

Elektrik İtki Sistemlerinde Elektron Kaynağı Olarak Kullanılmak Üzere Üretilen Oyuk Katodun Tasarım Süreci

Oğuz Korkmaz*, Ali Enes Öztürk† ve Murat Çelik‡
Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

İyon ve Hall etki iticilerinde vazgeçilmez bir cihaz olan oyuk katotlar 50 yılı aşkın bir süredir araştırılmaktadır. Yayıcı, orifis ve koruyucu olarak üç ana kısımdan oluşan ve termiyonik emisyon olarak anılan fiziksel bir prensibe göre çalışan oyuk katotlar, iyon motoru ya da Hall etki iticilerinin nötr yakıt atomlarının iyonlaştırılması ve çıkışta oluşan iyon demetinin nütürleştirilmesi için ihtiyaç duyduğu elektron akımını sağlarlar. Oyuk katotlar, elektrik itki sistemlerinin dışında, lazerler, plazma üreteçleri ve malzeme işleme gibi bir çok değişik uygulama alanlarında da kendilerine yer bulmaktadırlar. Buna ek olarak oyuk katotlar, boyutlarının küçük olması sayesinde, gelecekte mikro ve nano uydularda kendi başına itki sistemi olarak kullanılması mümkün olabilecek sistemlerdir. Termiyonik emisyon, en basit anlatımı ile, yayıcı bir malzemedan elektron salımıdır. Termiyonik emisyonun başlayabilmesi için yayıcı malzemenin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması gereklidir. Oyuk katotlarda kullanılan emisyon malzemelerinin özelliklerinin bu cihazın enerji tüketimi, ömrü ve tasarımı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, oyuk katotlarda kullanılacak olan yayıcı malzeme tercihi büyük bir dikkatle yapılmalıdır. Bu çalışmada oyuk katotlarda kullanılan yayıcı malzemelerin çeşitleri, özellikleri ve kullanılırken dikkat edilmesi gereken hususlar konusunda yapılan literatür araştırmasının kapsamlı bir özeti paylaşılmıştır. Öte yandan oyuk katotların ilk çalıştırma esnasında yayıcı malzemenin belirli bir sıcaklığa ulaştırılması ihtiyacı bu cihazın hızlı bir şekilde operasyonel hale gelmesini engellemektedir. Bu sebeple oyuk katotda kullanılan ısıtıcının tasarımı ve ısıtma performansı da oldukça önemlidir. Bu çalışmada literatürdeki değişik ısıtıcı tasarımlarının katı modelleri oluşturularak ilk çalıştırma esnasındaki performansları COMSOL Multiphysics sonlu elemanlar programı kullanılarak değerlendirilmiş ve sonuçları paylaşılmıştır. Ayrıca yapılan tüm bu literatür araştırmaları ve analizlerin sonuçlarından edinilen bilgilerin ışığında, Boğaziçi Üniversitesi Uzay Teknolojileri Laboratuvarı'nda (Bogazici University Space Technologies Laboratory - BUSTLab) tasarımı yapılan ve testleri gerçekleştirilecek olan oyuk katodun tasarım aşamaları bu konuda çalışan araştırmacıların dikkatlerine sunulmuştur.

*Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: oguz.korkmaz1@boun.edu.tr

†Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: ali.ozturk1@boun.edu.tr

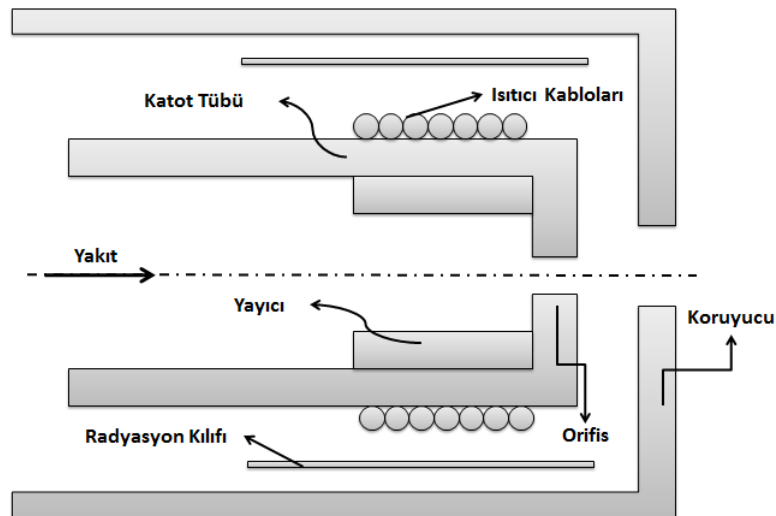
‡Yrd. Doç. Dr., Makine Müh. Böl., E-posta: murat.celik@boun.edu.tr

GİRİŞ

Uyduların uzaydaki hareketlerinde kullanılan iyon motoru ve Hall etki iticilerinde, plazma üreteçlerinde ve iyon kaynaklarında elektron kaynağı olarak kullanılan oyuk katotlar 50 yılı aşkın bir süredir araştırılmaktadır. Çalışma prensibi termiyonik emisyon olarak isimlendirilen fiziksel bir prensibe dayanan oyuk katotlar yayıcı, orifis ve koruyucu olarak üç ana bölümden oluşur (Şekil 1). En basit anlatımı ile termiyonik emisyon, bir malzemenin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında çevresine elektron yaymaya başlamasıdır. Yayıcı malzemesinden termiyonik emisyon ile elektron salımının başlayabilmesi için malzemenin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmektedir. Bu nedenle oyuk katot tasarımına, yayıcı malzemenin olduğu bölgeye, katot tübünün dışına sarılan ısıtıcı kabloları eklenmiştir. Yüksek elektriksel dirence sahip ısıtıcı kablolarının üzerinden elektrik akımı geçirilerek yayıcı malzemenin ısıtılması sağlanır.

Elektriksel itki sistemlerinde kullanılan oyuk katotlar, içine yayıcı malzemenin yerleştirildiği, ince, uzun, oyuk bir silindirik tüpten oluşur. Orifis katot tübünün ucuna kaynak ile birleştirilmiş refrakter bir malzemedir. Orifis yüksek iç basınçın, $10^3 - 10^4$ Pa, sağlanması görevini üstlenir. Oyuk katot orifis tasarımları A, B ve C tipi olmak üzere üç ana gruba ayrılır. A tipi katotda orifisin uzunluğu çapına göre büyüktür. Bu sebeple orifisten yayıcıya doğru olan ısı iletimi önemli bir ısınma mekanizmasıdır. B tipi katotlarda orifis çapı uzunluktan büyüktür ve bu sebeple iç basınç düşük değerdedir. C tipi katotlarda ise orifis bulunmaz. Bu tip katotlarda iç basınç oldukça düşüktür. C tipi katotlarda plazmadan gelerek yüzeyde nütürleşen iyonlar önemli bir ısınma mekanizması oluştururlar [Goebel ve Katz, 2008].

Tipik bir oyuk katodun diğer bir bileşeni de, katot tüpünün etrafına yerleştirilen, silindirik koruyucu tüptür. Koruyucu tüpün asıl görevi yayıcıdan salınan elektronları hızlandıracak bir voltaj farkı yaratmaktır. Bu potansiyel fark sayesinde elektronlar, çevredeki nötr gaz atomları ile çarpışıp iyonlaşmaya neden olmaları için gerekli olan momentumu kazanabilirler. İlk çalıştırma esnasında katot tübünün ucundan sisteme verilen nötr gaz atomları, yayıcı bölgesine ulaştıklarında, yayıcıdan termiyonik emisyonla salınan elektronlarla çarpışarak iyonlaşırlar. Bu sayede yayıcı bölgesinde yoğun bir plazma ortamı yaratılmış olur. Sistem kararlı rejime ulaştıktan sonra yayıcı plazmasından gelerek yayıcı yüzeyine çarpan iyon ve elektronlar enerjilerini yayıcı malzemesine aktararak kendi kendine ısınma mekanizması yaratırlar. Bu noktadan sonra harici ısıtıcı kapatılır. Koruyucu tüpünün diğer bir görevi de oyuk katodun çevresindeki plazmalardan (iyon iticisi iyonlaşma odası plazması ya da çıkıştaki iyon demeti vb.) gelen iyon bombardımanının neden olabileceği zarara karşı katodu korumaktır.



Şekil 1: Oyuk katodun şematik gösterimi

Bu çalışmada Boğaziçi Üniversitesi Uzay Teknolojileri Laboratuvarı'nda (BUSTLab) tasarımı yapılmış ve yakın zamanda testleri gerçekleştirilecek olan bir oyuk katodun tasarım süreçleri hakkında bilgiler verilmiştir. Oyuk katot için termiyonik emisyon malzemesi seçimi, ısıtıcı tasarımları ve analizleri, genel olarak tüm sistemin katı modelleme süreci, prototip imalatı, nihayetinde oyuk katodun üretimi ve yapılması planlanan testler hakkında ayrıntılı bilgiler ilgililerin dikkatlerine sunulmuştur.

Termiyonik Emisyon Malzemeleri

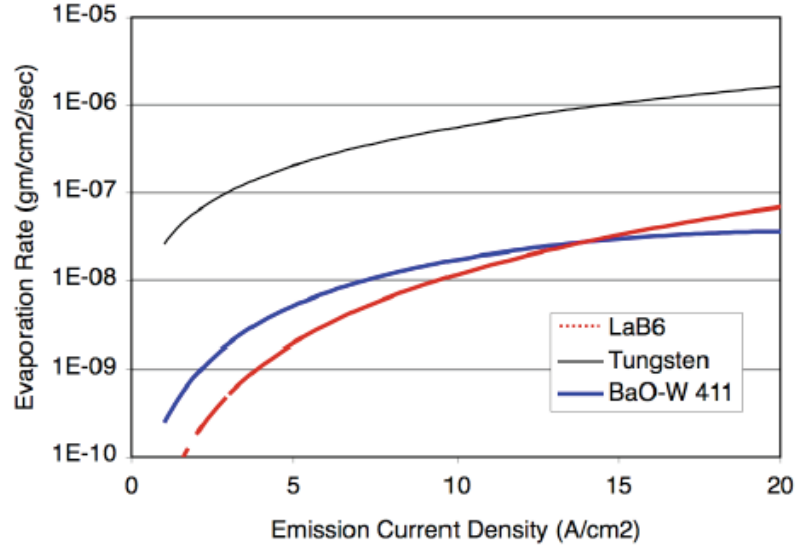
Termiyonik yayıcı malzemesinden elektron yayılımının kolay olup olmaması katodun çalışma parametreleri ve enerji tüketimi üzerinde oldukça etkilidir. Bu sebeple yayıcı malzemenin seçiminde büyük bir hassasiyet gösterilmesi gerekmektedir. Yayıcı malzemenin seçiminde iş fonksiyonu, evaporasyon oranı ve impüritelere karşı dayanımı dikkat edilmesi gerekli parametrelerdir. Literatürde en sık kullanılan oyuk katot malzemeleri baryum oksit yedirilmiş tungsten ($BaO - W$), lantan heksaborür (LaB_6) ya da seryum heksaborürdür (CeB_6) [Warner, 2008].

Baryum oksit (BaO) malzemesi termiyonik yayıcı malzeme olarak kullanılabilir. Oksit katotları ya da yayıcı katotlar olarak da bilinen bu malzemenin iş fonksiyonu 2 eV'un altındadır ve yüksek akım yoğunlukları verebilir. Yayıcı katotlar da kendi içerisinde rezervuar boşluğu yayıcı katotları ve yedirilmiş yayıcı katotları olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar ve L katot, MK katot, CPD katot, B katot gibi bir çok çeşidi bulunmaktadır. İtici sistemlerinde yaygın olarak kullanılan katot Philips S tipi katottur. Bu yayıcı malzeme tungsten matrix içine yerleştirilmiş baryum, kalsiyum oksit ve alumina karışımından oluşmaktadır. Örnek olarak bir iyon iticisinde çoğunlukla 4:1:1 ($4BaO : 1CaO : 1Al_2O_3$) yayıcı malzemesi kullanılmaktadır. 4:1:1 malzemesinin 800 °C'e sıcaklıktaki iş fonksiyonu 2.06 eV civarındadır [Cronin, 1981]. ($BaO - W$) yayıcılarının en önemli dezavantajı safsızlık zehirlenmelerine yatkın olmalarıdır. Bu malzeme, kullanılan yakıtta bulunan impüritelere kolaylıkla etkilenir ve bunun sonucunda iş fonksiyonu hızla artar hatta elektron emisyonu durur. Bu nedenle, $BaO-W$ yayıcısının kullanıldığı oyuk katotlarda uzun çalışma ömrünün garantilenmesi için yüksek saflıkta yakıt kullanılması gerekmektedir. Yüksek saflıkta (%99.99) yakıt kullanılması gerekliliği bir yakıt saflaştırma ünitesinin de bulunmasını zorunlu kılmakta ve bu da her bir uzay taşıtı için 0.5-1 milyon dolar civarında ek bir finansal yükü beraberinde getirmektedir [Goebel ve Katz, 2008].

LaB_6 yayıcı malzemesi yüksek akım yoğunlu verebilmektedir. Ayrıca bu malzemenin evaporasyon oranı $BaO - W$ malzemesine kıyasla daha düşüktür ve yakıt içindeki impüritelere etkilenmemektedir (Şekil 2). LaB_6 yayıcısının iş fonksiyonu 2.67 eV civarındadır. LaB_6 1650 °C'de 10 A/cm² akım yoğunluğu verebilmektedir. LaB_6 yayıcı malzemesinin iş fonksiyonunun, yüzeyi saf olmayan bir ortama maruz kalsa dahi, değişmediği görülmüştür. LaB_6 1950 yılında Lafferty [Lafferty, 1951] tarafından bulunmuş ve ilerleyen yıllarda bir çok bilim adamı tarafından [Jacobson ve Storms 1978], [Storms ve Muller, 1979] araştırılmıştır ve 1970 yılından bu yana oyuk katotlarda yayıcı malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Lantan heksaborür bileşikler üç grup altında sınıflandırılabilir LaB_4 , LaB_6 , LaB_9 . LaB_6 mor, LaB_4 gri, LaB_9 mavi yüzey rengine sahiptir. Lantan heksaborür (Şekil 3) tungsten gibi refrakter metallerle reaksiyon vermektedir. Özellikle molibden LaB_6 ile reaksiyon vermektedir. LaB_6 'den gelen boron atomları refrakter malzemeye doğru difüze olup metal matrisi içerisinde ara boron bileşikler oluşturur. Boronun refrakter malzemeye difüzyonu, malzemenin gevrekleşmesine neden olarak yüksek sıcaklıklarda kırılmaları neden olabilmektedir. Bu sebeple LaB_6 boron difüzyonunu engelleyecek bir malzeme ile desteklenmesi gerekmektedir [Lafferty, 1951]. Bu durumun önüne geçebilmek için LaB_6 genellikle karbon, tantal karbür ya da renyum ile desteklenmelidir.

Renyum kapalı paket heksagonal kafes yapısına sahip olması nedeniyle boron atomlarının difüzyon olarak kafes yapının arasına girmesine müsaade etmemektedir. Ayrıca yüksek erime noktasına



Şekil 2: Çeşitli yayıcı malzemelerin evaporasyon oranları [Goebel ve Chu, 2011]

sahiptir (3180 °C). Bu sebeplerden ötürü renyum LaB_6 için uygun bir destek malzemesidir [Goebel, Hirooka ve Sketchley, 1985].

Grafit de LaB_6 için uygun bir destek malzemesi olarak kullanılabilir. Grafit, boron difüzyonu problemini tamamen ortadan kaldırmaktadır. Ayrıca yüksek erime sıcaklığı, LaB_6 ile benzer termal genişleme katsayısına sahip olması sayesinde uygun bir destek malzemesi olarak öne çıkmaktadır [Goebel ve Watkins, 2010], [Goebel, Watkins ve Jameson, 2010], [Goebel, Hirooka ve Sketchley, 1985].



Şekil 3: Lantan hekzaborür tüp

Isıtıcı Çeşitleri ve Analizleri

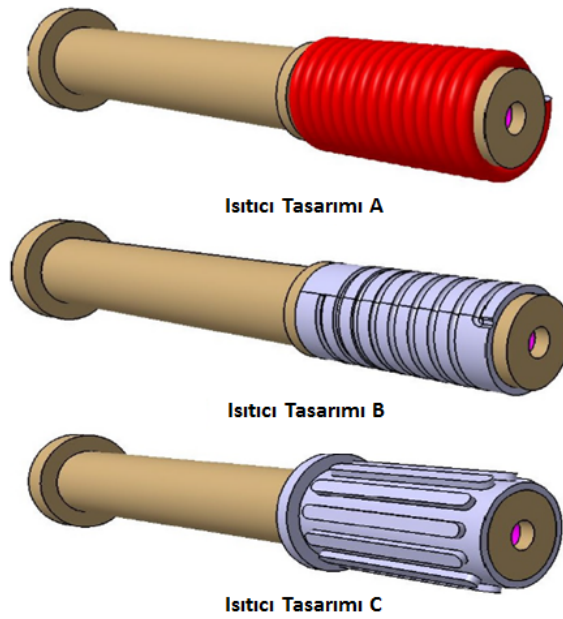
Oyuk katodun ilk çalıştırılması esnasında yayıcı malzemeden termiyonik emisyonla istenen düzeyde elektron emisyonunun başlayabilmesi için yayıcının belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması gerekmektedir. Hızlı ısıtma ve soğutma oyuk katot tasarımında kırılmaya neden olabileceği için bu ısıtma işleminin kademeli olarak yapılması gerekmektedir. Özellikle LaB_6 yayıcı malzemesinin hızlı ısınma ve soğuma durumunda kırıldığı bilinmektedir [Goebel, Crow ve Forrester 2008]. Bu kademeli ısıtma süreci katodun hızlı bir şekilde operasyonel hale gelmesini engellemektedir. Bu sebeple oyuk katodun mümkün olan en kısa sürede gerekli sıcaklıklara kadar ısıtılması için kullanılan ısıtıcının tasarımı önem taşımaktadır.

Oyuk katotlarda çoğunlukla kullanılan ısıtıcı tungsten ya da tantal gibi yüksek sıcaklıklara dayanabilen rezistif malzemelerin katot tübü üzerine sarılması ile yapılır. Bu tasarımda kullanılan ısıtıcı kablolarının alumina gibi yalıtkan ve yüksek sıcaklığa dayanabilen bir malzeme ile yalıtılmış

olması kısa devre oluşumunun engellenmesi için zorunludur. Bu ısıtıcı türü oyuk katotlarda en sık görülen geleneksel bir ısıtıcı türüdür.

Yalıtılmış ısıtıcı kablolarının sarımı dışında diğer bir ısıtıcı tasarımı da seramik tübün üzerine açılan radyal oyuklara ısıtıcı kabloların yerleştirilmesidir. Ayrıca tüm ısıtıcının üzerine bir kılıf geçirilerek kabloların düzgün bir şekilde durması sağlanır. Bu tasarım, ısıtıcı ile katot tübü arasında daha iyi bir yüzey teması sağlanabilmesi için geliştirilmiştir [Courtney, 2008].

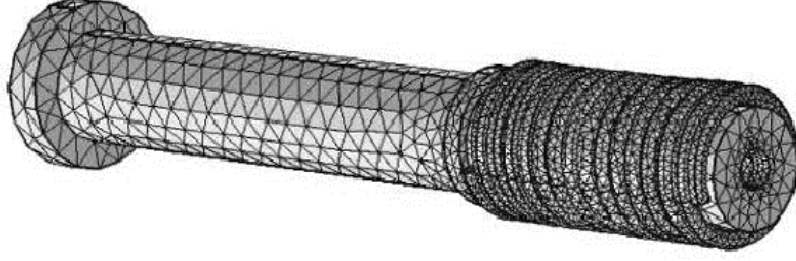
Literatürdeki diğer bir ısıtıcı tasarımı da Michigan Üniversitesi'nde yapılmıştır. Bu tasarımda seramik üzerinde radyal oyuklar yerine aksel çıkıntılar kullanılmıştır. Bu çıkıntıların etrafına ısıtıcı kabloları sarılarak ve ardından üzerine kılıf geçirilerek kabloların yerine sabitlenmesi sağlanır [Trent, McDonald, Lobbia ve Gallimore 2011].



Şekil 4: Değişik ısıtıcı tasarımlarının katı modelleri

Oyuk katodun tasarım aşamaları esnasında bu üç ısıtıcı tasarımının katı modeli oluşturularak katodun ilk çalıştırılması esnasında ısıtma performansları değerlendirilmiştir (Şekil 4). Yapılan ısıl analizlerde sonlu elemanlar esasına dayanarak çalışan ticari bir yazılım olan COMSOL kullanılmıştır. Gerekli olan malzeme özellikleri COMSOL'a girilerek ısıl analizler için tetrahedral ağ yaratılmıştır (Şekil 5). Gerçekleştirilen analizde, ısıtıcıdan gelen 107 W'lık ısı kazancı, ksenon gaz akışı nedeniyle olan konvektif ısı kaybı, katot tabanına olan ısı iletimi ve genel olarak katodun tümünden olan radyasyonla ısı kaybı dikkate alınmıştır. Bu cihaz vakum ortamında çalışacağı ve test edileceği için yapılan analizde çevre ile konvektif ısı kayıpları dikkate alınmamıştır. Yayıcı malzeme üzerinde, orifisin hemen yanında, bir nokta seçilerek bu noktanın farklı ısıtıcı dizaynlarında 1600 °C'e (1873 K) ne kadar sürede ulaştığı incelenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi radyasyonla olan ısı kaybını azaltmak için oyuk katot tasarımında bir radyasyon kılıfı bulunmaktadır. Yapılan analizlerde bu radyasyon kılıfına olan ışınlam ve bu radyasyon kılıfından etrafa olan ısıl kayıplar da modellenmiştir.

Yapılan analiz sonucunda B ve C ısıtıcı tasarımlarının benzer ısıl dağılım gösterdiği ve bu dizaynların A dizaynına göre ısıyı yayıcı üzerinde daha düzgün dağıttığı görülmüştür. Katot dizaynlarının 1600 °C'e ulaşma zaman adımları (time step) sırasıyla 405, 809 ve 898 olmuştur. Bu sonuca göre A dizaynı, ısıyı yayıcı üzerine diğer dizaynlara kıyasla düzgün dağıtamamasına rağmen, istenilen sıcaklığa en hızlı ulaşan dizayn olduğu görülmüştür. Söz konusu katot ısıtıcı tasarımları üretilerek Boğaziçi Üniversitesi Uzay Sistemleri Laboratuvarında testleri gerçekleştirilerek COMSOL analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması planlanmaktadır [Öztürk, Korkmaz ve Çelik, 2014].



Şekil 5: Dizayn A için COMSOL'da yaratılan tetrahedral ağ örgüsü

BUSTLab Oyuk Katot Tasarımı

Termiyonik emisyon malzemeleri üzerine yapılan geniş literatür araştırması ve değişik ısıtıcı türlerinin analizleri ışığında prototip bir oyuk katot üretimi yapılmasına karar verilmiştir. Pirinçten üretilen ilk prototipde elektriksel bağlantılar, termokupl yerleşimleri kararlaştırılmış ve dizayn hataları giderilerek gerçek katodun tasarımı ve üretimi süreçlerine geçilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6: Pirinçten üretilmiş oyuk katot prototipi

Bir oyuk katot genel olarak yayıcı, katot tüpü, ısıtıcı, koruyucu tüp, yay, taban parçaları ve diğer parçalardan (civata, tel vb) oluşur. Oyuk katot tasarımı en içteki parçadan başlayıp, daha dışarıda bulunan parçalar tasarlanarak ilerler. Oyuk katodun oldukça yüksek sıcaklıklarda çalışması nedeniyle malzemelerin uyumlu olmaları oldukça önemlidir. Özellikle tasarımda kullanılan malzemelerin ısıl genleşme katsayılarının birbirine yakın olması, yüksek erime noktasına sahip olmaları, birbirleri ile kimyasal reaksiyon vermemeleri oyuk katot tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlardır. Oyuk katot tasarımının merkezinde yayıcı bulunur. Düşük evaporasyon oranı ve yakıt içerisindeki impüritelerden etkilenmemesi sebebiyle, BUSTLab oyuk katodunda kullanılacak yayıcı malzemesinin LaB_6 olması kararlaştırılmıştır. Oyuk katotta kullanılacak yayıcı malzemesine karar verildikten sonra, istenilen akım yoğunluğuna bağlı olarak yayıcının ölçüleri belirlenmiştir. BUSTLab'da tasarlanan katodun $8 A/cm^2$ akım yoğunluğunu verebilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, BUSTLab katodunda yayıcı olarak kullanılacak LaB_6 malzemesinin iç çapının 2 mm, dış çapının 4 mm ve uzunluğunun 10 mm olması uygun görülmüştür.

Yayıcı malzemesinden sonra katot tüpünün tasarımına geçilmiştir. Termiyonik emisyon sırasında oluşan ısının büyük bir kısmı katot tüpü üzerinden katot tabanına ısı transferi ile kaybolur. Eğer bu transfer az olursa katodun orifis bölgesi aşırı ısınma sonucu eriyebilir ve katot çalışamaz hale gelir. Isı transferi gereğinden fazla olması durumunda ise yayıcının sıcaklığı istenen akım yoğunluğunun sağlanması için gerekli olan değerde tutulamaz ve katottan istenen akım değeri

alınmaz ya da katodun çalışması tamamen durur. Katot tüpünün tasarımında yayıcı sıcaklığını sabit tutabilecek optimum tasarım yapılması gereklidir. Isı transferi düşünülerek katodun çapı, uzunluğu ve et kalınlığı tasarlanır. Katot tübünün tasarımından sonra yayıcı malzemesinin beraber çalışacağı destek malzemesine karar verilmiştir. POCO grafitin LaB_6 ile reaksiyon vermemesi ve ona yakın ısı özelliklerine sahip olması nedeniyle destek malzemesi olarak seçilmiştir.

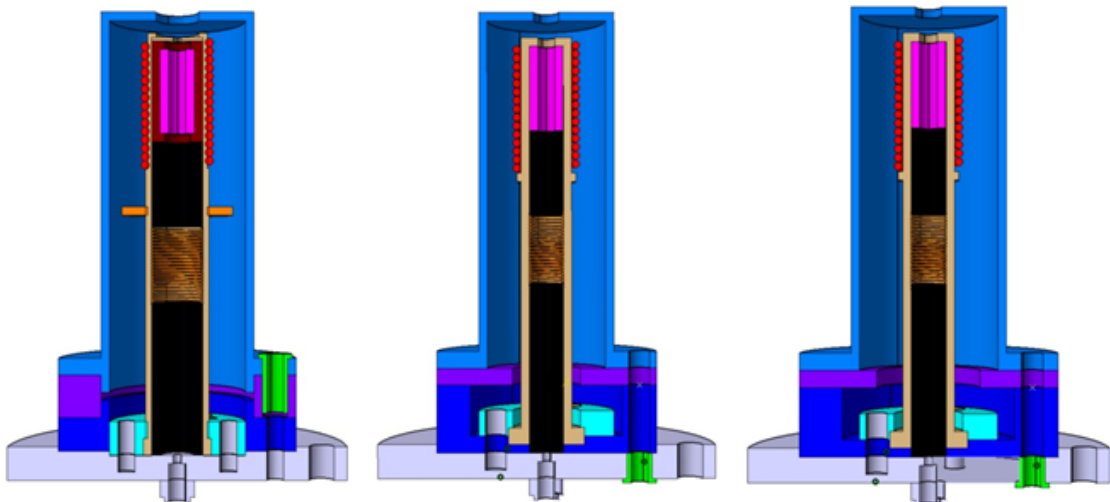
Katod tüpünün üretimi için literatürde çoğunlukla kullanılan malzemeler molibden ve POCO grafitir. Daha önce de belirtildiği gibi oyuk katot yüksek sıcaklıklarda çalışmaktadır. Oyuk katodun tasarımında kullanılan malzemelerinin benzer ısı genleşme katsayılarına sahip olmaları, sistemin uyumlu çalışabilmesi adına büyük bir önem taşımaktadır. Katod tübünün, yayıcı ve destek parçası ile uyum göstermesi için, POCO grafitten yapılmasına karar verilmiştir.

Yayıcı malzemesinin katod tübü içerisindeki pozisyonunun sabit kalması için, destek parçasının bir yay ile sıkıştırılması gerekmektedir. Yaylar, yüksek sıcaklığa dayanabilmesi için, genellikle tungsten veya tantaldan üretilir. Isıtıcı da kullanılmak için alınan tantal kabloları yayın üretimi için de kullanılmasına karar verilmiştir.

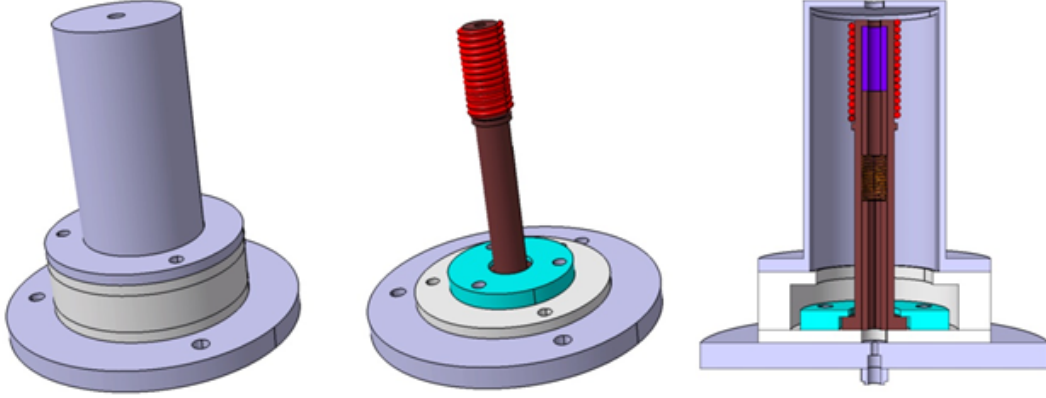
Daha önce de bahsedildiği üzere literatürde 3 farklı ısıtıcı modeli bulunmaktadır. Kolay işlenebilirliği ve vakum ortamında 3000 K den fazla erime sıcaklığına sahip olması nedeniyle B ve C ısıtıcı tasarımlarının boron nitrattan üretilmesine karar verilmiştir.

Katod tüpü, taban parçalarının üzerine sabitlenir. Taban parçalarından beklenen özellikler yalıtkan olması ve ısı iletimi katsayısının düşük olmasıdır. Taban parçalarının üretiminde seramik malzeme kullanılması kararlaştırılmıştır. Koruyucu tüpünün belirli bir gerilimde tutulması gerektiğinden taban için seçilen malzemenin yanı sıra montajda kullanılacak civataların da yalıtkan olması elzemdir.

Öncelikle [Goebel, Watkins ve Jameson, 2010], [Warner, 2008] ve [Courtney, 2008] çalışmalarından yararlanılarak tasarım çalışmaları yapılmıştır. Daha sonra bu çalışmalara bağlı olarak, oyuk katodun bileşenlerinin tasarım ve malzeme seçimleri yapılmıştır. İlk tasarım üniversite atölyesinde yayıcı ve yay hariç pirinç malzemedan birebir ölçülerde prototip olarak üretilmiştir (Şekil 8). Bu prototip önemli bir tecrübe olmuş ve tasarım hatalarının farkedilmesini sağlamıştır. Bundan sonraki süreçte tasarım hataları aşamalı olarak giderilmiştir. İlk aşamada molibdenden yapılması düşünülen katod tübünün POCO grafitten yapılmasına karar verilmiştir. Bu ayrıca katod tübünün tasarımında değişikliklere neden olmuştur. Civata ve kablo bağlantılarının daha rahat yapılabilmesi için taban parçaları genişletilmiştir. Son olarak katod parçalarının montajının daha kolay bir şekilde yapılabilmesi amacıyla katod taban tasarımı yenilenmiştir (Şekil 9).



Şekil 8: Oyuk katod tasarımının zamanla gelişimi



Şekil 9: : Prototip oyuk katot ünitesinin Mart-2014 ayı itibari ile son tasarım şeması

SONUÇ

Bu çalışmada bir çok uygulamada elektron kaynağı olarak kullanılan termiyonik oyuk katotlarda bulunan yayıcı malzemelere genel bir bakış yapılmıştır. Yayıcı malzemelerin kullanılması esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar paylaşılarak, birbirlerine göre üstünlük ve dezavantajlarından söz edilmiştir. Buna ek olarak Boğaziçi Üniversitesi Uzay Sistemleri Laboratuvarında testi yapılacak olan bir oyuk katodun tasarım ve analiz süreçleri hakkında bilgiler verilmiştir.

BUSTLab'da tasarlanan ve testleri yapılacak olan oyuk katot elektron kaynağında yayıcı malzeme olarak LaB_6 malzemesi tercih edilmiştir. LaB_6 yayıcısının tercih sebebi, söz konusu malzemenin yakıt içinde bulunabilecek impüritelerden etkilenmemesi ve evaporasyon oranının düşük olmasıdır. Evaporasyon oranı yayıcı ömrünü, dolayısıyla katot ömrünü, direkt olarak etkileyen bir parametre olması nedeniyle düşük evaporasyon oranına sahip malzemelerin tercihi oldukça önemlidir. LaB_6 bileşiğinin bir çok refrakter malzeme ile reaksiyon vererek sistemin çalışmasını tehlikeye düşürmesi, bu malzemeyi yerinde tutmak için kullanılacak destek malzemesinin de dikkatle seçilmesini zorunlu kılmaktadır. LaB_6 'ın POCO grafit ile reaksiyon vermemesi ve POCO grafit ile benzer ısıl özelliklere sahip olması nedeniyle, POCO grafit destek malzemesi olarak tercih edilmiştir. POCO grafit, benzer sebeplerden ötürü, yalnızca destek için değil ayrıca katot tübü ve koruyucu tüp olarak da tercih edilmiştir.

Oyuk katot tasarımının önemli bileşenlerinden birisi de ısıtıcı tasarımıdır. Literatürdeki 3 değişik ısıtıcı tasarımlarının 3 boyutlu katı tasarımları yapılarak, katodun ilk çalıştırılması esnasındaki, performansı COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları oyuk katotlarda kullanılan klasik ısıtıcı tasarımının (ısıtıcı tasarımı A) en hızlı ısıtıcı olduğunu göstermiştir. Isıtıcı tasarımlarının performansı deneysel olarak da ölçülerek elde edilen bulgular analiz sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır. Yapılan literatür araştırmaları ve analizlerden yararlanılarak oyuk katodun ilk tasarımı yapılmıştır. Bu ilk tasarım kullanılarak pirinç bir prototip üretilmiştir. Bu prototipten yararlanılarak oyuk katot tasarımı aşamalı olarak iyileştirilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı 112M862 ve 113M244 nolu 1001 projeleri kapsamında destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ayrıca BAP-6184 ve BAP-8960 proje numaraları altında destekleyen Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAP) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Courtney, D. G., 2008. *Development and Characterization of a Diverging Cusped Field Thruster and a Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode*, Yüksek Lisans Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, ABD
- Cronin, J. L., 1981. *Modern Dispenser Cathodes*, IEE Proceedings I (Solid-State and Electron Devices), Cilt.128, No.1, s.19-32
- Goebel, D. M. ve Chu, E., 2011. *High Current Lanthanum Hexaboride Hollow Cathodes For High Power Hall Thrusters*, 32'nci International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Almanya, IEPC-2011-053
- Goebel, D. M., Crow, J. T. ve Forrester, A. T., 2008. *Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode For Dense Plasma Production*, Review of Scientific Instruments, Cilt.49, s.469-472
- Goebel, D. M., Hirooka, Y. ve Sketchley, T., 1985. *Large Area Lanthanum Hexaboride Electron Emitter*, Review of Scientific Instruments, Cilt.56, s.1717-1722
- Goebel, D. M. ve Katz, I., 2008. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, JPL Space Science and Technology Series, s. 243-256
- Goebel, D. M. ve Watkins, R. M., 2010. *Compact Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode*, Review of Scientific Instruments, Cilt.81, No.083504
- Goebel, D. M., Watkins, R. M. ve Jameson, K., 2010. *LaB₆ Hollow Cathodes for Ion and Hall Thrusters*, Journal of Propulsion and Power, Cilt.23, s. 527-528
- Jacobson, D. L. ve Storms, E. K., 1978. *Work Function Measurement of Lanthanum-Boride Compounds*, IEEE Transactions on Plasma Science, Cilt.6, No.2, s.191-199
- Lafferty, J. M., 1951. *Boride Cathodes*, Journal of Applied Cathodes, Cilt.22, No.3
- Öztürk, A. E., Korkmaz, O. ve Çelik, M., 2014. *Design and Analysis of Different Insert Region Heaters of a Lanthanum Hexaboride Hollow Cathode During Initial Heating*, 4'üncü Space Propulsion Conference, Köln, Almanya
- Storms, E. K. ve Muller, B. A., 1979. *A Study of Surface Stoichiometry and Thermionic Emission Using LaB₆*, Journal of Applied Physics, Cilt.50, No.5, s.3691-3698
- Trent, K. R., McDonald, M. S., Lobbia, R. B. ve Gallimore, A. D., 2011. *Time-Resolved Langmuir Probing of a New Lanthanum Hexaboride (LaB₆) Hollow Cathode*, 32'nci International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, IEPC-2011-245
- Warner, D. J., 2008. *Advanced Cathodes For Next Generation Electric Propulsion Technology*, Yüksek Lisans Tezi, Air Force Institute of Technology, Dayton, OH, ABD