton (MN)-mikronewton (μN) aralığında değişmektedir [Aaresland, Bredin, Popelier ve Chabert, 2014]. RF iticiler ise genellikle milinewton (mN) civarında itki üretmektedir [Türköz ve Çelik, 2014; Lotz, 2013; Tsay, 2006].

Ayrıca, Denklem (6) ve (7)'deki net voltaj hesabı için Denklem (8)'de verilen formül (Child Langmuir kuralından yola çıkılmıştır) kullanılır [William, 2013; Lotz, 2013; Tsay, 2006].

$$V_{net} = \left[\frac{9 J_{mak} l_e^2}{4 \epsilon_0} \right]^{2/3} \left(\frac{2e}{M_i} \right)^{-1/3} \quad (8)$$

Burada J_{mak} Şekil 3'de ekran ızgara üzerinde çizilen dairelerin merkezinde (r_0) hesaplanan iyon akım yoğunluğu ve l_e kılıf kalınlığı (m) dir. Kılıf kalınlık değeri Denklem (9)'daki formül kullanılarak hesaplanır [William, 2013; Tsay, 2006].

$$l_e = \sqrt{(l_g + t_s)^2 + \frac{d_s^2}{4}} \quad (9)$$

Burada l_g ızgaralar arası uzaklık, t_s ızgara kalınlığı ve d_s ekran ızgara deliğinin çapıdır.

Denklem (7)'deki toplam iyon demet akımının değerini bulmak için ilk önce ekran ızgara üzerindeki radyal iyon demeti akım yoğunluğunu hesaplamak gerekir. Biz bu noktada iyon akı korunumundan yola çıkarak Denklem (10)'da verilen ekran ızgaradaki akım yoğunluğunu, Denklem (11)'deki kılıf kenarında (sheath edge) hesaplanan Bohm iyon akım yoğunluğuna eşit kabul ettik [Maurice, 2003; Tsay, 2010; Liebermann ve Lichtersberg, 2005].

$$J_{i-ekran} = en_{i,e} \mu_i E_{z,e} - e D_{i,e} \nabla n_{i,e} \quad (10)$$

Burada $J_{i-ekran}$ ekran ızgaradaki iyon demeti akım yoğunluğu (A.m^{-2}), $n_{i,e}$ ekran ızgaradaki iyon yoğunluğu (m^{-3}), μ_i iyon devinimlilik sabiti ($\text{m}^2.\text{V}^{-1}.\text{s}^{-1}$), $E_{z,e}$ elektriksel alanın ekran ızgara üzerinde z yönündeki bileşeni, D_i iyon difüzyon sabiti ($\text{m}^2.\text{V}^{-1}$) ve $\nabla n_{i,e}$ ekran ızgaradaki iyon yoğunluğu gradyanıdır.

İyon difüzyon sabitini, Einstein bağıntısından [Tsay, 2006] yazarsak [Rafatov, Bogdonov ve Kudryavtsev, 2011 ve 2012];

$$J_{i-ekran} = \mu_i (en_{i,e} E_{z,e} - k_B T_0 \nabla n_{i,e}) \quad (11)$$

olarak elde edilir. Burada k_B Boltzmann sabiti (J/K) ve T_0 iyon sıcaklığıdır ($^\circ\text{K}$) [Dobkevicius, 2017; Maurice, 2003; Tsay, 2010; Liebermann ve Lichtersberg, 2005].

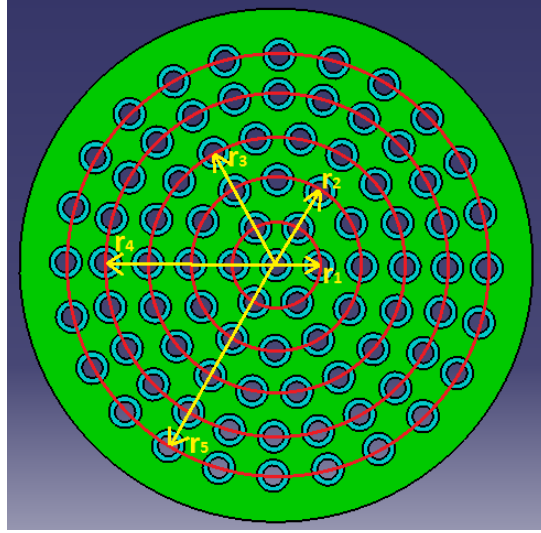
$$J_{i-Bohm} = en_{i,k} u_b = en_{i,k} \sqrt{\frac{e T_{e,k}}{M_i}} \quad (12)$$

Burada J_{i-Bohm} Bohm kılıf kenarındaki iyon demeti akım yoğunluğu (A.m^{-2}), $n_{i,k}$ kılıf kenarındaki iyon yoğunluğu (m^{-3}), $T_{e,k}$ kılıf kenarındaki elektron sıcaklığıdır (eV).

Denklem (10) ve (11)'daki iyon akım yoğunluklarının eşitliğinden [Maurice, 2003; Tsay, 2010; Liebermann ve Lichtersberg, 2005] iyon devinimliliği değeri hesaplanabilmektedir.

$$\mu_i = \frac{en_{i,k} \sqrt{\frac{eT_{e,k}}{M_i}}}{en_{i,e} E_{z,e} - k_B T_0 \nabla n_{i,e}} \quad (13)$$

Hesaplanan bu devinimlilik ekran ızgara üzerindeki her noktada eşit olmalıdır. Bu sabitlikten yola çıkılarak Şekil 3`de gösterilen ekran ızgarası radyal analizi yapılmıştır. Bu şekilde ifade edilen yarıçap değerleri ve dairelerin içerdği ızgara delik sayıları Çizelge 3`de verilmektedir.



Şekil 3: Ekran ızgaranın radyal çap gösterimi

Çizelge 3: Ekran ızgara üzerine çizilen dairelerin yarıçap değerleri ve içerdği delik sayıları

r (mm)	r_0	0
	r_1	2.5
	r_2	5
	r_3	7.5
	r_4	10
	r_5	12.3
N	N_0	1
	N_1	6
	N_2	12
	N_3	18
	N_4	24
	N_5	24

Hesaplamalarda, ızgara deliğinin yarıçapı ise 0.95 mm olarak alınmıştır.

Bir diğer performans faktörü olan özgül itme (I_{sp}) formülü ise Denklem (14)`de verilmiştir [Goebel ve Katz, 2008; Kindberg, 2017].

$$I_{sp} = \frac{v_i}{g_0} \quad (14)$$

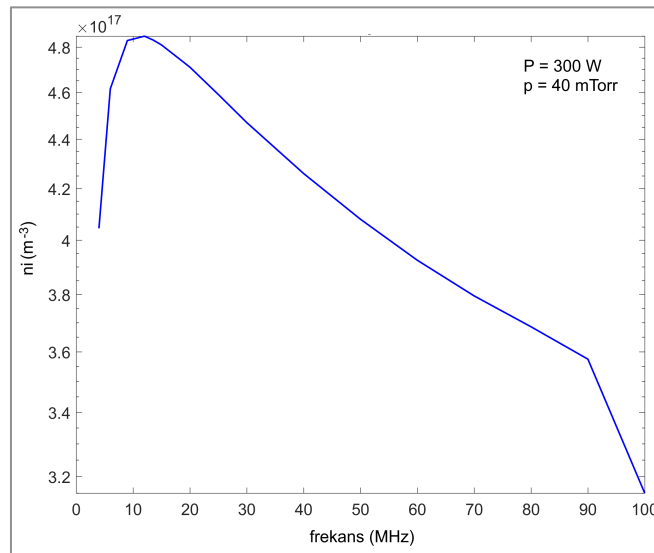
Burada v_i egzoz (Denklem (6))'ya bakınız) hızını ve g_0 da deniz seviyesindeki yerçekimi sabitini göstermektedir. Özgül itmenin birimi saniyedir.

Hesaplanan özgül itmenin değeri ne kadar yüksek olursa, uzay araçlarının yakıt tüketimi de o kadar az olacaktır [Aaresland, Bredin, Popelier ve Chabert, 2014].

UYGULAMA VE TARTIŞMA

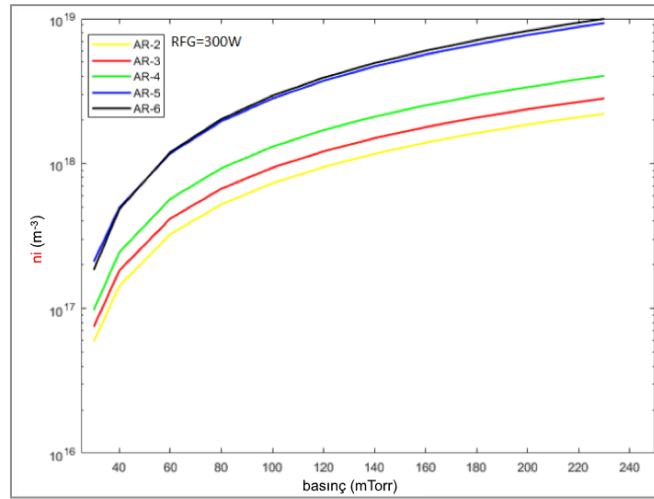
Parametrik Analiz Sonuçları

RF ICP iyon iticinin verimi üretilen plazmanın performansına ve ayıklama (extraction) performansına bağlıdır. Plazma performansını etkileyen faktörler, RF jeneratörünün gücü (P_{rf}), iyon demeti akımı (I_i) ve gaz akış hızıdır. Ayıklama performansını ise plazma parametreleri, ayıklama voltajı, ızgara geometrisi ve ortam gazı etkiler [Williams, 2013; Lotz, 2013]. Bu nedenle, verimli bir itici için verimli bir plazma üretmek gerekir. Bu bağlamda ilk adım, kullanılacak RF jeneratörünün frekansına karar vermektir. Şekil 4'de görüldüğü gibi yüksek iyon yoğunluğu elde edebilmek için 10 MHz civarında frekansı olan jeneratör kullanılmalıdır. Biz bundan dolayı simülasyonlarımızda frekansı 13.56 MHz'e ayarladık.

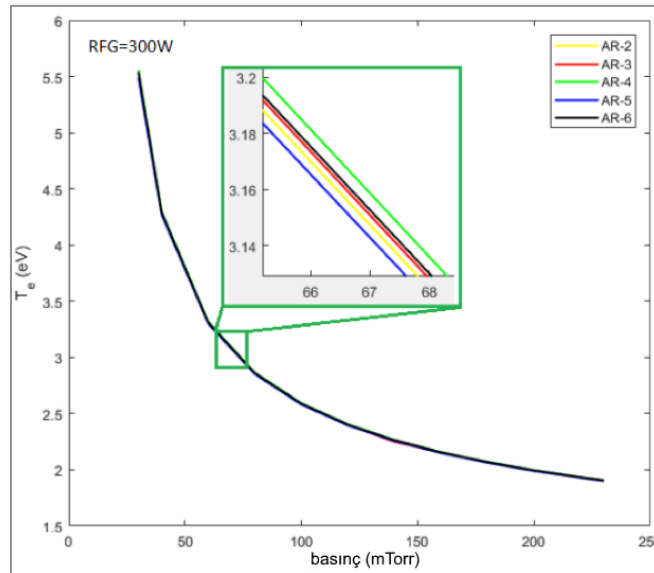


Şekil 4: 40 mTorr gaz basıncı ve 300 W RF gücünde üretilen plazmadaki iyon yoğunluğunun RF frekansı ile değişimi

Plazma parametre optimizasyonunda ikinci önemli husus ise plazma odacığının hacmine karar vermektir. İdeal gaz denkleminden bilindiği üzere, sabit sıcaklık ve gaz basıncı koşullarında hacim arttıkça plazma yoğunluğu da artmalıdır. Şekil 5'e bakıldığında bu artış açık bir şekilde görülür. En çok plazma iyon yoğunluğu, odacığın en-boy oranı 6'ya eşit olduğunda ve Argon gaz basıncı 230 mTorr'a ayarlandığında elde edilir.



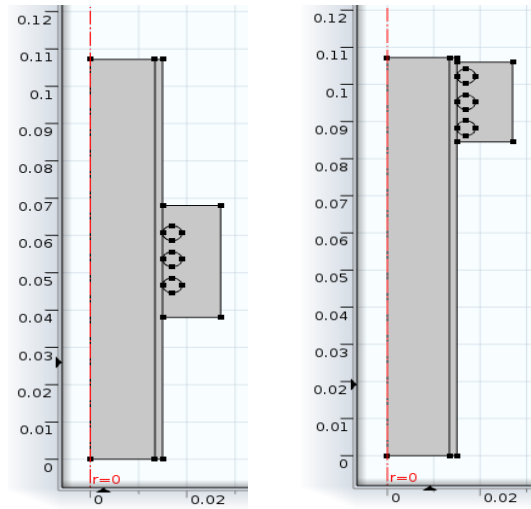
Şekil 5: 300 W RF gücünde üretilen plazmadaki iyon yoğunluğunun AR ve gaz basıncı ile değişimi [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].



Şekil 6: 300 W RF gücünde üretilen plazmadaki elektron sıcaklığının AR ve gaz basıncı ile değişimi [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

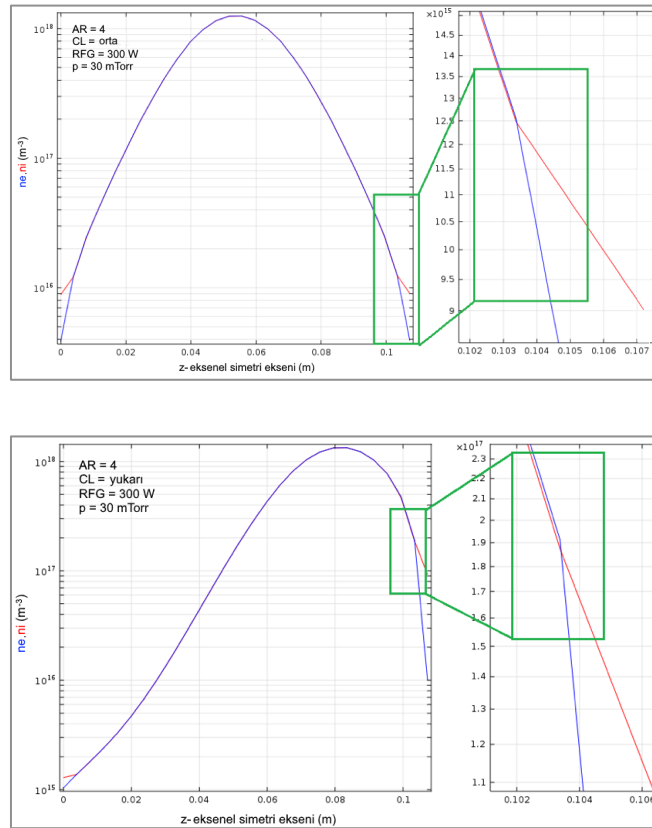
Şekil 6, bize elektron sıcaklığı ile gaz basıncı arasında güçlü bir bağ olduğunu göstermektedir. Elektron sıcaklığı gaz basıncı ile giderek azalmaktadır. Bunun en önemli nedeni, maruz kaldığı basınca göre plazma içinde gerçekleşen ısıtma işlemlerinin farklılaşmasıdır. Düşük basınçlarda, parçacıklar birbirlerinden uzak olduklarından çarpışma olasılıkları azdır. Bu durumda plazma odacığının duvarlarından kopan elektronlar duvarlara yakın olan cilt katmanını (skin layer) dediğimiz bölgelerde yüksek sıcaklık artışına neden olur. Bu tip ısınma şekli çarpışmasız (collisionless) ısınma olarak adlandırılır. Basıncı arttırdığımızda ise parçacıklar arasındaki ortalama serbest yol (mean free path) giderek azalır ve böylece parçacıkların çarpışma olasılıkları artar. Artık elektronların ısınma işlemi çarpışma (collisional heating) bazlı olur. Ayrıca plazmada ısınan bölge de bu şekilde yer değiştirir. Elektron sıcaklığı duvarlara yakın bölgede değil plazmanın ortasında (bulk region) en yüksek olur ve duvarlara doğru azalır. Isınma şeklindeki bu değişimden dolayı elektron sıcaklığı gaz basıncı arttıkça üssel (exponential) olarak giderek azalır.

Bir diğer husus ise RF bobininin plazma odacığının hangi bölgesine sarılması gerektiğidir. Bu konu üzerine yapılan çalışmalar Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir.



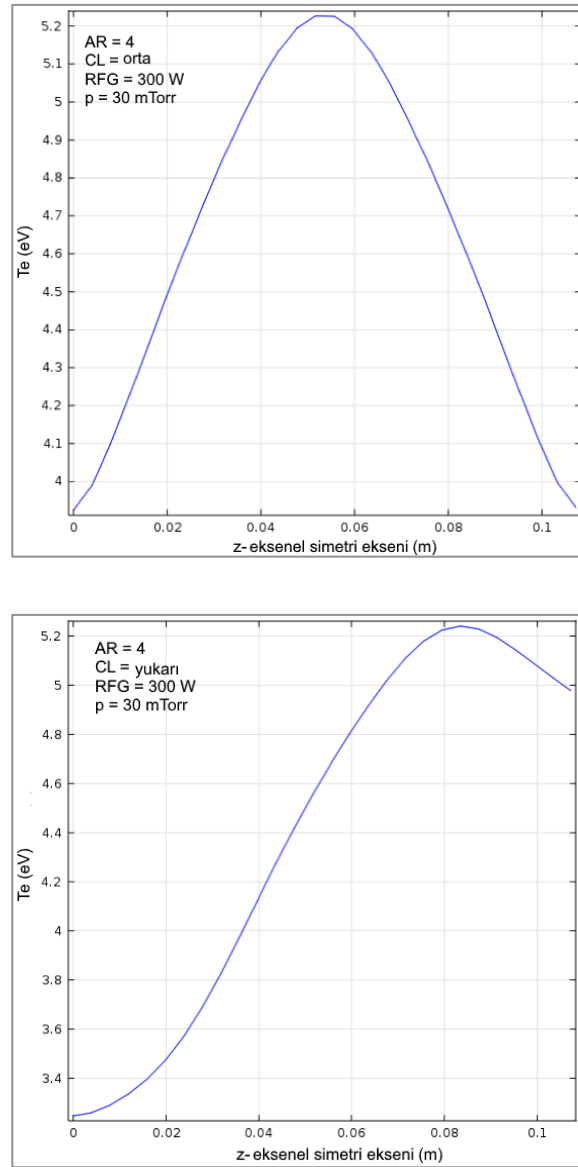
Şekil 7: RF bobininin sarım bölgeleri [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

Soldaki Şekil 7’de bobinler AR=4 boyutlarına göre çizilmiş plazma odacığının tam ortasına, sağdaki Şekil 7’de ise ekran ızgarasının bulunduğu üst noktasına yerleştirilmiştir. Böylelikle sağdaki Şekil 7’de, bobinler 41.6 mm yukarı doğru kaydırılmıştır. Bu bölgesel analizin sonuçları Şekil 8’de görülmektedir.



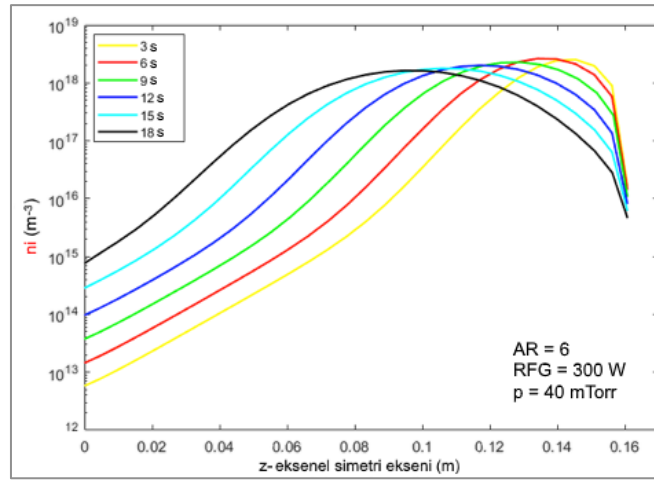
Şekil 8: Elektron ve iyon yoğunluklarının plazma odacığının z-simetri eksenı boyunca bobin yerleşim bölgesine bağlı olarak değişimi [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

Şekil 8’de yukarıdaki şekil bobinler ortadayken yapılan analize, aşağıdaki şekil ise bobinler yukarıda kaydırıldığında yapılan analize aittir. Bu iki şekil bize ekran ızgara bölgesinde yani itki hesabının yapılacağı bölgede bobinlerin yukarıya kaydırılmasıyla 10 kat daha fazla yoğunluk elde edildiğini gösterir.



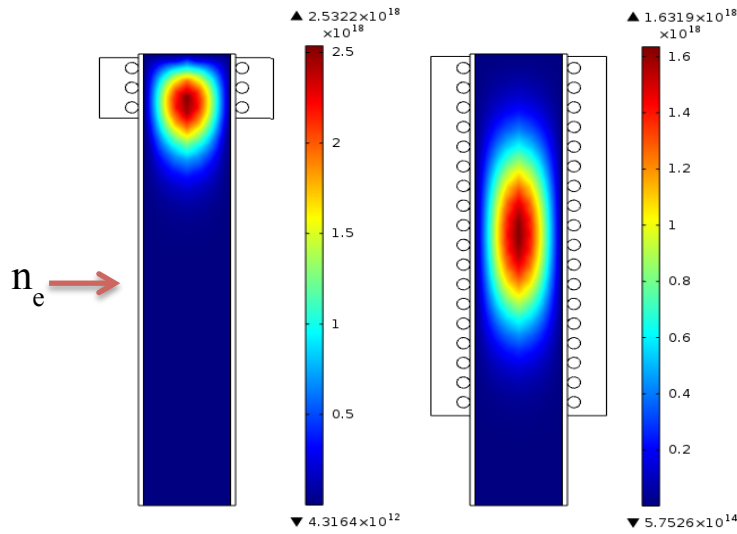
Şekil 9: Elektron sıcaklığının plazma odacığının z-simetri ekseni boyunca bobin yerleşim bölgesine bağlı olarak değişimi [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

Şekil 9`da yukarıdaki şekil bobinler ortadayken yapılan analize, aşağıdaki şekil ise bobinler yukarıdayken yapılan analize aittir. Bu iki şekilden de anlaşılacağı üzere elektron sıcaklığının tepe değeri bobin yerleşim bölgesine göre değişmemektedir. Sadece Gauss eğrisi şeklinde olan sıcaklık dağılımı değişen bölgeye doğru kayar. Böylece maksimum sıcaklık o bölgede elde edilir.



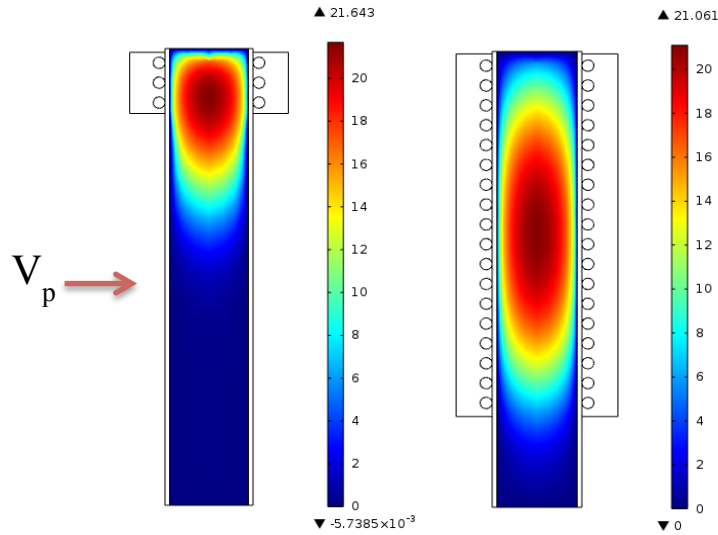
Şekil 10: İyon yoğunluğunun z-ekseni boyunca RF bobin sarım sayısına bağlı olarak değişimi [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

Şekil 10'daki analize göre iyon yoğunluğunun tepe değerinde sarım sayısı ile birlikte pek bir değişim gözlenmese de dağılım da ciddi farklılıklar vardır. Sarım sayısı arttıkça yoğunluk z-ekseni boyunca artarak yayılır. Yani artan sarım sayısı ile birlikte plazma odacığının uzunluğu boyunca daha homojen bir dağılım elde edilir. Bunu Şekil 11'de verilen elektron yoğunluğu analizinde de açıkça görmek mümkündür. Her iki analizde de ekran ızgarasının yerleştirildiği uç bölgede ise artan sarım sayısı ile yoğunluğun azaldığı görülür. Halbuki biz, daha çok itki ve özgül itme elde etmek için ekran ızgaradan dışarıya daha çok iyon atılmasını istiyoruz.



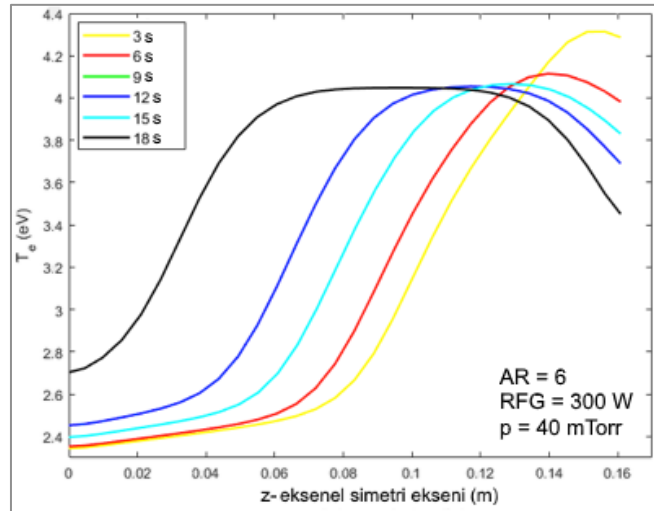
Şekil 11: Üç ve on sekiz sarımlı modellemeler için elektron yoğunluğunun iki boyutlu (eksenel ve radyal) dağılımı [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

Şekil 10 ve 11 dikkatli incelendiğinde iyon ve elektron yoğunluklarının fazla olmamakla birlikte birbirlerinden farklı oldukları gözlemlenir. Bunun sonucunda da Şekil 12'de olduğu gibi plazma potansiyeli sabit kalmaz ve bu yoğunluk farklılıklarından dolayı z-ekseni boyunca değişir. Ayrıca artan bobin sarım sayısı ile plazma potansiyeli de eksen boyunca homojen dağılım gösterir. Bir de tepe değeri artışla çok az azalır.



Şekil 12: Üç ve on sekiz sarımlı modeller için plazma potansiyelinin iki boyutlu (eksenel ve radyal) dağılımı [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

Elektron sıcaklığının plazma odacığının uzunluğu boyunca sarım sayısına bağlı olarak değişimi Şekil 13'de verilmiştir. Bu grafiğe göre, sıcaklık az sarımlarda tepe (peak) değerine sahip iken artan sarım sayısı ile tepenin azalarak düzleştiği ve eksen boyunca pek çok noktada sıcaklığın sabit olduğu görülür. Eksene genel olarak bakıldığında ise sarım sayısı arttıkça homojenlik gözlemlendiğinden eksen boyunca sıcaklık da artar.

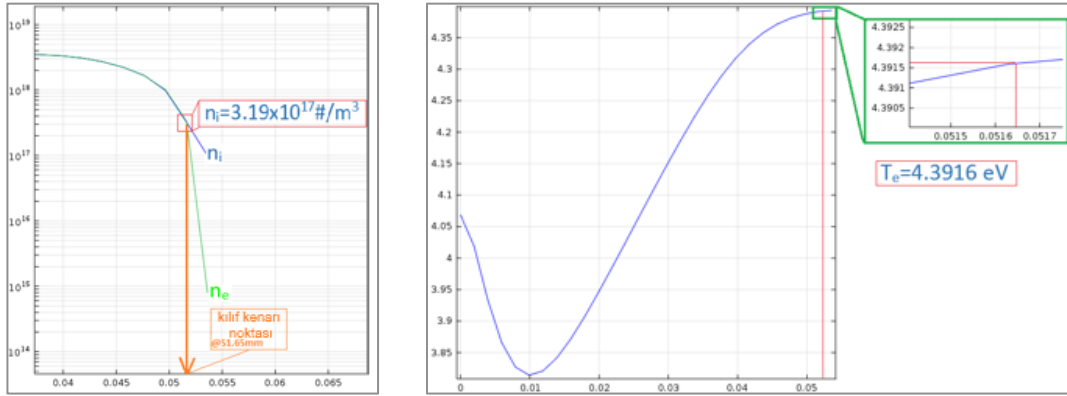


Şekil 13: Elektron sıcaklığının z-ekseni boyunca RF bobin sarım sayısına bağlı olarak değişimi [Erözbek Güngör, Bozkurt ve Alemdaroğlu, 2018].

İtme ve Özgül İtme Sonuçları

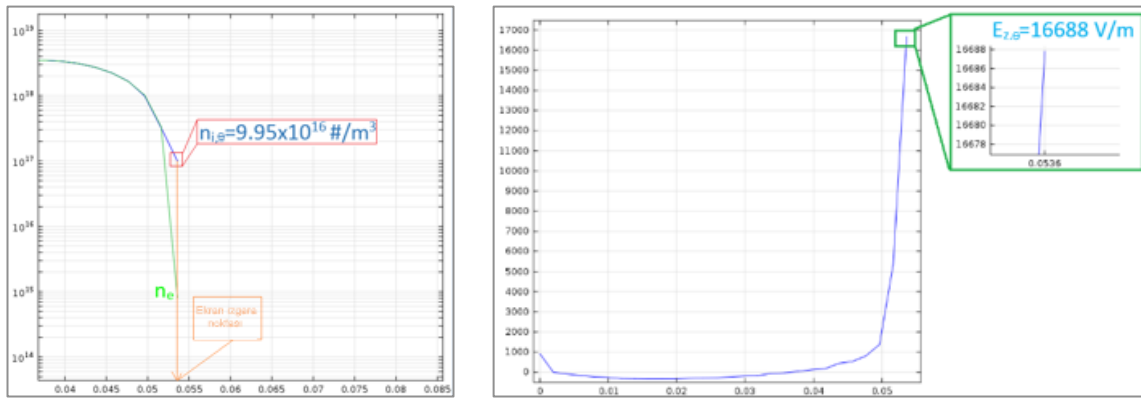
Yöntem bölümünde de bahsettiğimiz üzere itme ve özgül itme hesaplarındaki en önemli noktalardan biri iyon akım yoğunluğunun korunumu diğeri ise iyon devinimliliğinin ekran ızgara üzerindeki her noktada aynı olmasıdır. Parametrik analiz sonuçlarına göre en fazla iyon yoğunluğu AR=6'da elde edilmesine rağmen, yaptığımız analizler sonucunda akım yoğunluğu korunumu en iyi AR=2'de görülmektedir. Bu nedenle, itme ve özgül itme hesaplarında bu en-boy oranı kullanılmıştır. Üretilen plazmanın koşulları ise $p=40$ mTorr ve $P=300$ W tır.

Bu hesaplamaların yapılmasındaki ilk aşama kılıf kenarı noktasında Bohm iyon akım yoğunluğu hesaplamaktır.

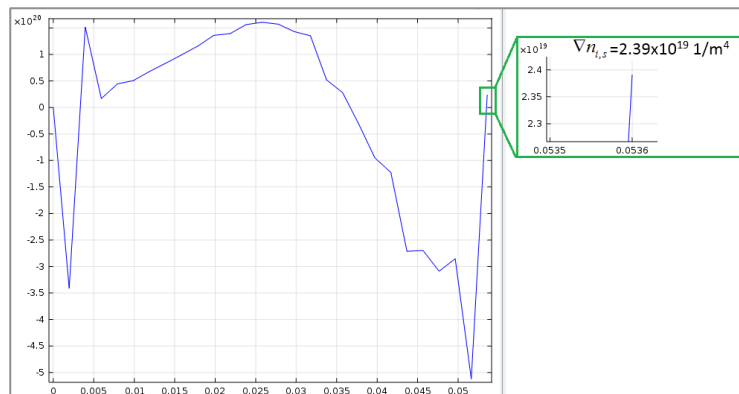


Şekil 14: Solda kılıf kenarındaki iyon yoğunluğu grafiği sağda ise kılıf kenarındaki elektron sıcaklığı grafiği

Şekil 14'deki iyon yoğunluğu ve elektron sıcaklık değerleri, Denklem (10)'da yerine koyulduğunda Bohm iyon akım yoğunluğu yaklaşık 166 A.m^{-2} olarak bulunur. Bundan sonraki aşama ekran ızgara üzerinde iyon akım yoğunluk hesabı yapmaktır.



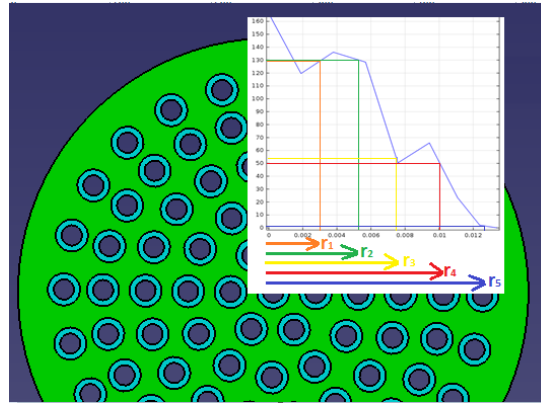
Şekil 15: Solda ekran ızgara üzerindeki iyon yoğunluğu grafiği sağda ise ekran ızgara üzerindeki elektriksel alanın z-bileşeni grafiği



Şekil 16: Ekran ızgara üzerindeki iyon yoğunluğu radyal gradyan grafiği

Şekil 15 ve 16'daki iyon yoğunluğu, elektriksel alan ve gradyan değerleri, Şekil 14'ten hesaplanan Bohm iyon akım yoğunluğu ile birlikte Denklem (11)'de yerine koyulduğunda iyon devinimliliği

$0.6942 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ olarak elde edilir. Elde edilen bu değer ile Çizelge 3'deki yarıçap ve delik değerleri kullanılarak hesaplanan iyon akım yoğunluğunun radyal değişimi Şekil 17'de görülmektedir.



Şekil 17: Ekran ızgaradan çıkan iyon demeti akım yoğunluğunun radyal değişimi

İtki ve özgül itme hesaplarının yapılmasındaki son aşama ise iyonları hızlandırmak için uygulanacak minimum voltaj değerinin (Denklem (8)'e bakınız) hesaplanmasıdır. Bu hesap için gerekli olan $J(r_0)$ değeri $166.479 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Bu değere göre uygulanması gereken minimum voltaj yaklaşık 1103.26 V 'tur. Bu nedenle, biz V_{net} değerini 1110 V olarak aldık. Bu ve diğer hesaplanan gerekli değerleri Denklem (7)'de yerine koyduğumuzda elde ettiğimiz itki değeri 0.411 mN 'dur. Yöntem bölümünde de değindiğimiz gibi RF iticiler mN mertebesinde itki sağlarlar. Dolayısıyla hesaplanan bu değer gerçeğe uygundur.

Özgül itme hesabı için ise Denklem (6)'daki hız değeri hesaplanmalıdır. Seçilen V_{net} ve diğer hesaplanan değerler kullanıldığında egzoz hızı yaklaşık 73175 m/s olarak bulunur. Buradan da özgül itme 7459 s olarak bulunur.

SONUÇ

RF-ICP iticilerinin performansı, itki ve özgül itme değerlerine direk olarak bağlıdır. Bu değerler ne kadar yüksek olursa, tasarlanan iyon iticinin performansı da o kadar iyi olur. Ayrıca uygulama ve tartışma bölümünde bahsedilen analizlerden de anlaşılacağı üzere itici performansı dolaylı olarak büyük ölçüde plazma parametre değerlerine bağlıdır. Fakat bu noktada parametre optimizasyonundaki sınırlamalara dikkat etmek gerekir. Yapılan analiz sonuçlarına göre; iyon yoğunluğu artan AR değeriyle armasına rağmen $AR=2$ 'den büyük modellemelerde iyon akı korunumunun bozulduğu, RF gücü 300 W 'ı geçmeye başlayınca V_{net} değerinin dolayısıyla da özgül itme değerinin makul olmayacak derecede arttığı gözlenmiştir. Bu hususlar dikkate alındığında, bizim basit silindir şeklindeki tasarımıımızın gerçeğe en uygun şekilde sonuç vermesi için sistemin 300 W RF gücünde, mTorr civarında gaz basınçlarında ve itici ızgaraları arasına 1200 V civarında hızlandırma gerilimi uygulayarak çalıştırılması gerekmektedir.

Kaynaklar

- Aaresland, A., Bredin, J., Popelier, L. ve Chabert, P., 2014. Direction for the Future – Successive Acceleration of Positive and Negative Ions Applied to Space Propulsion, arXiv:1411.1538v1[physics.acc-ph].
- Bozkurt, E., Erözbek Güngör, Ü. ve Alemdaroğlu N., Validation and Benchmarking of COMSOL 2D Axisymmetric Inductively Coupled Argon Plasma Model, 9. Ankara Uluslararası Havacılık ve Uzay Konferansı, AIAC 2017-198, Ankara-Türkiye
- Chabert, P., Monreal, J. A., Bredin, J., Popelier, L. ve Aaresland, A., 2012. Global model of a gridded-ion thruster powered by a radiofrequency inductive coil, Physics of Plasmas, Cilt.19, No.073512.
- Erözbek Güngör, Ü., Bozkurt, E. ve Alemdaroğlu N., 2018. Parametrical optimization of inductively coupled RF ion thruster design, J Phys Chem Biophys, Cilt.8.
- Goebel, D. M. ve Katz, I., 2008. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, Kitap, JPL Uzay Bilimi ve Teknoloji Serileri, s.25.

- Kindberg, P., 2017. Development of a miniature Gridded ion thruster, Mastır Tezi, Luleå Teknoloji Üniversitesi, İsveç.
- Liebermann M.A. ve Lichtersberg A.J., 2005. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Kitap, 2. Baskı, ISBN: 0-471-72001-1, New Jersey.
- Lotz, B., 2013. Plasma physical and material physical aspects of the application of atmospheric gases as a propellant for Ion-Thruster of the RIT-Type, Doktora Tezi, Giessen Üniversitesi.
- Maurice C.Y.M., 2003. Inductively coupled plasmas: ion Dynamics and interactions with bone tissue, Doktora Tezi, Eindhoven Teknoloji Üniversitesi.
- Rafatov, I., Bogdonov, E.A. ve Kudryavtsev A.A., 2011. On the numerical modelling of a dc driven glow discharge plasma, 30. ICPIG, Birleşik Kırallık.
- Rafatov, I., Bogdonov, E.A. ve Kudryavtsev A.A., 2012. On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge, Physics of Plasmas, Cilt.19, No.0335002.
- Tsay, M. M., 2006. Numerical Modeling of a Radio-Frequency Micro Ion Thruster, Mastır Tezi, MİT.
- Tsay, M. M., 2010. Two-Dimensional Numerical Modeling of Radio-Frequency Ion Engine Discharge, Doktora Tezi, MİT.
- Türköz, E. ve Çelik, M., 2014. 2-D Electromagnetic and Fluid Models for Inductively Coupled Plasma for RF Ion Thruster Performance Evaluation, IEEE Transactions on Plasma Science, Cilt.42, No.1, s.235-240.
- Williams L. T., 2013. Ion Acceleration Mechanism of Helicon Thrusters, Doktora Tezi, Georgia Teknoloji Enstitüsü.