

İSTANBUL KÜLTÜR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HALL İTME MOTORUNUN SORGUCUNDAKİ YÜK
DEĞİŞİMİ PARÇACIKLARININ MODELLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖNDER ÇATMABACAK

1009151004

FİZİK

TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. AYŞEGÜL YILMAZ

Haziran 2012

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1: ELEKTRİKLİ İTME MOTORLARININ TARİHÇESİ.....	1
BÖLÜM 2: ELEKTROSTATİK İTME MOTORLARI.....	4
• Kimyasal sistemlere göre avantajları.....	5
• Sorunlar.....	5
• Uygulamalar.....	6
BÖLÜM 3: HALL İTME MOTORU.....	8
• Sabit Plazma İtme Motoru (Stationary Plasma Thruster- SPT).....	9
• Anot Katmanlı İtme Motoru(Thruster with Anode Layer- TAL).....	9
BÖLÜM 4: HALL İTME MOTORUNUN FİZİĞİNE GİRİŞ.....	13
• Hall etkisi.....	14
• İyonlaşmış gazlarda Hall etkisi.....	15
• Roket eşitlikleri.....	16
• Kuvvet Transferi.....	17
• İtme kuvveti nasıl elde edilir ?	18
• Performans parametreleri.....	20
• Plazma parametreleri ve motorun gücü.....	21
BÖLÜM 5: SORGUÇ, YÜK DEĞİŞİMİ VE UZAY ARACI ETKİLEŞİMİ.....	23
• Sorguç.....	24
• Sorguç Bileşenleri.....	25
• Sorguç karakteristiği.....	25

• Sorguç fiziği.....	26
• Yük değişimi (Charge Exchange-CEX).....	26
• CEX akımının sayısal olarak değerlendirilmesi.....	28
• Motor nötrlerinin ürettiği CEX akısı.....	29
• Arka plan nötrlerinin ürettiği CEX akısı.....	30
• Uzay Aracı Etkileşimleri.....	32
• Püskürtme ve kirlenme (Sputtering and Contamination).....	33
BÖLÜM 6: YÜK DEğİşİMİ PARÇACIKLARININ İNCELLENMESİ.....	35
• Yük değişimi parçacıklarının hızlarının modellenmesi.....	37
• Sonuç ve Tartışma.....	52
KAYNAKÇA.....	53

ŞEKİL LİSTESİ

- z ; Sorgucun merkez doğrultusundaki koordinat
- $\rho(z)$; Sorgucun yarıçapı
- $T(z)$; İtme kuvveti
- $\kappa(z)$; Parçacık yörüngesinin eğrilik parametresi
- N_{Xe} ; Motorun çıkışındaki birinci dereceden iyonlaşmış parçacıkların sayısı
- v_{ex} ; Çıkış hızı
- v_B ; Bohm hızı
- ρ_{ch} ; Motorun odacık yarıçapı
- V_{ch} ; Motorun odacık hacmi
- L_{AL} ; Anot katmanının uzunluğu
- V_d ; Deşarj potansiyeli
- m_{Xe} ; Zenon un atomik kütlesi
- e ; Birim elektrik yükü
- $n_{ex}(z)$; Birincil iyonların sayı yoğunluğu
- $n_{ex}(0)$; Motorun çıkışındaki sayı yoğunluğu
- θ_{div} ; Yarı-ıraksama açısı

TABLO LİSTESİ

Tablo 1: Xe^+ için olası yük değişimi reaksiyonları.....	40
Tablo 2: Xe^+ için şekil 6.2 deki olası reaksiyonlar.....	41
Tablo 3: Xe^{+2} için Şekil 6.3'teki olası reaksiyonlar.....	47
Tablo 4: Xe^+ için şekil 6.3' teki sorguç yüzeyindeki reaksiyonlar.....	48

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1: 1916' da Goddard öğrencileriyle beraber ilk iyon motoru denemesi.....	2
Şekil 2: Hall Etkisi motorunun çalışma prensibi.....	10
Şekil 3: Hall etkisi.....	13
Şekil 4: Hall itme motorunun sorguç kısmı.....	23
Şekil 6.1: Sorgucun z eksenine göre değişimi.....	38
Şekil 6.2: HET-P5 için birinci dereceden iyonların parçacık yörüngesi boyunca hızları.....	42
Şekil 6.3: 2. Dereceden iyonlaşmış Xe iyonlarının oluşturduğu sorguç yüzeyi...	48

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, “Hall itme motorunun sorgucundaki yük değişimi parçacıklarının incelenmesi” konu olarak seçilmiş ve İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Anabilim Dalı için yüksek lisans bitirme tezi olarak hazırlanmıştır.

1 sene boyunca yoğun ısrarımı geri çevirmeyen, çalışmalarım öncesinde ve çalışmalar sırasında, edinmiş olduğu bilgi birikimlerini benimle paylaşan, beni bir öğrenciden çok bir meslektaş olarak gören, tanışmamızdan itibaren fiziği yeniden tanımamı ve bir amacımın olmasını sağlayan hocam Doç. Dr. Sayın Ayşegül YILMAZ ' a en derin teşekkürlerimi ve şükranlarımı bir borç bilirim.

Ayrıca doğumumdan itibaren, hayatımın her alanını rekabeti yüksek bir yarış haline getiren ve bunu sürekli kılan, ikiz kardeşim Onur ÇATMABACAK' a teşekkürlerimi sunarım.

Bunların yanısıra dersini aldığım, bilinçsiz olarak geldiğim bu bölümde bana fiziği sevdiren, kendilerinden birşeyler katan ve bugünlere gelmemde emeği olan; lisans danışmanım Hande hocama, Fizik 1 ve 2 derslerindeki örneklemeleri ve ders anlatımıyla hocam Dr. Ertuğrul BOLCAL ' a, fiziğin matematiğini sevdiren hocam Prof. Dr. Şehsuvar ZEBİTAY ' a, elektromanyetik teori ve istatistiksel fizik dersleri ve bir kısım hayat bilgisi veren hocam Prof. Dr. Ventsislav DIMITROV ' a , kuantum mekaniği dersini aldığım, asıl olarak araştırma yapma şevkini, öğrenmenin yemek, içmek gibi bir ihtiyaç olduğunu ve diğerlerinden farklı olmam gerektiğini ama en çok ta BİLİMSEL METODOLOJİ ' nin ne olduğunu öğrendiğim hocam Prof. Dr. sayın Hasan R. KARADAYI' ya, Atatürk ilke ve inkılapları tarihi dersini aldığım, dehşetengiz hocam Doç. Dr. sayın Necati Ulunay UCUZSATAR' a, tezimin jürisinde bulunan ve düzeltmelerinde bana yol gösteren hocalarım Prof. Dr. sayın Çetin BOLCAL ve İstanbul Teknik Üniversitesi Uydu Haberleşme ve Uzaktan Algılama Merkezi (İTÜ-UHUZAM) Müdürü Doç. Dr. sayın Elif SERTEL' e teşekkür ve şükranlarımı bir borç bilirim.

ÖZET

Hall etkisi itme motorlarında, iç katottan gönderilen yüksüz yakıt anottan gönderilen elektronlarla çarpıştırılarak iyonlar elde edilir. Bu iyonların elektromanyetik alanda hızlandırılıp dışarı atılmasıyla da itme kuvveti elde edilir. Dışarı atılan bu iyonlar, elektronlar ve motordaki aşınmalarla kopan parçalarla beraber sorguç kısmını oluşturur. Sorguçta iyonlar motordan gelen birincil iyonlar ve bu iyonların sorguçtaki çarpışmalarından doğan ikincil iyonlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İkincileri oluşturan çarpışmalar arasında, motorun verimini etkilemesi bakımından en önemlisi yük değişimi çarpışmalarıdır.

Yük değişimi iyonlarını incelemek için yapılan geçmiş çalışmalarda, çoğu simulasyon ve sayısal çalışmada reaksiyona giren parçacıkların çarpışma kesit alanlarına bakılmıştır. Yük değişimi parçacıklarını diğerlerinden ayırt etmek için yapılan diğer çalışmalarda ise çıkan iyonların akım yoğunluğu ve voltaj dağılımlarına bakılmıştır. Burada reaksiyonlardan çıkan iyonların iyonlaşma dereceleri ve kinetik enerjileri arasında ayırt edici bir oran bulunmuştur.

Kültür üniversitesi fizik bölümü yüksek lisans bitirme tezi olarak yapılan bu çalışmada, yukarıda belirtilen ayırt edici iz belirlenen sorguç geometrisi üzerinde kullanılarak, Hall itme motorunun sorgucunda oluşan yük değişimi reaksiyonları hızları ve potansiyellerine göre incelenmiş ve sonuç olarak bu reaksiyonların sorguçtaki hörgüç yapısı ile ilişkisi ortaya konulmuştur.

ABSTRACT

On the Hall effect thrusters, propellant sent from the cathode to colliding with electrons comes from the anode on the inside of chamber. Ions are accelerated through the electric field and exhausted at the exit (so called primary ions) together with sputtered materials, electrons and neutrals. They all together form plume of thruster. Also the secondary ions are produced by different kind of collisions between the exhausted particles in the plume. One of these collisions is the charge exchange collision between the exhausted neutrals and primary ions between different charge states.

Past studies have examined different features of the CEX reactions. Investigations are focused some parameters like cross-section area, density distribution and other plasma parameters to understanding the CEX reactions. Cross-section can be calculated according to the parameters to define features of the CEX reactions. Hereafter results were generally supported by simulations. When examining according to the cross-sectional areas of the reactions can not to be said efficient method due to the requires much more mathematical processes and man cross-section for CEX reaction are not available within the scientific literature. It does not provide any information about occurrence of the CEX reactions, structure of the hump and relation between them. Density distributions are measured in experiments, simulations presents no different perspective from the experiments. This studies has been directed to more experiment.

Another investigations are focused on energy, potential and current density distribution. Studies show us that referring to ion energy distribution, some ions have more energy than others. In this case spectroscopic analysis were evaluated to identify characteristics of ions. Different probes used to measure ion velocities, masses and energies. From there ionization degree of the ions can be detected

with known ion velocity and masses. However a relation can be described between ion mass and energy. Because ions with more positive charge must be lighter than others and storage more kinetic energy through the electric field cause of ionization degree. Recalling to the potential energy stored in electric field is transferred into ions as a kinetic energy, setup a relation between charge state and ion kinetic energy. Measured voltage distribution of this ions were found to have higher values in the possible reactions. This is expectable result cause of the definition of the CEX reaction. Referring to this definition energy and momentum are conserved and only transfer is electron trading during reaction. However, experimental results of the near of the exit are not reliable due to the precision of the probe measurements are affected by fluctuations at the thruster exit. Therefore we have less information about this region. According to this method is described in Ref. 1, we made a suitable analytic model consistent with experimental results for the region not available to measure. We predicting characteristics of the reactions in very-near field and showed that relation between CEX reactions and hump.

However, experimental results of the near of the exit are not reliable due to the precision of the probe measurements are affected by fluctuations at the thruster exit. Therefore we have less information about this region.

BÖLÜM 1: ELEKTRİKLİ İTME MOTORLARININ TARİHÇESİ

Elektrik motoru fikri, Robert Goddard'ın 1906 da böyle bir teknolojinin varlığına dair yazdığı çalışma notlarına dayanır. 1911 yılında Konstantin Tsiolkovsky bu fikri bilimsel yazı olarak yayınlamıştır. 6 yıl boyunca Goddard uzay aracı motorları için parçacıkları elektostatik alanda hızlandırmak için çalışmıştır. Güneş panellerini güç kaynağı olarak kullanarak, iyon ve elektronların enerjisini arttırma fikri sadece bir önerme olarak sürmüştür. ¹ Şekil 1' de 1916' da Goddard öğrencileriyle beraber ilk iyon motoru denemesi görülmektedir.



Şekil 1: 1916' da Goddard öğrencileriyle beraber ilk iyon motoru denemesi

II. Dünya Savaşı'ndan sonra Weinler von Braun meslektaşı Ernst Stuhlinger' e Obert'in bu konuda yaptığı çalışmaları sormuştur. 1955' te Stuhlinger, Viyana' daki “Uluslararası Uzay Kongresi” nde “Elektrikli itme

motorlu uzay aracının olasılığı” adlı çalışmasını sunmuştur. Von Braun'ın önerisinde aracın ilk ve son kütlelerinin oranlarının 1/25 olduğu kaydetti. Buna karşılık Stuhlinger elektrikli itme motoruna sahip sistemlerini, kimyasal sistemlerle desteklenerek uzaya çıkarılmasının daha ucuz olacağını savunmuştur. ¹

Sputnik 1'in fırlatıldığı sene (1957) aynı zamanda elektrikli itmenin bilimsel komite tarafından geçerli itme teknolojisi olarak kabul edildiği ve elektrikli itmenin değerinin kanıtlanmasından, elektrikli itmenin uygulanmasını geciktiren teknik aksaklıkların çözümlenmesine geçildiği sene olarak tarihteki yerini aldı. Bu teknik aksaklıklar iyon hüzmesi üretimi ve nötrleştirme, hafif güç kaynakları (düşük alfa) geliştirme ve şiddetli yük boşalmalarının dengelenmesidir. ¹

1990'larda dünya çapında bir dizi elektrikli itici gelişimi açısından önemli olaylar damgasını vurdu. Bu olaylar : Lockheed-Martin istasyonu sabit tutmak için hidrazin-yakıtlı arkjet kullanılan bir iletişim uydusu fırlatılması (yani uydunun Dünya'ya göre, doğru yörünge ve konumda tutulması); dünyanın ilk ticari iyon motoru Hughes tarafından fırlatılması (PanAmSat 5), NASA'nın iyon itme motoru kullanan ilk derin uzay görevi ve Sovyetler Birliği'nin çöküşü EP geliştirme faaliyetleri ile ilgili teknik bilgi akımıyla sonuçlandı. Sovyetler Birliği'nden batıya gelen başlıca EP ürünü Hall itme motorudur. Dünya yörüngesinde ticari uygulamalar için ideal olan performans özellikleri (örneğin, egzoz hızı ve verimliliği), Hall etkisi itme motoru, istasyonu sabit tutmak için itici güç seçeneği ve büyük ticari uzay araçlarının yörünge yükseltmelerinde hidrazin arkjetlerin yerine geçmiştir. ¹

BÖLÜM 2: ELEKTRİKLİ İTME MOTORLARI

Elektrikli itme motorları, geçmişte kullanılan kimyasal sistemlere göre daha temiz daha yüksek hızlara erişen ve daha verimli motorlardır. Hızlandırma şekline göre elektrostatik ve elektromanyetik olarak ikiye ayrılır. Elektrostatik motorlarda parçacıklar sadece elektrik alan kullanılarak hızlandırılırken , elektromanyetik itme motorlarında ise elektrik alan ile beraber manyetik alan kullanılmaktadır. Elektrostatik motorların çeşitleri aşağıda sıralanmıştır.

- Elektrostatik iyon itme motoru
- Hall etkisi itme motoru
- Alan emisyonlu elektrik itme motoru
- Koloidal itme motoru

Kimyasal sistemlere göre avantajları:

Kimyasal sistemler, kimyasal reaksiyon ile itme üretirler. Elektrik itme motorlarının çıkış hızları kimyasal sistemlerinkinin 2 ila 10 katı daha fazladır. Ayrıca daha az yakıtla daha uzun mesafe katettiklerinden dolayı maddi olarak daha elverişli araçlardır. Elektrikli itme motorlarının başlıca avantajları şunlardır:⁷

- Kimyasal roketlere göre daha az yakıt kullanılır.
- Kimyasal roketlere göre daha basit bir sistem olup itme kuvveti için kimyasal reaksiyona ihtiyaç duymadığı için daha güvenlidir.
- Elektrik güç kaynağı gerektirir.
- Daha düşük itme kuvveti sağlaması daha uzun mesafe almasını sağlar.

Sorunlar:

- Sistemlerin deneyle test edilmesi ve testlerin değerlendirmesi kimyasal sistemlere göre daha zordur.

- Sorguç kısmının açıklığının diğer sistemlere göre daha fazla olması nedeniyle, yüklü parçacıkların güneş panellerine yapışması, araç üzerindeki aletlerin üzerinde potansiyel farkı yaratması sebebiyle zarar vermesi, dielektrik duvarlar olan etkileşimden dolayı kopan parçaların panellerde birikmesi.⁷

Uzay sanayileşmesinin gelişmesiyle gelecekteki çoğu elektrikli motor çalışmasında araçlar sadece dünya yüzeyinden dünyanın yörüngesine ve atmosfer sınırına kadar kimyasal yakıt kullanan roketlerle taşınacak, buradan sonra araç yoluna elektrik motoruyla devam edecek. Kimyasal motorlar kısa vadede çok güçlü itme verdiklerinden ve kısa ömürlü olduklarından dolayı dünya dışına çıkınca tekrardan ay yüzeyine kurulacak ya da göktaşlarından sağlanacak oksijen ve hidrojen ile yakıtlarını dolduracaktı. Fakat elektrik motorlarının çok daha az yakıtla daha uzun mesafeler katetmesi kimyasal roketlerin geliştirilmesi çalışmalarını ortadan kaldırdı. Onlar artık amaç olmaktan çok birincil roketi yörüngeye çıkarmak için birer araç olmuşlardı. Elektrik motorlarının bu avantajı tüm geliştirme çalışmalarının onların üzerine yoğunlaşmasını sağladı. İkisi arasında daha net bir karşılaştırma yapacak olursak;⁷

- Aynı mesafeyi katetmek için iyon motorları, kimyasallardan 8 kat daha az yakıt kullanıyor.
- İyon motorlarının toplam ağırlığı kimyasal motorların 4 te 1 i kadardır. Bu sayede daha fazla alet ve bilgi taşıyabilirler.
- İyon motorlarının çıkış hızları kimyasal motorlarınkinden 15 kat daha fazladır. Yani birim kütle başına düşen momentum miktarı 15 kat fazladır.
- İyon motorları daha hafif, güvenli ve basit oldukları için performansları %800 daha iyidir.

Uygulamalar:

Uzay için üretilen elektrikli motor sistemlerinin gelişimi için temel motivasyon, büyük bir karakteristik hız artışları için itici kütlelerinin

korunması olmakla birlikte, bir dizi hassasiyet, çeşitli itme ve impuls düzeyleri, motoru kapatma ve yeniden başlatma ve ikincil pasif bir kimyasal roket kullanma gibi ikincil faydaları da vardır. Büyük güç ihtiyacı nedeniyle kullanılan dış güç kaynakları (güneş panelleri), çok düşük, mütevazı itme kuvveti yoğunluğu kapasitesi ve uzay ortamında küçük empirik deneylere ihtiyacı vardır.⁷

Bütün bu özellikler elektrik motorları için kabul edilebilir olduğundan uzay görevleri için uygundur fakat güçlü kütle çekim alanlarında manevra kabiliyetlerini kaybetmeleri sorundur. Gezegen yüzeylerine yakın başlatmak veya tırmanış-iniş yetenekleri ve hatta gezegenin dış yörüngesinde (Lagrange yolu) transferi hareketleri hafif sarmal yörüngeler üzerinde çok yavaş yapılabilir. Böylece, bu tutum kontrolü, istasyon tutma, sürükle-indirgenme yakın gezegen uygulamaları sınırlı ve mütevazı yörüngesi değişen (örneğin LEO takımyıldızları yörüngede faz değişiklikleri gibi) hassas itme fonksiyonları koruması için olacak ve uzun kullanım ömrü, onları kimyasal seçeneklere karşı üstün kılacaktır. Kimyasal roketlere karşı bu üstünlükleri onların Mars ötesi gezegenlere yapılan görevlerde pilotsuz kullanım için uygun kılmıştır.⁷

BÖLÜM 3: HALL İTME MOTORU

Elektrikli itme motoru fikri 1900' lü yılların başına dayanır fakat Hall itme motoru çalışmalarının başlaması, Amerika ve Sovyetlerde birbirinden bağımsız olarak 1950-1960 lı yılları bulur. Hall itme motoru yeterli bir motor olarak sovyetlerde tasarlanmış, Amerika'da ise bilim insanları ızgaralı iyon motorlarını geliştirmek üstüne çalışmışlardır. İki tip Hall itme motoru geliştirilmiştir.¹

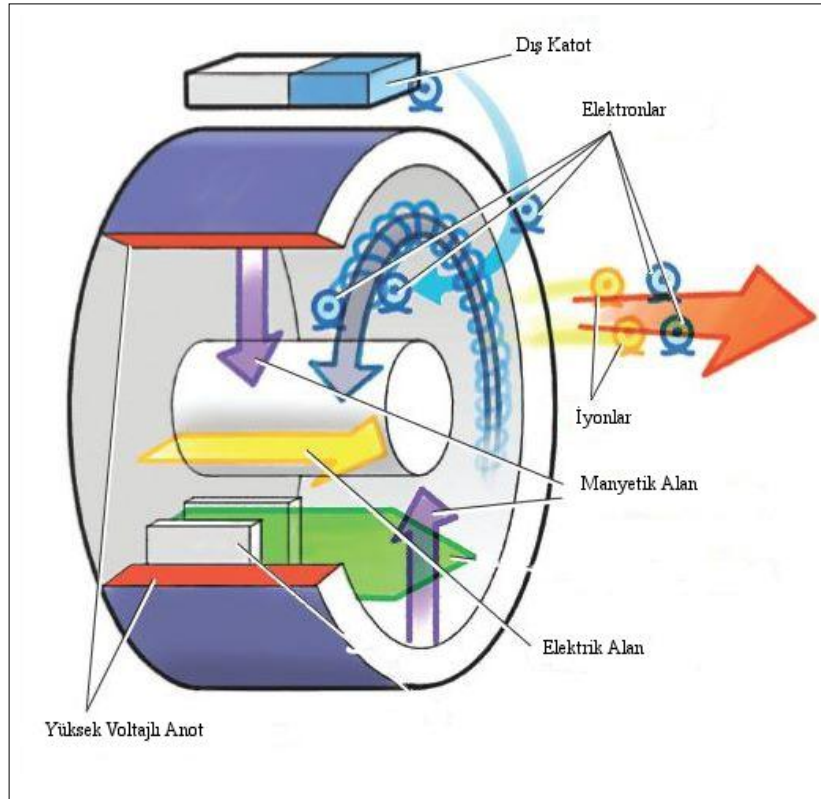
- Sabit Plazma İtme Motoru (Stationary Plasma Thruster- SPT)
- Anot Katmanlı İtme Motoru(Thruster with Anode Layer- TAL)

Sabit Plazma İtme Motoru (Stationary Plasma Thruster - SPT): Hall itme motoru (HET) , sabit plazma motoru (SPT) ve manyetik katmanlı motorların (Magnetik-Layer Thruster) hepsi birden aynı şeyi ifade eder. Plazmanın oluşturulduğu ve hızlandırıldığı odacığın duvarları, plazma ile etkileşime girmemesi için dielektrik olarak yalıtılmıştır. Duvarlar genel olarak uçuşlarda boron nitrit (BN) ve borosilden (BN-Si₂) üretilir, laboratuvar denemelerinde ise alüminyum oksit(Al₂O₃) te kullanılır. Bu dielektrik madde iyon bombardımanı altında daha az aşınır ve görelî olarak daha düşük elektron salınım katsayısına sahiptir. Bu motor geometrisinde, yakıtın verildiği yerde elektriksel etkiye maruz kalmış metal anot odacığa açılan kanalda bulunur. İtme motorunun kullandığı yakıt gaz olarak oyuk katot gönderilir.

Anot Katmanlı İtme Motoru (Thruster with Anode Layer – TAL): İtme motorunun bu ikinci modelinde, dielektrik kanalın duvarları metalik iletkenlerle kaplanmıştır. Bu modelde yakıtın plazmaya çevrildiği ve elektrik alanda hızlandırıldığı odacık diğerine göre daha kısadır.

Hall itme motorları, iç kısmında anot bulunan silindirik odacığı olan, çıkış doğrultusunda elektrik alana, yarıçap doğrultusunda manyetik alana sahip, dış kısmında bir katotu bulunan basit cihazlardır (Şekil 2). Çalışma ilkesi, elektrostatik potansiyel altında, iyonları yüksek hızlara ulaştırmaya dayanır. Yakıt olarak iyonlaşmış asal gazlar kullanılır. Başlangıçta gaz odacığa yüksüz olarak katot tarafından gönderilir. (uzay ortamı plazma ve elektriksel olarak

aktif iken aracın içinde yüklü gaz taşımak sakıncalıdır.) Gönderilen yüksüz gaz karşı taraftaki anottan gönderilen elektronlarla çarpıştırılarak artı yüklü iyonlar elde edilir. Elde edilen bu iyonlar çıkış doğrultusundaki elektrik alanda hızlandırılır ve çıkıştan çok yüksek hızlarda ve impluslarda (15-20 km/s) dışarı atılarak itme sağlanır. Gazı iyon haline getirmek için kullandığımız elektronlar, yarıçap yönündeki manyetik alanda tuzaklanır ve iyonların çıkışta tekrardan yüksüzleştirilmesi için anot kısmında toplanır. Burada dikkat edilecek husus, manyetik alanın ve odacığın büyüklüğü, elektronların Larmour yarıçapından büyük, iyonların Larmour yarıçapından küçük olmalıdır. Bu sayede manyetik alanın tuzakladığı elektronlar yarıçap boyunca dairesel olarak hareket ederken, iyonların dairesel hareketlerinin yarıçapı odacığinkinden büyük olduğu için hareketleri elektrik alan doğrultusu boyunca “dairesele olmayan düzgün hareket” şeklinde olacaktır. Elektrik alan doğrultusunda ilerleyen bu iyon akımına “Hall akımı” denir.



Şekil 2: Hall Etkisi motorunun çalışma prensibi

Teorisi kurulduktan sonra ilk Hall itme motoru deneyleri (Hall Thruster Experiments-HTX) 1999 yılında yapıldı.⁷ Yapılan bu araştırmanın hedefleri;

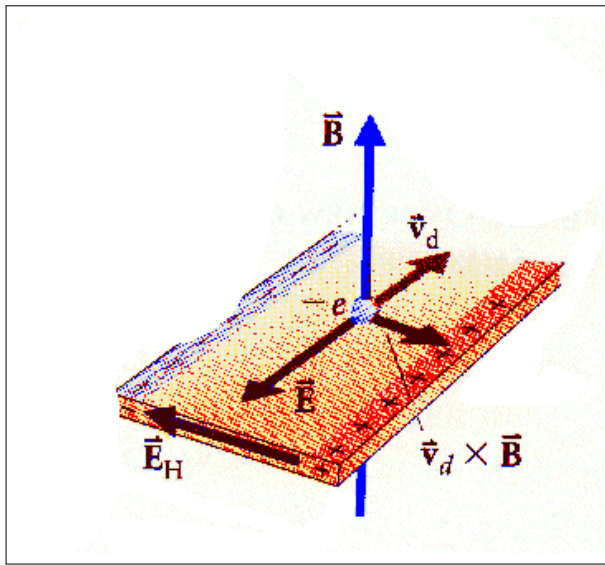
- Motor kanalındaki ve sorguç kısmındaki iyon demetlerinin dağılmasını azaltmak için, plazma parametrelerinin uzaysal dağılımının kontrolü.
- Düşük (birkaç yüz Watt) ve yüksek (birkaç yüz Kilowatt) güç devirlerinde Hall itme motorunun ölçeklendirilmesi.
- Hall itme motorunun fizik altyapısını ve plazma aygıtlarını anlamak.
- Manyetik alanda elektron transferi
- Plazma-duvar etkileşimi
- Plazma kararsızlıkları ve bunların kontrolü
- Manyetize olmuş elektronlar ve olmamış iyonlara sahip plazmanın manyetik olarak yalıtılması ve limitleri
- Yüksek akıllı plazma jetlerinin farklı hedeflerle etkileşimi (manyetik alan, plazma ve katılar)
- Bilimsel ve sanayi uygulamaları kesişen alanlara sahip plazma araçları için yeni tasarımlar
- Değişik gazlar ve farklı basınçlar altında kesişen alanlara sahip araçların durgun elektrik yük boşalması (steady state electrical discharge) ile ilişkisi üzerine çalışmalar
- Düşük elektron enerjisi (<1 keV) durumunda dielektrik malzemelerin ikincil elektron salınımı özellikleri ile ilgili ölçümler.
- Plazma kaynaklarındaki plazma-duvar etkileşiminin kontrolü ve ferro-elektrik malzemelerin iyonlaşma etkisi üzerine uygulamalar.

BÖLÜM 4: HALL ETKİLİ İTME MOTORUNUN FİZİĞİNE GİRİŞ

Hall Etkisi:

Hall etkisi, bir iletkenin iki ucu arasındaki voltaj farkından (Hall voltajı) dolayı manyetik alana koyulan iletkenin içinde manyetik alana dik bir elektrik akımının oluşması olayıdır (Şekil 3). Edwin HALL tarafından 1879 yılında doktora çalışması sırasında keşfedilmiştir. Hall katsayısı, indüklenen elektrik alanın akım yoğunluğu ve uygulanan manyetik alanın oranıdır. İletken maddeler için ayırt edici bir özelliktir. Hall etkisi iletkenin kendi içindeki doğal akımdan dolayı ortaya çıkar. Yüklü parçacıkların madde içinde hareket etmesinden dolayı, parçacıklara Lorentz kuvveti etki eder. Manyetik alanın yokluğunda, yükler düzgün bir yörünge izler. ²

Dikey bir manyetik alan uygulandığında, parçacıkların çarpışmalar arasındaki yörüngesi eğimli hale gelir ve elektronlar malzemenin yüzeyine doğru hareket eder. İletkenin diğer yüzünde de bu harekete eşit ve zıt yönlü yüklerin hareketi olur. Bu asimetrik yük dağılımı ve yüklerin hareketliliği nedeniyle iletkene diket yönde bir manyetik alan oluşur. Bu yük ayrılması nedeniyle karşıt bir elektrik alan oluşur ve sürekli yük akıyormuş gibi bir elektriksel potansiyel oluşur. ²



Şekil 3: Hall etkisi

B manyetik alan, n elektron sayısı, e elektron yükü, d iletkenin kalınlığı ve I akım olmak üzere, Hall voltajı;

$$V_h = -\frac{IB}{ned} \quad (1.1)$$

j_x x yönündeki akım yoğunluğu, E_y y yönündeki elektrik alan olmak üzere Hall katsayısı;

$$R_H = \frac{E_y}{j_x B} = \frac{1}{ne} \quad (1.2)$$

İyonlaşmış Gazlarda Hall Etkisi:

İyonlaşmış gazlarda (plazma) Hall etkisi katılardakinden oldukça farklıdır. Plazmada Hall parametresi herhangi bir değer alabilir. Plazma Hall parametresi β , Larmour frekansı Ω_e ve elektron-ağır parçacık çarpışma frekansı ν olmak üzere,²

$$\beta = \frac{\Omega_e}{\nu} = \frac{eB}{m_e \nu} \quad (1.3)$$

Hall parametresinin değeri, manyetik alanın şiddeti ile artar. Fiziksel olarak, elektronların yörüngeleri Lorentz kuvveti tarafından eğilir. Hall parametresi küçük ise, elektronların ağır parçacıklarla çarpışmaları arasındaki yol hemen hemen doğrusaldır ama parametre büyük ise, elektronların hareketi son derecede eğimlidir. Akım yoğunluğu vektörü ve elektrik alan arasındaki açısı Hall açısı denir ve Hall parametresini verir.²

$$\beta = \tan\theta \quad (1.4)$$

Roket eşitlikleri

Roket eşitliği uzay aracının itme kuvvetini hızı ve kütlesi cinsinden tarif eden eşitliktir. ⁷

$$F = T = M \frac{dV}{dt} \quad (1.5)$$

Uzay araçındaki itme kuvveti momentumun zamanla değişiminin ters işaretlisine eşittir.

$$T = -\frac{d(m_p v_{ex})}{dt} \quad (1.6)$$

m_p ;yakıt kütlesi

v_{ex} ;egsoz hızı

Uzay aracının toplam kütlesi, yakıtın kütlesi ile aracın iletilen kütlesinin toplamıdır.

$$M(t) = m_d + m_p \quad (1.7)$$

Ayrıca kütlelerin zamanla değişimi,

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dm_p}{dt} \quad (1.8)$$

Uzay aracının kütlelerinin yakıt kütlesiyle olan ilişkisi;

$$m_p = m_d \left[\exp\left(\frac{\Delta V}{I_{sp} g} - 1\right) \right] \quad (1.9)$$

Kuvvet Transferi:

Hall motorunda, hacim içindeki plazmada iyonlar üretilir ve plazmadaki elektrik alanda hızlandırılır. Ayrıca enine manyetik alan Hall akımının dönmesi için kuvvet transferinden sorumludur. Plazmayı bölgesel olarak hemen hemen yüksüz olarak kabul edersek, ⁷

$$qn_i \approx qn_e \quad (2.1)$$

hızlandırma alanında n_e elektron plazma yoğunluğu ve elektrik ve manyetik alan düzgündür. Plazmadaki iyonlar manyetize olmamıştır ve sadece elektrik alandan etkilenirler. İyonlar üzerindeki kuvvet;

$$\vec{F} = 2\Pi \iint qn_i \vec{E} r dr dz \quad (2.2)$$

elektronlar bileşke kuvvetinin etkisi altında kalır ve yarıçap doğrultusunda dönmeye başlar.

$$\vec{v}_e = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (2.3)$$

İyonlar üzerindeki elektrostatik kuvvet, elektronlar üzerindeki elektrostatik kuvvetin ters işaretlisine eşittir. Elektronlara bu kuvvet uygulanırsa, Lorentz kuvveti tarafından dengelenir.

$$v_{CEX} = \sqrt{v_{\rho}^2 + v_z^2} \quad (2.4)$$

Hemen hemen yüksüzlüğün tanımını kullanarak Hall akım yoğunluğu;

$$\vec{J}_{Hall} = -en_e \vec{v}_e \quad (2.5)$$

Elektronlara uygulanan Lorentz kuvveti;

$$-2\pi \int \int qn_e \vec{E} r dr dz - 2\pi \int \int \vec{J}_{Hall} \times \vec{B} r dr dz = 0 \quad (2.6)$$

İyonlara etki eden kuvvet;

$$\vec{F}_i = \vec{J}_{Hall} \times \vec{B} \quad (2.7)$$

Mıknatıslardaki Hall akım kuvveti, elektronlar üzerindeki Hall akım kuvvetine eşit ve ayrıca iyonlar üzerindeki kuvvetin zıt işaretlisidir.

$$\vec{T} = \vec{J}_{Hall} \times \vec{B} = -\vec{F}_i \quad (2.8)$$

İtme motorunda, itme kuvveti iyonlardan araca elektromanyetik Lorentz kuvveti ile aktarılır. Bu kuvvet bazen elektromanyetik itme motoru kuvveti diye adlandırılır çünkü kuvvet manyetik alanla iletilir. Elektrik alandan iyon hızlandırma mekanizmalarının tamamını elektrostatik itme motoru olarak adlandırılır.

İtme kuvveti nasıl elde edilir ?

İtme kuvveti, Newton'un üçüncü yasasıyla açıklanan, hızlandırılmış gazın ürettiği mekanik kuvvettir. Çıkıştan püskürtülen gazların itme kuvvetiyle araç gazın ters yönüne doğru hız kazanır.

Newton'un ikinci yasasından F kuvvetini momentumun zamanla değişimi olarak tanımlarız. t_1 ve t_2 zamanları arasındaki kuvvet;

$$F = \frac{(mV_2) - (mV_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (2.9)$$

Kütlenin sabit kaldığını ve hızın zamanla değiştiğini kabul edersek ;

$$F = ma \quad (3.1)$$

Bir katıyı göz önüne alırsak, atomlar veya moleküller arası bağlar kuvvetli olduğundan madde şeklini korur. Fakat konu bir akışkan (sıvı ya da gaz) olunca işler değişir. Hareketli bir akışkan için kütle akış oranı önemli bir özelliktir. Bir kesitten birim zamanda geçen kütle miktarıdır ve boyut olarak yoğunluk (ρ) hız (v) ve alana (A) eşittir.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (3.2)$$

Newton'un ikinci yasası;

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = (\dot{m}v) \quad (3.3)$$

Kütle akış oranı, zamana bağlı olduğundan momentumdaki değişimi kütle akış oranının değişimi çarpı hız olarak yazabiliriz. Çıkış hızını “ e ” , serbest akışı da “ 0 ” ile ifade edersek,

$$F = (\dot{m}V_e) - (\dot{m}V_0) \quad (3.4)$$

Bunların yanında çıkış basıncı ve serbest akış basıncının da eşitliğe bir etkisi oluyor. Eğer akışkan basıncı momentum ile alakalıdır ve hareketi akışkan basıncının ivmesiyle ilgilidir. Eğer akışın basıncında bir değişiklik varsa o zaman momentumda da bir değişiklik vardır. Çıkış alanı boyunca kuvvet eşitliği, çıkış alanı A_e kere çıkış basıncı ile serbest akış basıncının farkına eşittir. Genel itme kuvveti eşitliği,

$$F = (\dot{m}V_e) - (\dot{m}V_0) + (p_e - p_0)A \quad (3.5)$$

normalde, basınç alanının büyüklüğü kütlenin değişimi kere hız teriminden görelî olarak küçüktür. İtme kuvveti eşitliğine dikkatlice bakarsak, büyük itme kuvveti elde etmek için iki yol olduğunu görürüz. Birinci yol, kütlenin zaman içindeki değişiminin büyük olmasıdır. Çıkış hızı serbest akıştan daha büyük olduğu için, motordaki akışı büyük bir itme kuvveti oluşturur.

Performans Parametreleri:

İtme motorunun performansına ilişkin parametreleri belirlemede klasik olarak aşağıdaki bağıntılar kullanılmaktadır. ⁴

a) Olağan hallerde, uzay aracı ve ateşleme sistemine ilişkin toplam momentumun korunumundan üretilen itme T, iyon akış hızı ve ateşleme sırasında dışarı atılan parçacıkların itme vektörü doğrultusundaki ortalama hızı elde edilmektedir.

$$m_{sc} \frac{d\vec{v}_{sc}}{dt} = \dot{m}\vec{v}_{ex} = \vec{T} \quad (3.6)$$

Burada sırasıyla m_{sc} , uzay aracının kütlesi, $\frac{d\vec{v}_{sc}}{dt}$ uzay aracının ivmesidir.

b) Özgün anlık impuls I_{sp} ,

$$I_{sp} = \frac{T}{\dot{m}g} \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada g Dünya'nın yerçekimi ivmesidir.

c) Verimlilik ise,

$$\eta = \frac{P_T}{P_d} \quad (3.8)$$

eşitliği verilmektedir. Burada P_d elektrik gücü girdisi ya da sistemin gücü ve P_T ise itme motorunun gücüdür.

$$P_T = \frac{T^2}{2\dot{m}} \quad (3.9)$$

şeklindedir.

Plazma Parametreleri ve Motorun Gücü:

Hemen hemen-yüksüz bir plazma için , itme motorundan dışarı kütle akışı anottaki kütle akış hızına eşittir.⁷

$$\dot{m} = m_i n_e v_B A_{ex} \quad (4.1)$$

Burada itme motorunun çıkışın alanı, sırasıyla n_i ve n_e , iyon ve elektronların sayısal yoğunlukları, ρ itme motoru odacığının yarıçapı ve v_B iyonların Bohm hızıdır. Bohm hızı iyon-akustik hızına eşittir:

$$v_B = \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} \quad (4.2)$$

İtme motoru çıkışında enerjinin korunumunu kullanarak

$$qV_d = \frac{1}{2} m_i v_{ex}^2 \quad (4.3)$$

Ateşleme sırasında dışarı atılan parçacıkların itme vektörü doğrultusundaki ortalama hızı;

$$v_{ex} = \sqrt{\frac{2qV_d}{m_i}} \quad (4.4)$$

elde edilmektedir. Burada m_i iyon kütlesi ve V_d itme motoru odacığında uygulanan voltajdır.

Sistemin gücü P_d ,

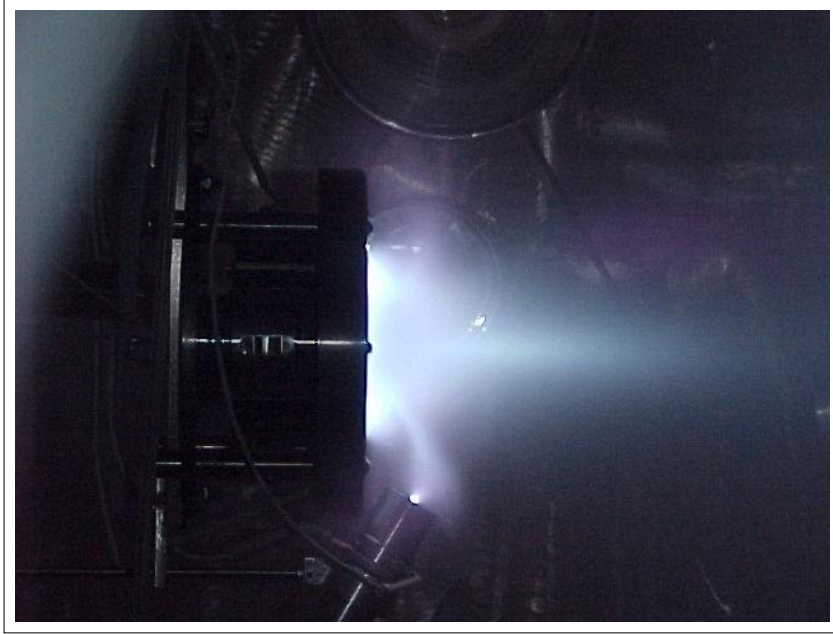
$$P_d = J_d V_d \quad (4.5)$$

Burada J_d itme motoru odacığında, uygulanan voltajından dolayı oluşan akım yoğunluğudur.⁷

**BÖLÜM 5: SORGUÇ, YÜK DEĞİŞİMİ VE UZAY ARACI
ETKİLEŞİMİ**

Sorguç:

İtme motoru odacığından uzaya fırlatılan bir kere iyonlaşmış Xe^+ atomları yüksek enerjili birincil iyon demetleri ile katottan veya odacıktan kaçan elektronların yanısıra, iyonlaşmamış düşük enerjili yüksüz Xe atomları ve iki kere iyonlaşmış Xe^{++} atomların demetleri Hall itme motorunun arkasında bir sorguç oluşturmaktadır (Şekil 4) .⁷



Şekil 4: Hall itme motorunun sorguç kısmı

HT sorgularının iraksamaları ($40^\circ - 60^\circ$) diğerk elektrikli itme motorlarına göre daha fazladır. Neden olan etkenler iki kısma ayrılmaktadır.

- HT motoru odacığındaki hızlandırmada, iki mekanizma sorguç iraksaklığına etki etmektedir. Birinci dereceden etkili olanı, katkı iyonların anot ve katot arasındaki elektrik potansiyeli farkı nedeniyle hızlandırılmalıdır. Diğerk mekanizma ise katot civarında tuzaklanan elektronların sıcaklığı ile kontrol edilen yük kılıfının öncesi ve yük kılıf bölgelerinde yarıçap yönündeki elektrik potansiyelindeki düşme nedeniyle iyonların yarıçap doğrultusunda hızlanmalarıdır.⁷

• HT motorundan dışarı çıkan bir yüksek enerjili Xe^+ iyonun elektron, iyon veya yüksüz atom ile çarpışmasının saçılmayla sonuçlanması veya düşük enerjili yüksüz Xe atomları ile çarpışmasının rezonans durumu oluşturmasının sonucu olarak aralarında yük değişimi (charge-exchange-CEX) yapmasıyla,yüksek enerjili yüksüz Xe atomu ve düşük enerjili Xe^+ iyonuna dönüşmeleridir. Düşük enerjili CEX iyonları yavaş olmaları sebebiyle bölgesel elektrik alanların etkisiyle itme motorundan geriye doğru akabilirler veya yarıçap doğrultusunda hareket ederek potansiyel olarak civardaki bir araç bileşenini bombardıman edebilirler. İtme eksenine göre daha büyük açılarda hareket eden yüksek enerjili iyonlar yollarını uzay aracı potansiyeli etkisi ile bükerek buradaki yüzeylere çarpabilirler. Böylece sorguç uzay aracı yüzey kirlenmesine sebep olmaktadır.⁷

SORGUÇ BİLEŞENLERİ

Sorgucun Karakteristiği:

İtme motorunun egsozundan çıkan iyon demetleri, motorun sorgucu olarak adlandırılır ve bu çıkan parçacıkların uzay aracı ile girdikleri etkileşimleri inceleme açısından karakteristikleri önemlidir. Şekilde sorgucun genel karakteristiği görülüyor.⁷

İlk olarak demet kılıfı görülüyor daha sonra o demet kılıfını kaplayan bir iyon akımı dağılımı oluşuyor. İkinci olarak enerjisi yüksek iyonlarla, enerjisi düşük olan yüksüzler çarpışmaya giriyorlar ve “yük değişimi (charge exchange-CEX)” adı verilen çarpışmadan düşük enerjili iyonlar ve yüksek enerjili yüksüz parçacıklar ortaya çıkıyor. Enerjisi düşük olan yavaş iyonlar, elektrik alan doğrultusunda çıkışa ilerlerken, çıkışta geriye doğru akarak uzay aracının bileşenlerini bombardımana tutarlar. Üçüncü olarak enerjisi yüksek iyonlar genellikle çıkıştan geniş açılar ile saçılırlar. Sonuç olarak saçılan parçacıklar aracın üzerindeki aygıtları kaplarlar. İyonlar ve elektronlar gibi yakıtta ait parçacıklar dışında, plazmanın hızlandırma odacığının duvarlarıyla

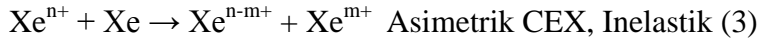
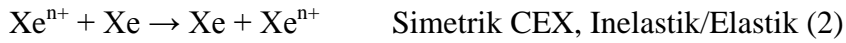
girdiği etkileşimden dolayı duvarlardan kopardığı parçalar da güneş panellerine yapışarak, panellerin güneş ışığı almasını engeller.

Sorguç Fiziği:

İtme motorunun sorgucu çeşitli enerjilere sahip iyonlar, elektronlar ve biraz da yüksüz gazdan oluşur. Yüksek enerjili iyon demetleri motordaki alanlarda hızlandırıldığında, baskın olan iyon türleri (sorgucun merkezini oluşturan iyonlar) itmenin ana kaynağını oluşturur. Bu iyonların hız ve açısal dağılımı laboratuvarlarda hesaplanarak karşılaştırılır. Hall motorlarında hızlandırıcı voltaj birkaç yüz volt olduğundan sorgucun elektrik alanının yüksek enerjili iyonlar üzerinde önemli bir etkisi vardır.⁷

İyon demetleri ile yüksüzlerin çarpışmasından ikincil iyonlar dediğimiz iyonlar ortaya çıkar. Yük değişimi olayı ana demet doğrultusuna göre geniş açılı elastik olmayan düşük enerjili iyonların çarpışmasıyla ilişkilendirilir. Motorun voltajının yükselmesi, daha büyük spesifik impuls sağlar ve bu saçılan iyonların enerjisi anlamlı hale gelir.

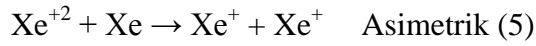
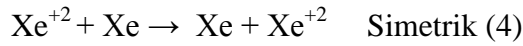
Yük Değişimi (Charge-Exchange)



Ağır parçacık çarpışmaları, çift yüklü iyonlar da dahil olmak üzere plazmadaki iyonların %10 unu oluşturur. Bu sürecin kesit alanları, iyon akımlarının modellenmesi bakımından önemlidir. Yük değişimi plazma dinamik atom çarpışması fiziğinde kısmi olarak önemli bir rol oynar. CEX iyonların momentumunun değişimini ve motor çıkışına yakın düşük enerjili

iyonların geriye doğru ivmelenmesini sağlar. İki ağır parçacık çarpışması, sorguç kısmından yayınlanan ışığa da katkıda bulunabilir.⁸

Elektrostatik itme motorlarında iki tip yük değişimi olayı gerçekleşir. Simetrik ve asimetrik CEX. İkinci CEX işlemi atomların yeni yük durumlarına gelmesini sağlar. Örnek olarak ikinci dereceden iyonlaşmış Xenon atomu ile yüksüz Xenon atomunun çarpışması verilebilir.



4 numaralı çarpışmada, başlangıçta ikinci dereceden iyonlaşmış olan Xenon atomu, yüksüz Xenon atomundan iki elektron alarak yüksüz hale geçiyor ve yüksüz olan atom da ikinci dereceden iyonlaşmış oluyor. Bu tip simetrik CEX çarpışmaları çok geniş çarpışma kesit alanına sahiptir ve çarpışmada herhangi bir enerji kaybı olmadığı için elastik bir çarpışma olarak kabul edilir. 5 numaralı çarpışmada ise, enerji kaybı yaşanır ve çarpışan atomlar arasında tesadüfi bir titreşim ortaya çıkar. Atomlar arasındaki reaksiyondan çıkan fazla kinetik enerji 8.8 eV dir. (Xenon atomunun, ikinci dereceden elektron-iyonlaşma enerjisi ve iki tane tekli iyonlaşma enerjisi arasındaki farka eşittir.) asimetrik durumdaki kesit alan oldukça küçüktür. Bu nedenle bu iki CEX çarpışması, kesit alan ve enerji durumu bakımından birbirinden tamamen farklı mekanizmalardır.⁸

En küçük simetrik CEX çarpışmalarında saçılma açıları çok küçüktür ve momentum transferi ihmal edilebilir. Bu şekilde hızlı bir iyonun sabit bir yüksüz atome çarpması, sabit bir iyon ve hızlı bir yüksüz atomun oluşmasına yol açar. Bu nedenle CEX çarpışmalarında plazma önemli bir enerji kaybına uğrar. Buradan etrafa saçılan iyonlar, yüksüz atomlar ve iç kısımdaki aşınma nedeniyle kopmuş olan diğer parçacıklar sorunlara yol açarlar. Bu nedenle çarpışma kesit alanlarının kesin olarak belirlenmesi itme motorunun modellerini birleştirme konusunda önemli bir bileşendir.⁸

CEX Akımının Sayısal Olarak Değerlendirilmesi:

Tahmini akı değeri ile deneyde ölçülen akı değerinin karşılaştırılması için Hall motorunun sorgucundan üretilen yük değişimi akısının değerlendirilmesinde kullanılan bir modeldir. CEX akımı,

$$I_{CEX} = \int_0^L en_i \sigma_{CEX} V_i n_n dA \quad (4.6)$$

Çarpışma kesit alanı σ_{CEX} sabit ise,

$$\int_A en_i V_i dA = I_b \quad (4.7)$$

Buradan CEX akımını yeniden yazarsak,

$$I_{CEX} = I_b \sigma_{CEX} \int_0^L \bar{n}_n dx \quad (4.8)$$

IB demet akımı, CEX çarpışma kesit , L uzunluğundaki vakum odacığındaki iyon demetinin kesit alanındaki ortalama sayı yoğunluğudur. CEX akısı yüksüz atomlara bağlıdır ve iki çeşit yüksüz vardır.

- Motordan gelen nötrler
- Arka plan nötrleri

Buna dayanarak CEX için iki farklı akım eşitliği olduğu söylenebilir.

- Motor nötrlerinin ürettiği CEX akısı
- Arka plan nötrlerinin ürettiği CEX akısı

Motor Nötrlerinin Ürettiği CEX Akısı:

Motor nötrleri, yakıt olarak verildikten sonra hiç nötrleşmemiş olan atomlardır. Motordaki oranları,⁷

$$\dot{m}_n = (1 - \eta_u) \dot{m} \quad (4.9)$$

η_u : kullanım verimliliği

\dot{m} : toplam akı oranı

Motor nötr yoğunluğu,

$$n_n^{eng} = \frac{1 - \eta_u}{\eta_u} \frac{I_b}{2\pi \{R\}} H e c_n \left(1 + \frac{X}{H}\right)^2 \quad (5.1)$$

$\left(1 + \frac{X}{H}\right)^2$ faktörü, $\frac{A(x)}{A(0)}$ demet alanının tahmini oranıdır..

$L \rightarrow \infty$ iken, motor nötrlerince üretilen CEX akımı,

$$I_{CEX}^{eng} = \frac{1 - \eta_u}{\eta_u} \frac{I_b^2 \sigma_{CEX}}{2\pi \{R\}} e c_n \quad (5.2)$$

CEX akım yoğunluğu,

$$J_{CEX}^{eng} = \frac{I_{CEX}^{eng}}{2\pi r^2} \quad (5.3)$$

Arka Plan Nötrlerinin Ürettiği CEX Akısı:

Arka plan nötr yoğunluğu,

$$n_n^{bkg} = \frac{P^{bkg}}{kT^{bkg}} \quad (5.4)$$

Arka plan nötrlerinin r uzaklığında CEX akısının demeti boyunca eşit olarak dağılması nedeniyle CEX salınımı oluşur. ⁷

$$J_{CEX}^{bkg} = \frac{n_n^{bkg} \sigma_{CEX} I_b}{2\pi r \sin \theta} \quad (5.5)$$

Yoğunluk ve elektron sıcaklığı arasındaki ilişki,

$$\frac{T_e}{T_{ec}} = \left(\frac{n_e}{n_{ec}} \right)^{\gamma-1} \quad (5.6)$$

Sonuç olarak, Hall motorunun sorguç kısmı şunlardan oluşur:

- yüksek enerjili birincil iyon demetleri (300 eV)
- iyonlaşmamış yakıttan gelen nötr atomlar
- hızlı CEX nötrleri
- düşük enerjili yük değişimi (CEX) iyonları
- elektronlar
- aşınmadan dolayı kopan motor parçacıkları

Sorgucun karakteristiği ,

- Birincil iyon demetleri yarım-açı demet diverjansının 10 ile 40 dereceleri arasında toplanmışlardır.
- Demet genelde birinci dereceden iyonlaşmış atomlardan oluşur.
- Az bir yüzde de olsa ikincil dereceden iyonlaşmış atomlar da vardır.
- Tipik iyon demet profili yarım-açı diverjansı ile sınırlı Gauss dağılımına uygundur,
- CEX iyonları CEX çarpışmalarının bir sonucudur.

Yüksek enerjili birincil iyonlar ile nötr yakıt iyonlarının çarpışması ile parçacıklar arasında impuls alışverişi olur ve bu işlem yavaş iyonlar ve hızlı nötrler üretir.⁷

Birincil iyon demetinin Gauss dağılımı nedeniyle potansiyel de benzer bir dağılım izler.⁷

- Yavaş iyonlar motorun merkez doğrultusundaki artı potansiyelden püskürtülür ve motorun çevresinde önemli ölçüde CEX iyonu oluşmasına neden olur.
- Bu CEX iyonlarının enerjisi birkaç eV den yüz eV ye kadar değişir.
- Birincil iyonlar yarım-açı diverjansı ile sınırlanmaz ve uzay aracının yüzeyine, güneş panellerine doğru akarlar.
- Bu geriye doğru olan akış uzay aracının yüzeyinde elektriksel yüklenmeye sebep olur.
- Eğer kullanım verimliliği %100 den düşük olursa, nötr atomlar uzay aracının çevresinde bir nötr ortam oluştururlar.
- Metal yakıt kullanıldığı durumlarda, kirlenme (contamination) endişe verici olabilir ama iyonlaşma gerçekleşene kadar araç üzerindeki elektriksel yüklenmeyle alakası yoktur.

CEX Etkisi:

- CEX-plazma etkileşimi dış ortamdaki plazmanın yapısına göre farklılık gösterir.
- Uzak aracının yüzeyinde toplanan yükler akım oluşmasına neden olur.

Nötr Parçacık Etkisi:

- Elektrik motorlarında nötrlerin oluşturduğu kirlenme, optik sesörler, güneş panelleri ve benzeri araçlar için ciddi bir tehlikedir.

Yüzen Potansiyel Etkisi:

- Araç üzerindeki yük birikimi potansiyelde değişikliklere neden olur.
- Bu etkiye karşı, yüklenmenin zıt işaretlisi bir akım oluşturmak ve yüzeyi yüksüzleştirmek gerekir.⁷

SORGUCUN UZAY ARACI İLE ETKİLEŞİMİ

Elektrik motorları ile uzay araçlarını tasarım olarak bağdaştırmak için öncelikle aracın elemanları ile motorun sorguç kısmının nasıl etkileşime girdiğine bakmak lazım. Motorun sorgucu, motorun çalışmasından hemen sonra uzay aracı ile etkileşime girmeye başlar. (sorgucunun sıkışmasından dolayı transfer edilen momentum ya da optik salınımlar, aracın yüzeyindeki iyon aşınımı gibi yavaş ve birikimli süreçler, motorun aşınması nedeniyle ortaya çıkan parçacıkların yüzeyde oluşturduğu kirlenme.) kısa vadeli etkileşimler aracın çalışmasını olumsuz yönde etkilerken, uzun vadeli etkileşimler aracın ömrünü azaltabilir.⁷

Elektrikli itme motorları, motor sorgucu ve aracın elektrik sisteminin etkileşimi bakımından benzersizdir. Sorguç yüklü parçacıklardan oluşur ve

aracın üzerinde taşıdığı elektrik sistemi, güneş panellerinin hücrelerini kenarları arasında birbirine maruz kalan iletkenler arasında akım taşıyabilirler. Bu akımlar ne akdar küçük olsa da, potansiyel değışikliklerine neden olabilirler. Bu potansiyel değışimi, aracın sensörlerinde yanlış ölçümlere ve hatalara neden olabilir.⁷

Önceki bölümlerde de anlatıldığı gibi, parçacıklar itmenin verildiği yönde püskürtülür ve geniş açıda yayılırlar. Geniş açılı bileşen çoğunlukla hızı düşük olan parçacıklardan oluşur. Teknikleri nicel olarak uzay aracı itme motorunun sorguç etkilerini hesaplamak için aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

Püskürtme ve Kirlenme (Sputtering and Contamination):

Dünya'nın çevresinde dolanan uydulara itme motorlarının uygulanması sırasında en büyük endişe, çıkan yüksek enerjili iyon demetlerinin araca zarar verecek olmasıdır. Yukarıda açıklandığı gibi, yüksek enerjili iyonlar güneş panellerine ya da yüzeye yapışarak aşınmaya neden olabilir. Ancak uygun yerleştirme ve yönlendirme sonucu iyon akısı belli bölgelerde düşük olur ve aracın ömrüne fazla bir etkisi olmaz.

Püskürtme aracı iki şekilde etkiler. Birincisi, yüzey püsküren parçacıkların yapışmasıyla kirlenir ya da aşınır. Birincil iyon demetleri bu püskürmenin kaynağını oluşturur ve araç yüzeyinde itme yönünd dar bir koni şeklinde püskürmesinden dolayı zarar verecektir. Koni açısı, püskürtme önemli derecede olduğunda spesifik itme kuvvetine bağlıdır ve genellikle iyon motorları için Hall motorlarından daha dardır.⁷

İkincisi, iyon ve Hall motorları yakıt olarak asal gaz kullanırken, her iki motor da aracın yüzeyinde birikmeye ve kirlenmeye neden olabilir. Yüzeydeki bu kirlenmenin kaynağı, yüksek enerjili iyonların ve motorun malzemesinin motorun demetiyle beraber püskürtülmesidir.⁷

Hall motorlarının sorgucunun genişlemesi iyon motorlarınınkinden iki kat daha fazla olduğundan, püskürtülen maddeler daha geniş açılarla araç yüzeyine gelir. Motorun ömrünün ilk zamanlarında kirlenme, motordaki aşınmalardan ve seramik duvarın aşınmasından gelir. Bu parçacıkların güneş panelleri gibi cam malzemeleri kaplamasının aracın ısısal ve optik özellikleri üzerinde çok az bir etkisi vardır. Motorun daha sonraki zamanlarında püskürtülen manyetik kutuplu parçacıklar ve metalik malzemeler daha çok sorun yaratır.⁷

Hall motoru ile keşfedilen bir etki de, yüksek enerjili iyonların aşınmaya yol açmasının, konumlarına ve motor iyon demetine bağlı olduğudur. Motorun sorgucundan gelen püskürtülen parçacıklar, normal iyon demetinden daha dardır. İtme kuvveti vektörüne göre küçük açılı yüzeyler için, aşınma moleküllerinin birikimi daha büyüktür. Bu da zamanla yüzeye zarar verir. Ancak daha büyük açılı yüzeyler için motordan aşınmayla kopan parçacıkların birikmesi, yüksek enerjili iyon demetlerindenkinden daha hızlı olacaktır. Hall itme motoru için bu çökme ve birikmeyi ayıran hat 65 derecede civarındadır.⁷

BÖLÜM 6 : YÜK DEĞİŞİMİ PARÇACIKLARININ MODELLENMESİ

Yük değişimi reaksiyonlarını daha iyi anlamak için yapılan çalışmalarda yük değişiminin çeşitli özellikleri incelenmiştir. Reaksiyonların oluşum nedeni ve diğer sorguç reaksiyonlarından farkını ortaya koymak için yapılan çalışmalarda reaksiyonun çarpışma kesit alanı, yoğunluk dağılımı, akım yoğunluğu gibi niteliklerinden faydalanılmıştır. Deneylerde defalarca tekrarlanan bu tanımlama metodları ile yük değişimi reaksiyonlarının bazı özellikleri tanımlanmış fakat bir noktadan sonra sondaların ölçümlerinin plazmadaki anlık dalgalanmalardan etkilenmesi nedeniyle daha ileri gidilememiştir. Reaksiyonların çarpışma kesit alanı hesaplanırken sayısal yoğunluk dağılımından yardım alınır. Belirli bir algoritma üzerinden değerlerin yerine konulmasıyla hesaplanır. Reaksiyonların kesit alanlarının hesaplanması için çok fazla matematiksel işlem gerektirmesi ve çoğu kesit alanının bilimsel literatürde olmaması nedeniyle kullanışlı bir olduğu söylenemez. Ayrıca CEX reaksiyonlarının neden ve nasıl oluştuğu, reaksiyonların hörgüç ile ilişkisi hakkında herhangi bir bilgi vermemektedir. Yoğunluk dağılımı ise ölçümlerin simülasyonlarla deneyin tekrarlanmasında kullanılır. Birçok değişiksimülasyon çalışmasında plazmanın değişik özelliklerinden faydalanarak benzer çalışmalar yapılmıştır. Fakat simülasyonlarda sorgucun genel özellikleri ve deneyin verdiğinden farklı bir sonuç vermemesi ve yeni bir bakış açısı sunmaması nedeniyle zamanla simülasyon çalışmaları azalmış, yerini daha fazla deneye bırakmıştır.

CEX reaksiyonlarını enerjilerine göre ayırt etmek için yapılan çalışmalarda iyonların enerji ve akım dağılımı ile plazma parametreleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Yapılan enerji yoğunluğu dağılımı ve akım yoğunluğu dağılımı çalışmalarında bazı iyonların enerjilerinin diğerlerine oranla çok büyük olduğu görüldü. Bu durumda bu iyonların tespit edilmesi ve incelenmesi için sorguç spektroskopik yöntemlerle incelenmiştir. İyonlarşırken elektron verdiklerinden dolayı kütlesi daha az olan iyonların iyonlaşma dereceleri daha büyüktür. Bu iyonlar elektrik alanda daha fazla kinetik enerji depolayacağından daha hızlı olmalıdırlar. Buradan yola çıkarak iyonların hızları ve kütlelerinin yardımıyla iyonlaşma dereceleri tespit edildi. Elektrik alanda depolanan potansiyel enerjinin iyonlara kinetik enerji olarak

aktarıldığını hatırlarsak, kinetik ve potansiyel enerji arasındaki bağıntıdan iyon kinetik enerjisi ve yük arasında bir ilişki elde edilebileceğini görebiliriz. Çünkü CEX reaksiyonları tanınmalı gereği bir yük değişimi reaksiyonuydu ve deneylerdeki ölçümlere göre bu reaksiyonlardan çıkması olası iyonların potansiyel dağılımında yüksek değerlere sahip oldukları görülmüştür. Daha sonra bu enerji yük oranı üzerinden enerji ve momentum korunumunun olduğu elastik yük değişimi reaksiyonlarının ürünlerinin tespiti mümkün olmuştur. Buna göre reaksiyonlarda kinetik enerji ve momentum korunuyor, sadece atomların birbirleriyle girdikleri reaksiyonlar sırasında elektron alışverişi oluyordu. Bu da doğal olarak parçacıkların sahip olduğu potansiyel değerinin değişmesine neden oluyordu.

Yukarıda anlatılan yöntem ile King ve Gallimore (1999) un çalışmasında yapılan deneyden yola çıkarak ürünlerin potansiyel ve hızlarından faydalanarak ölçüm yapılamayan bölgeler için ölçüm sonuçlarıyla tutarlı bir model ortaya koyduk. Bu modelde çok yakın mesafedeki yük değişimi reaksiyonlarının nasıl olabileceğini öngördük ve bu reaksiyonların hörgüç yapısı ile nasıl bir ilişki içinde olduğunu açıkladık.

Yük değişimi parçacıklarının hızlarının modellenmesi

Elastik olmayan CEX çarpışmasında, hızlandırıcı potansiyelden kazanılan iyon kinetik enerjisinin yük sayısı ve birim yüke oranı daima hızlandırma potansiyelini vereceği biliyoruz.¹⁰

$$\frac{E_i}{V_d} = q_i e \quad q_i: 1, 2, 3, 4 \quad (5.7)$$

V_d , q_i , e sabit kaldığında, oran da korunuyor. İyonların kinetik enerjisi aynı zamanda,

$$E_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (5.8)$$

olarak yazılabilir. Yukarıdaki eşitlik 4.1 de yerine konulursa,

$$v_i^2 = \frac{2q_i e}{m_i} V_d \quad (5.9)$$

Burada voltaj, hızlandırma voltajı olduğu için bulduğumuz hız hızlandırmanın olduğu bölümdeki ($z=0$) yan, çıkıştaki hızdır.

Roket eşitliğindeki iyon hızının, model denklemdeki z yönündeki parçacık hızına eşit olması nedeniyle ($v_i = v_z$), sorguç parçacıklarının çıkıştaki hız vektörü v_{ex} ,

$$v_{ex} = \sqrt{v_\rho^2 + v_z^2} \quad (6.1)$$

olduğundan,

$$v_{ex} = \sqrt{\frac{2q_i e}{m_i} V_d} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2} \quad (6.2)$$

Şeklindedir. Burada ,

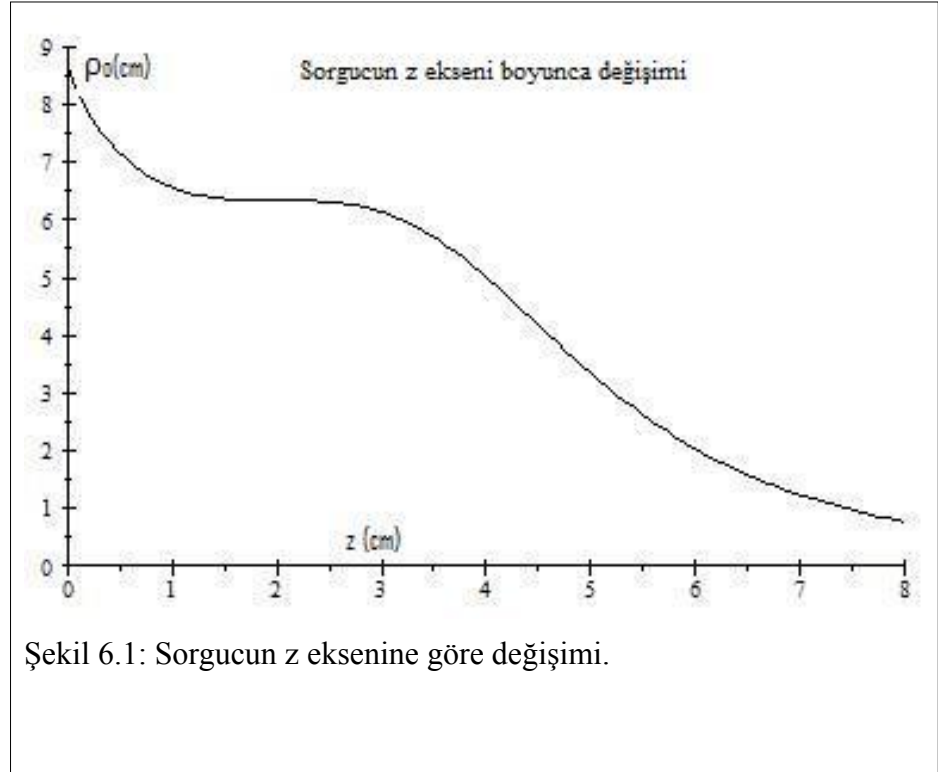
v_ρ = sorguç parçacıklarının yarıçap doğrultusundaki bileşeni.

v_z = sorguç parçacıklarının merkez eksenine doğrultusundaki bileşeni.

Aynı eşitlik, sorgucu oluşturan parçacıklar için yörünge denklemi kullanılarak (A. YILMAZ - 2011) sorgucun merkez eksenine paralel hız bileşeni yazılabilir.

$$v_z = \frac{v_{ax}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{d\rho(z)}{dz} \right)^2} \right)_{z=0}} \quad (6.3)$$

Şekil 6.1 de motorun sorgucunun z eksenini boyunca değişimi görülmektedir.



Sorguç kısmında etkin itme kuvvetini veren birinci dereceden iyonlaşmış iyonların hızlarının parçacık yörüngesi boyunca değişimi şekil 6.2 de gösterilmiştir. Yüklü parçacıklar yük değişimi çarpışmasına girdikten sonra azalan enerjilerine bağlı olarak hızlarının net olarak azalması görülmektedir. Burada eşitlik (5.9) a göre yük değişimi ürünlerinin akım - iyon enerjisi/yük grafiğinde görülen potansiyel dağılımına benzer biçimde bulunan potansiyellere ilişkin parçacıkların tam olarak hangi yük değişimi reaksiyonları sonucu çıkışa ne kadar uzaklıkta ortaya çıktıklarını hesaplayabiliyoruz.

Hall etkisi motorunda, katottan iyonlaşma odacığına pompalanan yakıt anottan gelen elektronlarla çarpışarak iyonlaşır. Bu iyonlar içinde buldukları elektromanyetik alan vasıtasıyla hızlandırılarak çıkıştan dışarı doğru gönderilir. Bu sırada manyetik alandan etkilenen elektronlar yarıçap yönünde Larmour frekansı ile dönerek anotta iyonları tekrardan nötrleştirmek için tuzaklanır. İyonlar ise bu manyetik alandan etkilenmeden düzgün bir şekilde yol alır. Bunun nedeni ise iyonlaşma odacığının yarıçapının elektronların Larmour yarıçapından büyük, iyonların Larmour yarıçapından ise küçük seçilmesidir. Böylece elektronlar yarıçap yönünde yol alırken iyonlar düzgün bir yol takip ederler. İyonlar, elektrik alanında depolanmış olan potansiyel enerjiyi kinetik enerji olarak kazanırlar. Potansiyel ile elektronların kinetik enerjisi arasındaki ilişki,

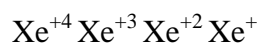
$$V_d = E_i / q_i e$$

şeklinde yazılabilir. Bu kinetik enerji iyonların yükleri ile orantılıdır. Örneğin Xe^+ iyonunun kazandığı kinetik enerji E_i ise Xe^{++} iyonunun kazandığı kinetik enerji $2E_i$ dir. Bu durumda başlangıçtaki yükleri +1 ve +2 olduğundan eşitliğe göre her iki iyonun da potansiyeli V_d ye eşittir. Aynı elektrik alana maruz kalan parçacıklar için potansiyellerinin aynı olması beklenen bir sonuçtur. Fakat bu iki iyon kendi aralarında bir yük değişimi reaksiyonuna girerse o zaman durumda nasıl bir değişim olacaktır. Böyle bir çarpışmada Xe^+ iyonunun bir elektronunu Xe^{++} iyonuna verdiğini varsayalım. O zaman Xe^+ nin yükü +2 olacaktır. Bu durumda yük değişimi reaksiyonunun tanımı gereği iyonların enerjisi değişmediğinden dolayı (momentum korunumu nedeniyle) kendisinin kinetik enerjisi aynı kalacaktır. O zaman Xe^+ in potansiyeli $E_i/2e = V_d/2$ olacaktır. Aynı şekilde Xe^{++} iyonu da bir elektron aldığından iyonlaşma derecesi azalacaktır. Aynı eşitlik bu durumda, $2E_i/e = 2V_d$ halini alacaktır. Kolayca görüldüğü gibi çarpışma öncesi potansiyelleri eşit olan iki iyon, çarpışma sonrası birbirlerinden ayırt edilebilecek potansiyellere sahip olmuşlardır. Başlangıçta motordan çıkan bütün birincil iyonların aynı potansiyelde olduğunu göz önüne alırsak, bu çarpışma sonrası bazı iyonların potansiyelinin, motorda kazandıkları

potansiyelden daha yüksek olacağı görülür. Bu noktadan hareketle deneylerde yapılan ölçümlerde [King & Gallimore (1999)] böyle bir potansiyele sahip iyonların elastik yük değişimi çarpışmasından çıkmış olabilecekleri öngörülebilir. Bu yöntemle Xe^+ iyonunun gireceği tüm reaksiyonları belirleyerek, reaksiyon sonucu ortaya çıkması muhtemel iyonların potansiyelleri hakkında bilgi sahibi olabiliriz. Tablo 1' de Xe^+ için olası yük değişimi reaksiyonları görülmektedir.

Tablo 1: Xe^+ için olası yük değişimi reaksiyonları	
Reaksiyon	Olası reaksiyon ürünleri
$Xe^+(V_d) + Xe^+(V_d)$	$Xe^{+2}(V_d/2)$
$Xe^+(V_d) + Xe^{+2}(V_d)$	$Xe^{+2}(V_d/2) + Xe^+(2V_d)$ $Xe^{+3}(V_d/3)$ $Xe^{+3}(2V_d/3)$
$Xe^+(V_d) + Xe^{+3}(V_d)$	$Xe^{+2}(V_d/2) + Xe^{+2}(3V_d/2)$ $Xe^{+3}(V_d/3) + Xe^+(3V_d)$ $Xe^{+4}(V_d/4)$ $Xe^{+4}(3V_d/4)$
$Xe^+(V_d) + Xe^{+4}(V_d)$	$Xe^{+2}(V_d/2) + Xe^{+3}(4V_d/3)$ $Xe^{+3}(V_d/3) + Xe^{+2}(2V_d)$ $Xe^{+4}(V_d/4) + Xe^+(4V_d)$

Daha önce yapılan deneylerde motorun iyonlaşma odacığının sıcaklığının 4. dereceye kadar iyonlaşmaya yetecek derecede yüksek olduğu söylenmişti (King & Gallimore-2004). Motordan 4. dereceye kadar iyonlaşmış iyonların çıktığını varsayarsak, çıkış sıralamasına göre, ilk olarak içeride en az çarpışmaya giren Xe^+ iyonu çıkacaktır. Ardından iyonlaşma derecelerine göre sırasıyla Xe^{+2} , Xe^{+3} ve en son Xe^{+4} çıkacaktır. Bunun yanısıra kazandıkları kinetik enerji dolayısıyla hızlarına göre bir sıralama yapacak olursak, en hızlı iyonun Xe^{+4} olması gerekmektedir. Bu durumda hıza göre sıralama,



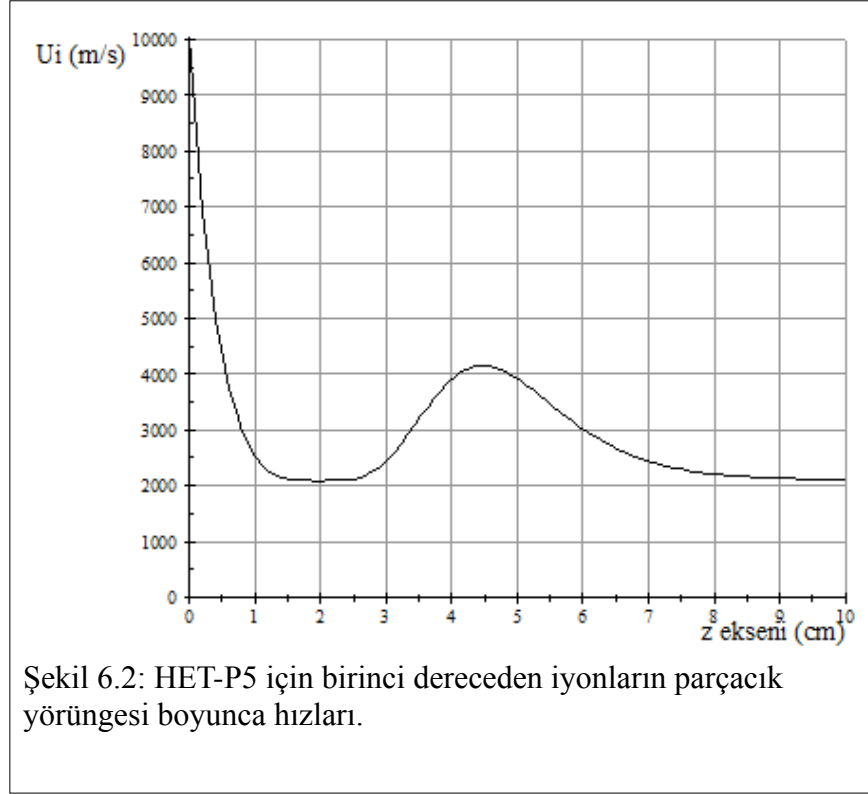
şeklinde olacaktır. Çıkıştan sonra Xe^+ ilk elastik yük değişimi çarpışmasını bu durumda diğerleri içinde en hızlı ve ona ilk yetişebilecek olan Xe^{+4} iyonunun yapması gerekmektedir. Ardından sırasıyla Xe^{+3} ve Xe^{+2} başka 1. dereceden iyonlarla elastik yük değişimi çarpışmasına girecektir.

Tablo 2: Xe^+ için şekil 6.2 deki olası reaksiyonlar		
Mesafe (cm)	Reaksiyon	Reaksiyon ürünleri
z=3 cm	$Xe^{+4} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^{+3} (4V_d/3) + Xe^{+2} (V_d/2)$
z=3.1 cm	$Xe^{+3} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^{+2} (3V_d/2) + Xe^{+2} (V_d/2)$
z=3.4 cm	$Xe^{+2} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^+ (2V_d) + Xe^{+2} (V_d/2)$
z=3.8 cm	$Xe^{+3} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^+ (3V_d) + Xe^{+3} (V_d/3)$
z=4.47 cm	$Xe^{+4} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^+ (4V_d) + Xe^{+4} (V_d/4)$
z=5.3 cm	$Xe^{+3} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^+ (3V_d) + Xe^{+3} (V_d/3)$
z=6 cm	$Xe^{+2} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^+ (2V_d) + Xe^{+2} (V_d/2)$
z=6.7 cm	$Xe^{+3} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^{+2} (3V_d/2) + Xe^{+2} (V_d/2)$
z=7 cm	$Xe^{+4} (V_d) + Xe^+ (V_d)$	$Xe^{+3} (4V_d/3) + Xe^{+2} (V_d/2)$

Tablo 2 de, Şekil 6.2 deki yüzeyde olması olası elastik yük değişimi reaksiyonları görünmektedir. Aşağıdaki eşitlik bize V_b ile V_d arasındaki ilişkiyi vermektedir.

$$V_b = 1 + \left(\frac{d\rho(z)}{dz} \right)^2 V_d \quad (6.4)$$

Burada V_d , hızlandırıcı potansiyel V_b ise sorguındaki iyonların demet potansiyelidir. Bu ilişkiye göre Sekil 5.2 de $z= 2-2.5$ cm arasındaki potansiyeli, hızlandırıcı potansiyeldee eşit olan ($V_d=V_b$) iyonların olması gerekmektedir. Burada itibaren mesafeye bağlı olarak elastik yük değişimi reaksiyonları sonucu iyonların potansiyellerinin değiştiği görülmektedir.



Motordan çıkan iyonların elastik yük değişimi reaksiyonuna girdiği ilk nokta $z=3$ cm dir. Burada daha önce söylenildiği gibi Xe^+ ile ilk reaksiyona giren Xe^{+4} tür. Etkileşim sonucu xe^+ den kopan bir elektron Xe^{+4} iyonuna geçer. Etkileşim sonucu V_d potansiyeline sahip olan Xe^{+4} , $4V_d/3$ potansiyelli Xe^{+3} haline gelir. V_d potansiyeline sahip olan Xe^+ ise, bir elektronunu verdiği için dolaylı $V_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} iyonuna dönüşür. Yukarıdaki eşitliğe göre $z=3$ cm de $4V_d/3$ potansiyeline sahip bir iyon olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

$z=3.1$ cm de ikinci etkileşimin olması gerekmektedir. Xe^{+3} ile Xe^+ etkileşime girmiş ve Xe^+ bir elektron vererek $V_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} haline dönüşmüştür. Bir elektron alan Xe^{+3} ise $3V_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} iyonu olmuştur. Sonuç olarak V_d potansiyeline sahip Xe^{+3} ve Xe^+ iyonları etkileşimden sonra $3V_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} ve $V_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} iyonları haline gelmişlerdir.

$z=3.4$ cm de karşımıza üç farklı reaksiyon çıkmaktadır. Xe^{+2} ile Xe^4 etkileşime girmesi sonucu $2V_d$ potansiyeline sahip Xe^+ ile Xe^{+2} ($V_d/2$) ortaya çıkar. Bu noktada olması mümkün diğer reaksiyonlar da $z=3$ cm de ortaya çıkan $4V_d/3$ potansiyelli Xe^{+3} iyonunun $z=3.1$ cm dek ortaya çıkan Xe^{+2} iyonu ile girdiği etkileşimdir. Xe^{+3} ($4V_d/3$) ile Xe^{+2} ($2V_d$) nin etkileşimi sonucu, Xe^{+2} ($2V_d$) ile Xe^{+2} ($V_d/2$) ortaya çıkmaktadır.

$z=3.8$ cm de $3V_d$ potansiyele sahip ürün verebilecek dört olası reaksiyon vardır. İlki, birincik iyonlar olan V_d potansiyelli Xe^{+3} ile Xe^+ nin etkileşimiyle, Xe^4 den kopan iki elektron Xe^{+3} e geçer. Sonuç olarak $3V_d$ potansiyeline sahip Xe^+ iyonu ile $V_d/3$ potansiyeline sahip Xe^{+3} ortaya çıkar. Bu noktada olma olasılığı olan diğer üç reaksiyonda ise önceki reaksiyonlarda ortaya çıkan iyonların birbirleriyle ve birincil Xe^+ ile etkileşimi görülmektedir. Bu reaksiyonlar $z=3.1$ cm de üretilen $3V_d/2$ potansiyelli Xe^{+3} iyonunun $z=3.4$ cm de ortaya çıkan Xe^{+2} ($V_d/2$) ve Xe^{+3} ($V_d/3$) ile birincil Xe^+ iyonlarıyla etkileşime girmesiyle oluşabilir. Xe^{+2} ($3V_d/2$) nin Xe^{+2} ($V_d/2$) ile girdiği reaksiyon sonucu ortaya $3V_d$ potansiyeline sahip Xe^+ ve $V_d/3$ potansiyelli Xe^{+3} iyonunun bir elektron vermesiyle Xe^{+4} ($V_d/4$) meydana gelir. Olması muhtemel son reaksiyonda ise Xe^{+2} ($3V_d/2$) iyonu birincil Xe^+ (V_d) ile etkileşime girerek Xe^+ ($3V_d$) iyonu ile beraber Xe^{+2} ($V_d/2$) iyonunu meydana getirir.

$z=4.47$ cm de eğrimizin tepe noktasına gelmiş oluyoruz. Tepe noktası, aynı zamanda en yüksek potansiyelin görüldüğü ($4V_d$) noktadır. Bu noktadaki olası reaksiyonların baş kahramanları motordan son olarak çıkan ama en hızlı iyon olan Xe^{+4} (V_d), $z=3$ cm de üretilen Xe^{+3} ($4V_d/3$) ve $z=3.4$ cm de ortaya çıkan Xe^{+2} ($2V_d$) iyonlarıdır. Bu iyonların, ürünlerden birinin $4V_d$ potansiyeline sahip olacağı olası reaksiyonlarında ilk olarak Xe^{+4} (V_d) iyonunun Xe^+ iyonu ile etkileşimine göz atalım. Bu reaksiyonda Xe^+ iyonu üç elektron vererek $V_d/4$ potansiyelli Xe^{+4} iyonuna dönüşür. Üç elektronu alan Xe^{+4} (V_d) ise $4V_d$ potansiyelli Xe^{+4} şekline bürünür. Bunun haricinde

$z=3$ cm de üretilen $4V_d/3$ potansiyelli Xe^{+3} iyonu $z=3.1$ cm ve $z=3.4$ cm de üretilen Xe^{+2} ($V_d/2$) iyonlarının birinden iki elektron alarak $4V_d$ potansiyelli

Xe^+ haline gelir. İki elektron veren Xe^{+2} ($V_d/2$) iyonlarının birinden iki elektron alarak iyonlaşma derecesi artarak Xe^{+4} ($V_d/4$) haline dönüşür. Ayrıca $z=3$ cm de ortaya çıkan Xe^{+3} ($4V_d/3$) birincil Xe^+ iyonundan iki elektron alarak $Xe^{+(4V_d)}$ ve Xe^{+3} ($V_d/3$) ürünlerini ortaya çıkarabilir. İlk olarak $z=3.4$ cm deki reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan Xe^{+2} ($2V_d$) iyonu ise, $z=3.8$ cm de üretilen Xe^{+3} ($V_d/3$) iyonundan bir elektron alarak $4V_d$ potansiyelli Xe^{+4} iyonuna dönüşür. Bu noktada Xe^{+2} ($2V_d$) iyonunun girebileceği son reaksiyon birincil Xe^+ (V_d) iyonuydur. Bu iyondan bir elektron alan Xe^{+2} ($2V_d$), $4V_d$ potansiyelli Xe^+ haline gelirken, Xe^+ (V_d) ise Xe^{+2} ($V_d/2$) şekline dönüşür.

$z=5.3$ cm deki reaksiyonlar , $z=3.8$ cm deki reaksiyonlar ile aynı potansiyele sahip ürün verdiği için farklı bir reaksiyon görünmemektedir. $z=3.1$ cm de üretilen Xe^{+2} ($3V_d/2$) iyonudur. Onun dışında başka bir iyonun yük değişimi reaksiyonuna girerek $3V_d$ potansiyeline sahip ürün çıkarması mümkün görünmemektedir. Yük değişimi dışında herhangi bir reaksiyon ile de potansiyelin azaldığı ve $3V_d$ potansiyelli ürün veren bir reaksiyonun oluşması olasılık dışıdır.

$z=5.3$ cm de, $z=3.1$ cm de üretilen $3V_d/2$ potansiyele sahip olan Xe^{+2} bir elektron alarak $3V_d$ potansiyelli Xe^+ haline gelir. Bunun haricinde bu noktada $3V_d$ potansiyele sahip bir iyon ölçülmesinin iki farklı açıklaması vardır. İlk olarak bu iyonun bizim incelediğimiz elastik yük değişimi reaksiyonları dışındaki herhangi bir reaksiyon ya da reaksiyonların ürünü olduğu söylenebilir. İkinci seçenek ise, $z=3.8$ cm de ortaya çıkan $3V_d$ potansiyelli Xe^+ iyonunun bu noktaya kadar reaksiyona girmeden olması gerekmektedir. $z=3.8$ cm ile $z=5.3$ cm arasında Xe^+ ($3V_d$) iyonlarının herhangi bir reaksiyona girmemiş olması da ikinci seçeneği destekler niteliktedir.

$z=6$ cm de $2V_d$ potansiyeye sahip iyon üretebilecek reaksiyonlar karşımıza $z=4.47$ cm de üretilen $4V_d$ potansiyeye sahip Xe^+ iyonunu çıkarmaktadır. $z=5.3$ cm de üretilen iyonlar ve birincil Xe^+ ile gireceği reaksiyonların sonucunda $2V_d$ potansiyeye sahip Xe^{+2} iyonu ortaya çıkacaktır. İlk olarak $z=5.3$ cm de üretilen $Xe^+(3V_d)$ ile olan reaksiyonu sonucu $Xe^+(4V_d)$ iyonu, $Xe^+(3V_d)$ iyonuna bir elektron vererek $Xe^{+2}(2V_d)$ iyonu haline gelir. Bir elektron alan $Xe^+(3V_d)$ ise yüksüzleşir. $Xe^+(3V_d)$ ile aynı noktada ortaya çıkan $Xe^{+3}(V_d/3)$ iyonu $Xe^+(4V_d)$ ile etkileşiminde bir elektron alarak $Xe^{+2}(V_d/2)$ haline gelirken $Xe^+(4V_d)$ ise $Xe^{+2}(2V_d)$ haline gelmektedir. Yine $z=5.3$ cm de ortaya çıkan bir başka iyondan $Xe^{+4}(V_d/4)$ ile $Xe^+(4V_d)$ iyonunun etkileşiminden ortaya $Xe^{+2}(2V_d)$ ve $Xe^{+3}(V_d/3)$ iyonları çıkmaktadır. $Z=5.3$ cm den gelen son iyon ise $Xe^{+2}(V_d/2)$ dir. $Xe^+(4V_d)$ ile etkileşiminden $Xe^{+2}(2V_d)$ ve $Xe^+(V_d)$ iyonları ortaya çıkar. Ayrıca $Xe^+(4V_d)$ iyonu birincil Xe^+ ile etkileşiminden bir elektron vererek $Xe^{+2}(2V_d)$ durumuna geçer $Xe^+(V_d)$ iyonu ise yüksüzleşir.

$z=6.7$ cm ve $z=7$ cm de önceki reaksiyonlardan çıkan iyonlara da bağlı olarak olası reaksiyon sayısı artmıştır. $z=6.7$ cm de $z=3.8$ ve 5.3 cm lerde görülen $Xe^+(3V_d)$ iyonunun değişik iyonlarla girdiği reaksiyonlardan $3V_d/2$ potansiyeye sahip iyon çıkmaktadır. Ancak reaksiyonlar $Xe^+(3V_d)$ iyonunun bulunduğu bölgeye göre farklılık göstermektedir. Öncelikle $z=3.8$ cm den çıkan $Xe^+(3V_d)$ iyonunun girdiği reaksiyonlara bakarsak, $z=4.47$ ve 5.3 cm lerden çıkan $Xe^{+4}(V_d/4)$ ile girdiği etkileşimden $Xe^{+2}(3V_d/2)$ ise $Xe^{+3}(V_d/3)$ iyonları ortaya çıkmaktadır. $Z=4.47$, 5.3 ve 6 cm lerde ortaya çıkan $Xe^{+3}(V_d/3)$ ise $Xe^+(3V_d)$ iyonundan bir elektron alarak $Xe^{+2}(V_d/2)$ iyonuna dönüşür. Gene aynı noktalardan çıkan $Xe^{+2}(V_d/2)$ iyonunun $Xe^+(3V_d)$ ile reaksiyonundan ise $Xe^{+2}(V_d/2)$ iyonunun bir elektron almasıyla $Xe^+(V_d)$ iyonu çıkar. $z=6$ cm deki reaksiyonun ürünü olan $Xe^+(V_d)$, gene bir elektron alarak yüksüz duruma geçer. $z=3.8$ cm den çıkan $Xe^+(3V_d)$ için som reaksiyonların sonucunda hedef potansiyeye sahip olan $Xe^{+2}(3V_d/2)$ iyonu ortaya çıkar.

$z=5.3$ cm de ortaya çıkan $Xe^+(3V_d)$ için ise, $z=4.47$ cm den gelen $Xe^+(4V_d)$ iyonuna bir elektron vererek $Xe^{+2}(3V_d/2)$ iyonuna dönüşür. $Xe^+(4V_d)$ ise yüksüzleşir. $z=6$ cm de ortaya çıkan $Xe^{+3}(V_d/3)$, $Xe^{+2}(V_d/2)$ ve $Xe^+(V_d)$ iyonlarına bir elektron vererek sırasıyla $Xe^{+2}(V_d/2)$, $Xe^+(V_d)$ ve yüksüz Xe atomu meydana getirir. Bunların yanısıra hedef potansiyele sahip $Xe^{+2}(3V_d/2)$ iyonu da diğer ürünümüz olarak reaksiyonlardan çıkmaktadır. Bu noktadaki son reaksiyon olarak birincil Xe^+ ile etkileşiminde, Xe^+ iyonuna bir elektron vererek onu yüksüzleştirir ve $Xe^{+2}(3V_d/2)$ iyonuna dönüşür.

$z=7$ cm de $2V_d$ potansiyele sahip ürün verebilecek reaksiyona giren $z=3.4$ ve $z=6$ cm de ortaya çıkan $Xe^{+2}(2V_d)$ ve $z=4.47$ cm de ortaya çıkan $Xe^+(4V_d)$ iyonları olabilir. Çünkü $4V_d/3$ potansiyelli bir ürünü sadece 4. dereceden bir iyon ya da onun ürünleri verebilir. İlk olarak $z=3.4$ cm deki $Xe^{+2}(2V_d)$ iyonunun etkileşimlerine bakarsak, $z=3.8$, 4.47 ve 5.3 cm lerdeki $Xe^{+4}(V_d/4)$; $z=3.8$, 4.47 , 5.3 , 6 , 6.7 cm lerdeki $Xe^{+3}(V_d/3)$; $z=3.8$, 4.47 , 5.3 , 6 , 6.7 cm lerdeki $Xe^{+2}(V_d/2)$; $z=6.7$ cm deki V_d potansiyelli Xe^+ iyonlarına farklı reaksiyonlarda bir elektron vererek $Xe^{+3}(4V_d/3)$ iyonuna dönüşür. Bu reaksiyonlardan sırasıyla $Xe^{+3}(V_d/3)$, $Xe^{+2}(V_d/2)$, $Xe^+(V_d)$ ve 2 tane yüksüz Xe atomu çıkar.

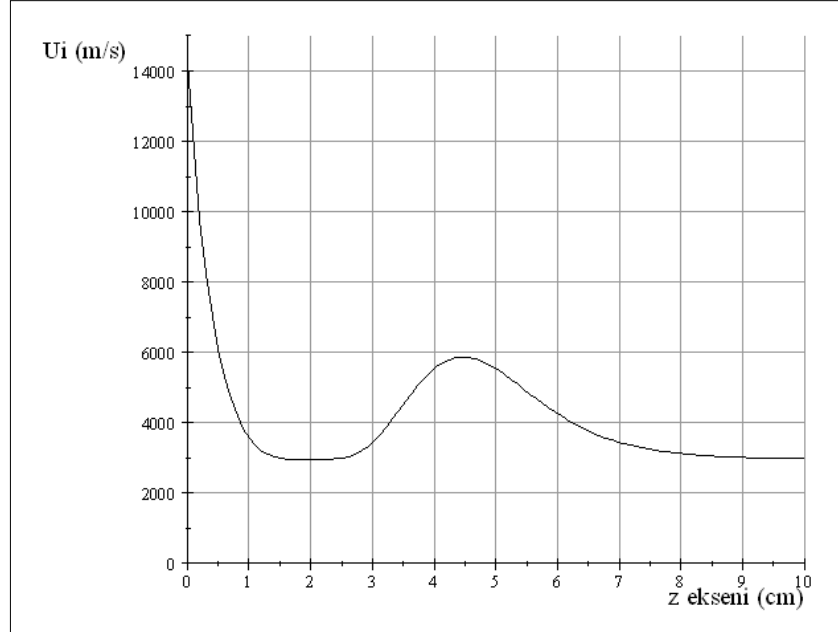
Tablo 2 'yi genel olarak incelersek, $z=3.4 - 6$ cm arasında birden fazla elektron alışverişi olmaktadır. Bu aralıkta iyonların hızı 3000 m/s yi geçmektedir. $z=7$ cm deki reaksiyonlarda da birden fazla elektron alışverişi olmaktadır ama Xe^{+4} nin elektron almasıyla ortaya çıkan $Xe^+(4V_d)$ nin Xe^+ nin iki elektron vererek $Xe^{+3}(V_d/3)$ ve Xe^{+4} nin bir elektron vererek $Xe^{+3}(4V_d/3)$ olmuş haliyle karşılaşması toplam iyon yoğunluğu içindeki yüzdeleri gözönüne alındığında ihmal edilebilir olarak görülmektedir. Ayrıca iyonların hızlarına bakıldığında $z=4.47$ cm den sonra hızla azaldığını ve $z=8$ cm de sabitlendiğini görüyoruz. Dolayısıyla $z=4.47$ cm de sonra potansiyelin azalması gerektiğinden, potansiyelin arttığı reaksiyonlar bu noktadan sonra görülmemelidir. $z=4.47$ cm den önce üretilen iyonların bu noktadan itibaren geriye girdikleri etkileşimlerde potansiyellerinin azaldığı açıkça

görülmektedir. Kısaca $z=4.47$ cm den sonraki reaksiyonların büyük bir çoğunlukla bu noktadan önce üretilen parçacıkların girdiği reaksiyonlar olduğunu söyleyebiliriz. Yapılan bu çalışma sorgucun sadece belirli bir katmanı için yapılmış olup “iç içe geçmiş katmanlardan oluşan bir sorguç yapısı” göz önüne alındığında $\rho(z)$ parametresinin değişkenleriyle oynayarak bulabileceğimiz diğer katmanlar içinde aynı grafikler çizdirilip yorumlanarak hangi reaksiyonların hangi uzaklıkta olabileceği hakkında yorum yapmak mümkün olacaktır.

2.dereceden iyonlaşmış parçacıkların olduğu yüzey Şekil 6.3 te verilmiştir. Sorguçta Xe^+ iyonundan sonra en büyük yoğunluğa sahip olan Xe^{+2} iyonunun hız-konum grafiği üzerinde V_b ve V_d arasındaki ilişkiden faydalanarak Xe^+ için şekil 6.2 de bulduğumuz olası reaksiyonları Xe^{+2} için değiştirilmiş hali tablo 3 te görülmektedir.

Tablo 3: Xe^{+2} için Şekil 6.3'teki olası reaksiyonlar	
Olası Reaksiyon	Reaksiyon ürünleri
$Xe^+(V_d) + Xe^{+2}(V_d)$	$Xe^{+3}(2V_d/3)$ $Xe^{+2}(V_d/2) + Xe^+(2V_d)$
$Xe^{+2}(V_d) + Xe^{+2}(V_d)$	$Xe^+(2V_d) + Xe^{+3}(2V_d/3)$ $Xe^{+4}(V_d/2)$
$Xe^{+3}(V_d) + Xe^{+2}(V_d)$	$Xe^{+2}(3V_d/2) + Xe^{+3}(2V_d/3)$ $Xe^+(3V_d) + Xe^{+4}(V_d/2)$ $Xe^{+4}(3V_d/4) + Xe^+(2V_d)$
$Xe^{+4}(V_d) + Xe^{+2}(V_d)$	$Xe^{+3}(4V_d/3) + Xe^{+3}(2V_d/3)$ $Xe^{+2}(2V_d) + Xe^{+4}(V_d/2)$

Tablo 4: Xe ⁺ için şekil 6.3' teki sorguç yüzeyindeki reaksiyonlar		
Mesafe (cm)	Reaksiyon	Reaksiyon ürünleri
z=3 cm	Xe ⁺⁴ (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺³ (4V _d /3) + Xe ⁺³ (2V _d /3)
z=3.1 cm	Xe ⁺³ (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺² (3V _d /2) + Xe ⁺³ (2V _d /3)
z=3.4 cm	Xe ⁺² (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺ (2V _d) + Xe ⁺³ (2V _d /3)
z=3.8 cm	Xe ⁺³ (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺ (3V _d) + Xe ⁺⁴ (V _d /2)
z=4.47 cm		
z=5.3 cm	Xe ⁺³ (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺ (3V _d) + Xe ⁺⁴ (V _d /2)
z=6 cm	Xe ⁺² (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺ (2V _d) + Xe ⁺³ (2V _d /3)
z=6.7 cm	Xe ⁺³ (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺² (3V _d /2) + Xe ⁺³ (2V _d /3)
z=7 cm	Xe ⁺⁴ (V _d) + Xe ⁺² (V _d)	Xe ⁺³ (4V _d /3) + Xe ⁺³ (2V _d /3)



Şekil 6.3: 2. Dereceden iyonlaşmış Xe iyonlarının oluşturduğu sorguç yüzeyi.

z= 3 cm de $4V_d/3$ potansiyele sahip ürün verebilecek Xe⁺² iyonunun girdiği reaksiyon şekil 6.3 te verilmiştir. Motordan son çıkan buna karşın kinetik enerjisi nedeniyle en hızlı iyon olan Xe⁺⁴, Xe⁺² ile reaksiyona giren ilk iyondur. Bu reaksiyonda Xe⁺² (V_d) iyonu bir elektronu Xe⁺⁴(V_d) iyonuna vererek $2V_d/3$ potansiyelli Xe⁺³ iyonuna dönüşür. Xe⁺⁴ ise aldığı bir elektronla beraber $4V_d/3$ potansiyele sahip Xe⁺³ iyonuna dönüşür.

$z=3.1$ cm de $\text{Xe}^{+2}(\text{V}_d)$ ile $\text{Xe}^{+3}(\text{V}_d)$ iyonunu, $\text{Xe}^{+2}(\text{V}_d)$ iyonundan bir elektron alarak $3\text{V}_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} iyonu haline gelirken, $\text{Xe}^{+2}(\text{V}_d)$ iyonu ise $2\text{V}_d/3$ potansiyelli Xe^{+3} iyonuna dönüşür.

$z=3.4$ cm de 2V_d potansiyelli ürün verebilecek dört farklı reaksiyon karşımıza çıkıyor. $\text{Xe}^{+2}(\text{V}_d)$ iyonunun farklı reaksiyonlarda $\text{Xe}^+(\text{V}_d)$ ve $\text{Xe}^{+3}(\text{V}_d)$ iyonlarından bir elektron alarak ve $\text{Xe}^{+4}(\text{V}_d)$ iyonuna iki elektron vererek sırasıyla $\text{Xe}^{+2}(2\text{V}_d)$ ve $\text{Xe}^{+4}(\text{V}_d/2)$ iyonlarına dönüşmektedir. Hedef potansiyele sahip olan $\text{Xe}^+(2\text{V}_d)$ iyonunun yanısıra $\text{Xe}^{+2}(\text{V}_d/2)$, $\text{Xe}^{+4}(3\text{V}_d/4)$ ve $\text{Xe}^{+4}(\text{V}_d/2)$ iyonları da ürün olarak çıkmaktadırlar. Bu reaksiyonlardan başka $z=3$ cm de ortaya çıkan $\text{Xe}^{+3}(4\text{V}_d/3)$ ile $z=3.1$ cm de ortaya çıkan $\text{Xe}^{+3}(2\text{V}_d/3)$ iyonlarının $z=3.4$ cm de etkileşime girmesi sonucu $\text{Xe}^{+3}(4\text{V}_d/3)$ iyonu bir elektron alarak $\text{Xe}^{+2}(2\text{V}_d)$ iyonuna dönüşür. Bir elektron veren $\text{Xe}^{+3}(2\text{V}_d/3)$ ise $\text{V}_d/2$ potansiyelli Xe^{+4} iyonuna dönüşür.

$z=3.8$ cm de, $z=3.1$ cm de ortaya çıkan $\text{Xe}^{+2}(3\text{V}_d/2)$ iyonunun $z=3.4$ cm de ortaya çıkan $\text{Xe}^{+2}(\text{V}_d/2)$ iyonundan bir elektron alarak $\text{Xe}^+(3\text{V}_d)$ haline gelmesiyle olabilir. Bu durumda bir elektron veren $\text{Xe}^{+3}(\text{V}_d/2)$ iyonu da $\text{Xe}^{+3}(\text{V}_d/3)$ haline gelir.

Xe^{+2} iyonunun, yüzeyin tepe noktası olan $z=4.47$ cm de 4V_d potansiyele sahip ürün veremeyeceğinden herhangi bir reaksiyon gerçekleşmez.

Tepe noktasına kadar olan reaksiyonların hepsinde Xe^+ için çizilen yüzeydeki gibi hızın artmasının nedeni olarak reaksiyon sonucu ortaya çıkan iyonun potansiyelinin, başlangıca göre daha büyük olması gösterilebilir. Bu noktadan sonra gene aynı şekilde hızın azalmasının nedeni de $z=4.47$ cm den sonraki noktalarda reaksiyon sonucu potansiyellerin azalması olarak gösterilebilir. Bu nedenle buradan sonra olacak reaksiyonların, öncekilerde aynı olması beklenmemelidir.

Tepe noktasından sonraki ilk noktada, $z=5.3$ cm de bu kuralın istisnaya uğradığı görülüyor. Tablo 2 nin açıklamasında $z=5.3$ cm ile ilgili kısımda söylenenlerin hepsi burası için de geçerlidir. $z=6$ cm de, $z=3$ cm den gelen $4V_d/3$ potansiyelli Xe^{+3} ile $z=3.4$ cm den gelen $V_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} iyonun etkileşiminde bir elektron alan Xe^{+3} ($4V_d/3$), $2V_d$ potansiyelli Xe^{+3} haline geçer. Xe^{+2} ($V_d/2$) iyonu ise bir elektron vererek $V_d/3$ potansiyeline sahip Xe^{+3} haline gelir. Xe^{+3} ($V_d/3$) iyonundan bir elektron alarak Xe^{+2} ($2V_d$) iyonuna dönüştüğü reaksiyondur. Bu durumda Xe^{+3} ($V_d/3$) iyonu da Xe^{+4} ($V_d/4$) haline gelir.

$z=6.7$ cm de $3V_d/2$ potansiyele sahip ürün verebilecek bir reaksiyon oluşturabilecek iyonlar $z=3.4$ cm deki $Xe^{+4}(3V_d/4)$, $z=3.8$ cm de üretilen $Xe^+(3V_d)$ ve $z=5.3$ cm den gelen $Xe^+(3V_d)$ dir. Bu tür bir reaksiyon için $z=3.4$ cm deki $Xe^{+4}(3V_d/4)$ iyonun kendisinden sonra oluşan ve daha yavaş bir iyonun iki elektron alması gerekmektedir. $z=3.4 - 6.7$ cm arasında böyle bir iyon olmadığından, $Xe^{+4}(3V_d/4)$ iyonunun $3V_d/2$ potansiyelli ürün verecek bir reaksiyona girmesi mümkün değildir. $z=5.3$ cm deki $Xe^+(3V_d)$ iyonuna yetişebilecek birinci ve ikinci dereceden iyon yoktur. Son olarak $z=3.8$ cm deki $Xe^+(3V_d)$ ile $z=4.47$ ve 5.3 cm de ortaya çıkan $Xe^{+4}(V_d/4)$ ve $z=5.3$ cm den gelen $Xe^{+3}(V_d/3)$ iyonları farklı yük değişimi reaksiyonlarına girerek sırasıyla, $Xe^{+3}(V_d/3)$ ve $Xe^{+2}(V_d/2)$ iyonlarını üretir. Ayrıca hedef potansiyele sahip $3V_d/2$ potansiyelli Xe^{+2} iyonu her iki reaksiyonda da ortaya çıkmaktadır.

$z=7$ cm de, $z=3.4$ ve 6 cm den gelen $Xe^{+2}(2V_d)$ iyonu $z=5.3$, 6 ve 6.7 cm lerde ortaya çıkan $Xe^{+2}(V_d/2)$ ile farklı yük değişimi reaksiyonlarına girerek hedef potansiyele ($4V_d/3$) sahip Xe^{+3} iyonunun yanısıra sırasıyla, $Xe^{+2}(V_d/2)$, $Xe^{+3}(V_d/3)$ ve $Xe^+(V_d)$ iyonlarını üretir. Aynı noktada 6 cm den gelen $Xe^{+2}(2V_d)$ ve $z=4.47$ cm den gelen $Xe^+(4V_d)$ iyonlarının yük değişimi reaksiyonları sonucu $4V_d/3$ potansiyele sahip iyon elde edilebilir. $Xe^{+2}(2V_d)$ iyonunun, $z=3.8$ ve 5.3 cm lerde üretilen $Xe^+(3V_d)$ ve $z=4.47$ cm de üretilen $Xe^+(4V_d)$ iyonlarına bir elektron vererek onları yüksüzleştirirken, her iki

reaksiyonun sonucundan da $4V_d/3$ potansiyele sahip Xe^{+3} iyonu çıkar. $z=7$ cm deki son etkileşim ise, $z=4.47$ cm den gelen $Xe^+(4V_d)$ iyonunu, $z=5.3, 6$ ve 6.7 cm lerden gelen $Xe^{+3}(V_d/3)$; $z=5.3, 6$ cm den gelen $Xe^+(V_d/4)$; $z=6$ cm den gelen $Xe^{+2}(2V_d)$ ve son olarak $z=6.7$ cm den gelen $Xe^{+2}(3V_d/29)$ iyonlarıyla farklı yük değişimi reaksiyonlarına girmesi sonucu iki elektron vererek $4V_d/3$ potansiyelli Xe^{+3} iyonuna dönüşürken, sırasıyla $Xe^+(V_d)$, $Xe^{+2}(V_d/2)$ iyonları ve iki tane Xe atomu çıkar.

Sonuç ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında 5 numaralı referanstaki sorguç modeli 10 numaralı referanstaki ayırt edici iz mantığıyla birleştirilerek sorguç yüzeyi üzerindeki yük değişimi reaksiyonlarının ve bu reaksiyonların konumlarının belirlenmesini amaçlayan bir geometrik model oluşturulmuştur. Bu model sorgucun yapısını ve sorguçta motorun verimliliğinin azalmasına neden olan yük değişimi reaksiyonlarını açıklamak ve aralarında ilişkiyi ortaya koymak üzere yapılmıştır. Sorguçtaki hörgüç yapısının yük değişimi reaksiyonlarından kaynaklandığı görülmüştür. Bu model ayrıca geçmiş deney ve simulasyonlar çalışmaları ile uyumlu olup deney sonuçlarını desteklemektedir. Bu çalışmada yük değişimi reaksiyonları ile ilişkisi ortaya konan hörgüç yapısı, çıkışın 3 cm ilerisinde ortaya çıkmıştır. Deneylerde bu yapı üzerinde çok yakın mesafede ölçüm yapılamadığından dolayı fazla durulmamıştır. Yapılan bu çalışmada oluşumunda yük değişimi reaksiyonlarının oynadığı rol ortaya konulmuştur. Bu nedenle yük değişimi reaksiyonlarının incelenmesi ve bunu hörgüç yapısına etkisini çalışmak önemlidir.

GULCZINSKI III (2001)' de yaptıkları çalışmada hörgücün 3.3 cm civarında ortaya çıktığı belirtilmiştir.. Bu çalışmada da benzer şekilde çıkışın 3 cm ilerisinde ilk yük değişimi reaksiyonuyla başladığı tespit edilmiştir.

L. KING ve A. D. GALLIMORE (1998) de yaptıkları çalışmada hörgücün, potansiyeli hızlandırıcı potansiyelden büyük iyonlardan oluştuğu

gözlemlenmiştir. 6. bölümündeki 6.2 numaralı şekilde ve tablo 2' de sunulduğu üzere yapılan bu çalışmada benzer sonuçlar gözlemlenmektedir.

L. KING ve A. D. GALLIMORE (1999) da sorguçta oluşan $4Vd/3$ potansiyele sahip yük değişimi iyonu 10 cm de gözlemlenmiştir. Yapılan bu modelde, $4Vd/3$ potansiyele sahip parçacığın $Xe+3$ iyonu olduğu ve bu iyonun hangi reaksiyon sonucu hangi uzaklıklarda ortaya çıktığı (tablo 2) tespit edilmiştir. Bu yönden bu çalışma geçmiş deneylerin sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.

İleride yapılacak çalışmalarda bu çalışmada incelenmeyen yüksüz-iyon arasındaki yük değişimi reaksiyonları incelenebilir. Bu reaksiyonların hörgüç yapısı üzerinde bir etkisi olup olmadığı araştırma konusu edinilebilir. Ayrıca yük değişimi reaksiyonlarında, aynı reaksiyonların farklı noktalarda neden farklı sayıda elektron alışverişi yaptığı da açıklanması gereken bir durumdur.

KAYNAKÇA

¹ URL-1 : <http://www.daviddarling.info/encyclopedia/E/electricprop.html> ,
The Encyclopedia of Science- History of Electric Space Propulsion, (Ocak
2012' de bakıldı)

² URL-2 : http://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect , Wikipedia internet sitesi,
Hall etkisi, (Ocak 2012' de bakıldı)

³ Alexandre FRIDMAN, Plasma Chemistry, Cambridge Üniversitesi
Yayımları, New York 2008

⁴L. GARIGUES, I.D. BOYD, J. P. BOEUF, “*Computation of Hall thruster
Performance, Journal of Propulsion and Power*”, Sayı. 17, No. 4, Temmuz-
Ağustos 2001

⁵A. YILMAZ, “*Semi-Onion Model for Hall Thruster's Plume*” , 47th
AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit , AIAA-
2011-6078, San Diego, Ağustos 2011

⁶S.A. MAIOROV, “*Influence of the ion collisions on the interaction between
dust grains and drag force*” , 33. EPS Conference on Plasma Phys. 19 - 23
Haziran 2006, ECA Sayı.30I, P-4.035

⁷ Ayşegül YILMAZ, “*Hall itme motorunun indüklendiği sorguç plazmasının
yapısı ve uzay aracı ile etkileşimi*” , TÜBİTAK MAG Projesi, proje no:
104M321, Mayıs 2008

⁸Jason D. Sommerville, Lyon King, Yu-Hui Chiu, rainer A. Dressler, “*Ion
collision emission excitation cross-section for Xenon electric thruster
plasmas*”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 24 No.4, Temmuz-Ağustos
2008

⁹Daniel BROWN, Alec D. GALLIMORE, “*Evaluation of Plume Divergence and Facility Effects on Far-Field Faraday Probe Current Density Profiles*”, 31. International Electric Propulsion Conference, University of Michigan, USA, 20 – 24 Eylül 2009

¹⁰Lyon B. KING, Alec D. GALLIMORE, “*Identifying charge-exchange collision products within the ion-energy distribution of electrostatically accelerated plasmas*”, Physics of Plasmas Sayı 6, No 7 Temmuz 1999

¹¹F. S. Gulczinski III, R. R. Hofer and A. D. Gallimore, “*Near field ion energy and species measurements of a 5 KW laboratory Hall Thruster*”, Journal of Propulsion and Power Sayı. 17, no.2, sayfa. 418-427, Nisan 2001

¹²Lyon B. KING, Alec D. GALLIMORE, “*Ion Energy Diagnostics in the Plume of an SPT-100 from Thrust Axis to Backflow Region*”, Journal of Propulsion and Power , Sayı. 20, No. 2, Mart-Nisan 2004