

E3000 PLATFORMU HABERLEŞME UYDUSU ELEKTRİKLİ İTKİ SİSTEMİ DTMA KOLU KSENON BORUSU BAĞLANTISI

Ezgi Nur SAYAR¹
Türksat A.Ş., ANKARA

Dr. Selman DEMİREL²
Türksat A.Ş., ANKARA

ÖZET

Uyduların fırlatıcıdan ayrıldıktan sonra ilgili yörüngesine transfer aşaması, operasyonel yörüngesinde konumunu koruyabilmesi ve ömürlerini tamamladıktan sonra yörüngeden ayrılabilmesi için itki sistemine ihtiyaçları vardır. Günümüzde uzay teknolojisinde kimyasal itki sisteminden elektrikli itki sistemine geçiş yapılmaktadır. Bu geçişin en temel sebebi olarak elektrikli itki sisteminin kimyasal itki sistemine göre daha az yakıtı ihtiyaç duyması ve bu sayede yakıt kütlelerinden kazanç sağlanarak uydu kütlelerinde hafifleme elde edilebilmesi veya faydalı yük için daha fazla yer kazandırılması gösterilebilir. Elektrikli itki sistemlerinde en önemli konulardan biri ise elektrikli iticilerin konumlandırılması ve bu sistemlerin tasarımıdır. Bununla ilgili uydu üreticileri tarafından farklı tasarımlar uygulanmaktadır. Genellikle iticilerin konumlandırıldığı sistemlerin hareketli olması çok büyük bir avantaj getirmektedir. Elektrikli itki sistemine ait olan üç eksenli hareket edebilen Açılabilir İtki Modülü Yapısı (DTMA) kolunun uydu servis modülü entegrasyonu mekanik bağlantı, elektriksel bağlantı ve itki sistemine yakıt iletimini sağlayan boru bağlantısı olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Bu çalışma, DTMA kolunun entegrasyon süreci olan ve servis modül üzerindeki Ksenon yakıt tankı ile DTMA kolu boyunca itki sistemine uzanan Ksenon borusunun ark kaynağı yöntemi ile bağlantısının yapılması ve dikkat edilmesi gereken noktalar hakkında bilgiler içermektedir.

Kısaltmalar

HET: Hall Effect Thruster

GIT: Grid Ion Thruster

MPD: Magneto Plasma Dynamique

PPT: Pulsed Plasma Thruster

FEEP: Field Emission Electrical Propulsion

DTMA: Deployable Thruster Module Assembly (Açılabilir İtki Modülü Yapısı)

DPS: Deployment and Pointing System (Konuşlandırma ve Yönlendirme Sistemi)

PTM: Plasma Thruster Module (Plazma İtki Modülü)

LSRU: Low Shock Release Unit (Düşük Şok Ayrılma Birimi)

MGSE: Mechanical Ground Support Equipment (Mekanik Yer Destek Ekipmanı)

GTAW: Gas Tungsten Arc Welding (Tungsten İnert Gaz)

GMAW: Gas Metal Arc Welding

PAW: Plasma Arc Welding

¹ Teknik Destek Personeli., Uydu Programları Direktörlüğü., E-posta: ensayar@turksat.com.tr

² Direktör, Uydu Programları Direktörlüğü, E-posta: sdemirel@turksat.com.tr

GİRİŞ

NASA tarafından 1990 yılının başlarında elektrikli itki sisteminin gelecekteki uzay misyonları için öncü bir teknoloji olacağı tanımlanarak elektrikli itki sistemi üzerine çalışmalar başlamıştır. [NASA,2020] Günümüzde Airbus DS firmasına ait olan E3000 platformu haberleşme uzay aracında tamamen elektrikli itki sistemi kullanılabilir. Elektrikli itki sistemi, iticiyi elektrik veya manyetik yollarla hızlandırmak için elektrik gücünü kullanmaktadır. Elektrikli itki sistemi elektro-termal, elektro-statik ve elektro-manyetik olmak üzere üç kategoriden oluşmaktadır. Elektro-termal itki sisteminde, itici elektrik enerjisi ile ısıtılır ve daha sonra termodinamik olarak genişletilir, yani gaz kimyasal rokette olduğu gibi bir nozuldan süpersonik hızlara hızlandırılır. [Sutton, Biblarz, 2010] Elektro-termal itki sisteminde günümüzde temel olarak rezisto jet ve ark jet kullanılmaktadır. Elektro-manyetik itki sisteminde elektrik enerjisi gazı iyonize etmekte ve Lorentz kuvveti sayesinde hızlandırma sağlamaktadır. MPD, PPT ve HET itki sistemleri elektro-manyetik itki sistemi kategorisinde yer almaktadır. Elektro-statik itki sisteminde ise elektrik enerjisi gazı iyonize ederek elektrik alan ile pozitif iyonları hızlandırmayı sağlamaktadır. [ESA,2019] En çok kullanılan teknolojilerden olan GIT iyonik itki sistemi ile FEED itki sistemi, elektro-statik itki sistemi kategorisine aittir. Tablo 1 elektrikli itki sistemine ait teknolojilerin genel olarak performans karşılaştırmasını göstermektedir. [Sutton, Biblarz, 2010] Bu sistemler özgül itki, ihtiyaç duyulan elektrik gücü ve itme kuvveti özelliklerine göre tercih edilmektedir. Özgül itki değerinin yüksek olması sayesinde yakıt külesinden ciddi oranda kazanç sağlanabilmektedir. İhtiyaç duyulan elektrik gücü bataryaların boyutuna ve güneş panellerine etki etmektedir. İtme kuvveti ise manevra stratejisini doğrudan etkilemektedir. İtki sistemleri seçimi bu üç özellik göz önüne alınarak yapılmaktadır.

Tablo 1-Performans Karşılaştırması

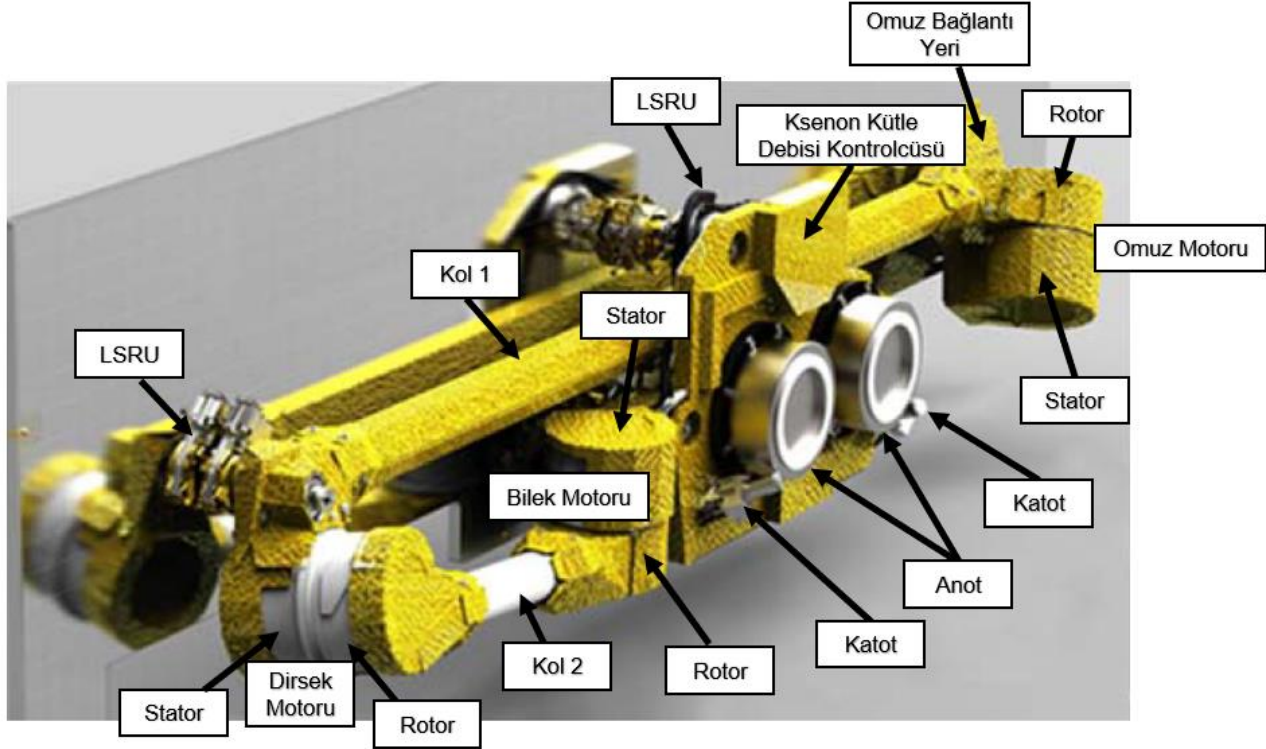
İtki Sistemi Çeşitleri	İtki (mN)	Isp (s)
Rezisto jet	200-300	200-350
Ark jet	200-1000	400-1000
PPT	0.05-10	600-2000
MPD	0.001-2000	2000-5000
GIT	0.01-500	1500-8000
HET	0.01-2000	1500-2000
FEED	<1	8000-9000

Açılabilir İtki Modülü Yapısı (DTMA) ekipmanı HET itki sistemi ile üç ekseninde yörünge yükseltme ve kuzey/güney yönünde yörüngede tutma, doğu/batı manevrası yapabilme yeteneğine sahiptir. [Sembély, Wartelski, Doubré, Deltour, Cau ve Rochard, 2017]

DTMA KOLU VE UYDU ÜZERİNE ENTEGRASYONU

DTMA, Konuşlandırma ve Yönlendirme Sistemi (DPS) ve Plazma İtki Modülü (PTM) olmak üzere iki ayrı parçadan oluşmaktadır. E3000 platformunda kullanılan DPS uydu servis modülünün Y duvarlarında konumlandırılan robotik koldur. Robotik kol fırlatma sonrasında açılmaktadır ve gerekli kinematiğe ulaşmak için motorizasyon sağlamaktadır. DPS, benzer tasarıma sahip ancak farklı uzunluklardan oluşan iki ayrı koldan, üç adet hareketi sağlayan motordan, dört adet uydu servis modülü ile bağlantısını sağlayan düşük şok ayrılma mekanizmasından (LSRU), ksenon hattından ve kablolardan oluşmaktadır. DTMA parçası olan bir diğer ekipman ise PTM olarak adlandırılan, plazma iticilerinin ve ksenon kütle debisi kontrolcüsünün yerleştirildiği yapısal plakadan oluşan sistemdir. Bu plaka, plazma iticilerini DPS kolundan yalıtarak iticiler ve akış kontrolcülerini için termal kontrol sağlamaktadır. DPS kolu içerisinde bulunan Ksenon boru hattı ve PTM itki modülü yakıt borusu hattı tamamen paslanmaz çelik materyalinden oluşmaktadır. Ksenon yakıt boru hattı DTMA kolu üzerinde bulunan üç motor bölgesinde esnek borulardan ve geri kalan kol üzerinde esnek olmayan paslanmaz çelik boru yapısından oluşmaktadır.

DTMA robotik kolunun uydu üzerine entegrasyon aşamasında ilk olarak LSRU mekanizmalarının mekanik montajı gerçekleştirilir. LSRU mekanik montajı sonrasında DTMA kolu bulunduğu yer destek ekipmanından (MGSE) ayrılarak 0g etkisi sağlayacak olan helyum balonları ve kaldırma kirişi desteği ile ağırlık merkezi ayarlaması yapıldıktan sonra omuz bağlantı yeri, dirsek ve itki modülü LSRU noktalarının mesafeleri ayarlanarak mekanik montajı gerçekleştirilir. Mekanik montaj sonrası yakıt borularının bağlantısı kaynak yöntemi kullanılarak yapılır.



Şekil 1-DTMA Robotik Kolu [Sembély, Wartelski, Doubrére, Deltour, Cau ve Rochard, 2017]

YÖNTEM

Ark Kaynağı Yöntemi

Günümüzde çeşitli yapıların bağlantıları için birçok kaynak yöntemi bulunmaktadır. Uzayda ve uzay sektöründe kullanım için füzyon kaynağı, katı faz kaynağı, elektrik direnci kaynağı ve sıvı faz kaynağı düşünülmüştür. Katı faz kaynağında ana metaller erimez, basınç uygulanır ve mekanik deformasyon baskındır. Sürtünme kaynağı ve sürtünme-karıştırma kaynağı katı faz kaynağı çeşitlerindendir. Elektrik direnci kaynağında ana metal ilk olarak elektrik akımı geçerek ısıtılır ve sonrasında basınç uygulanır. Direnç nokta kaynağı elektrik direnci kaynağının çeşidi olarak gösterilebilir. Sıvı faz kaynağında ana metaller erime noktasından daha düşük ısıtılır ve katı birleştirme oluşturmak için erimiş metal eklenmektedir. Lehimleme bu kaynak çeşidi içinde yer almaktadır. Füzyon kaynağında, kaynak yapılacak alanlar birlikte eriyene kadar ısıtılmaktadır. Ark kaynağı, lazer kaynağı ve elektron demeti kaynağı füzyon kaynağının çeşitleri arasındadır. [Nikou, 2003]

Uzay aracı itki sisteminin yüksek kalite sertifikasyon standartlarını karşılaması ve her kaynağın en yüksek saflık ve bütünlük testlerini geçmesi gerekmektedir. Uzay aracı itki sisteminin yakıt besleme borularının bağlantısında ark kaynağı tercih edilmektedir. Ark kaynağı günümüzde en çok uygulanan kaynak çeşididir. En önemli işlemleri arasında gaz metal ark kaynağı (GMAW), gaz tungsten ark kaynağı (GTAW) ve plazma ark kaynağı (PAW) yöntemleri yer almaktadır. [Nikou, 2003]

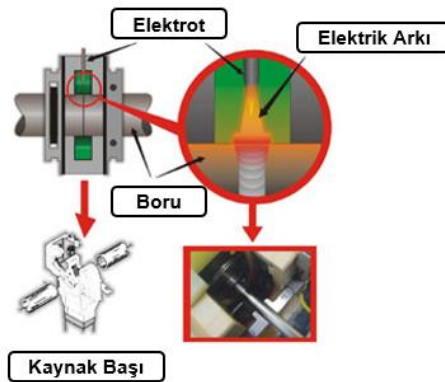
GMAW ve GTAW olmak üzere her iki kaynak yöntemde de kaynağın düzgün ve iyi bir yüzey görünüşüne sahip olması için koruyucu olarak asal gaz kullanılmaktadır. GMAW yönteminde eriyen elektrot uç kullanılırken GTAW yönteminde kullanılan tungsten elektrot ucu tükenmemektedir. Bu

sayede GTAW kaynağı ile yapılan kaynak yüzeyleri daha pürüzsüz bir görünüme sahip olmaktadır. [Mallick, 2010] Plazma ark kaynağı gaz tungsten ark kaynağının bir uzantısıdır ancak daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve gaz tungsten ark kaynağından daha maliyetli, kaynak prosedürü ve ekipmanlar açısından daha karmaşıktır. [Singh, 2012]

Uzay aracı itki sistemine ait yakıt besleme borularının kalınlıklarının çok ince olmasından ötürü el ile kusursuz şekilde kaynak yapılması çok zordur ve kaynak başının boruyu kirletmemesi önem teşkil etmektedir. Herhangi bir kirlilik durumunda dahili sistem içerisinde sızıntı ve gözenek oluşumu gibi kaynak hataları ile karşılaşılabilir. Uzay araçlarında, genel olarak paslanmaz çelik ve titanyum malzemelerinden yapılmış, duvar kalınlıkları 0.406 mm (0.0016 inç) ile 2.286 mm (0.090 inç) arasında değişen ve çapları 3.175 mm (1/8 inç) ile 38.1 mm (1-1/2 inç) arasında değişen çeşitli borular kullanılmaktadır. [Serafin, 2001]

İtki sistemi boru hattı için kullanılan malzemelerin bir kısmı ince olduğundan ve bu nedenle el ile tutarlı bir şekilde kaynak yapılması zor olduğundan, tutarlı mükemmel kaynak kalitesi gerektirdiğinden ve gerekli eğitim ile bu kaynak makinası ekipmanı sayesinde personel harcamalarını azaltmasından dolayı otomatik olarak uygulanan yörüngesel gaz tungsten ark kaynağı (OTIG) tercih edilmektedir. OTIG kaynak yönteminin neredeyse tüm metallerin ve farklı metallerin birbirleri ile bağlantısında kullanılması, tüm kaynak pozisyonlarında uygulanabilmesi, kaynak esnasında cüruf veya duman oluşmaması, işlemin çok kararlı ve güvenilir olması, kaynak kusurlarının meydana gelmesinin %1 altında olması avantajları arasındadır. Dezavantajı olarak ise manuel kaynak yöntemine göre daha fazla maliyet gerektirmesi gösterilebilir. [Polysoude, 2009]

DTMA kolu üzerindeki iki bölgede yörüngesel gaz altı tungsten ark kaynağı yöntemi ile bağlantı vardır. Bu bölgeler, DPS robotik kolu boyunca itki modülüne yakıt taşıyan ksenon borusu ve DPS robotik kolu üzerindeki ksenon borusu ile uydu servis modülü üzerindeki boru hattının bağlantısıdır. Yörüngesel gaz tungsten ark kaynağında (OTIG), elektrik arkı, sarf malzemesi olmayan bir tungsten elektrotu ile birleştirilecek parçalar arasında oluşturulur. Tungsten elektrotun işlevi kaynak için ısı sağlayan ark için elektrik terminallerinden biri olarak hizmet etmektir. Yüksek sıcaklıklarda elektron yayan tungstenin erime noktası 3420°C iken paslanmaz çelikten oluşan yakıt borusu hattının erime noktası ise 1500°C' dir. Ayrıca tungsten elektrotun erimesini ucunda kaynayan elektrotların soğutma etkisi önler. Yörüngesel GTAW kaynağında, kaynak havuzunu havanın etkisinden korumak için ark çevresinde asal gaz kalkanı kullanılır. Koruyucu gaz olarak argon veya helyum gazı kullanımı mümkündür. Ancak maliyet ve molekül ağırlığı açısından argon gazı tercih edilmektedir. [Singh, 2012] TIG kaynağının avantajları arasında cüruf olmadığından dolayı kaynak sonrası temizleme gerektirmemesi gösterilebilir. TIG kaynağı kurşun ve çinko dışında alüminyum, paslanmaz çelik ve magnezyum alaşımları gibi metallerin kaynağı için uygundur. [Weman, 2012] TIG kaynağında iç ve dış hatalar ile karşılaşılabilir. Bu hataların muayenesi için kaynak sonrası röntgen cihazı ile görüntüleme işlemi yapılmaktadır.



Şekil 2-GTAW Kaynağı Prensibi [Telif Hakkı AMİ]

UYGULAMA AŞAMASI

Bu bölümde yörüngesel GTAW kaynak yöntemi uygulama alanı olan elektrikli itki sistemine sahip ve üç eksenle hareket edebilen DTMA kolu üzerinde bulunan yakıt borusunun iki bölgesinde gerekli olan bağlantının uygulama aşaması hakkında bilgi verilmektedir. Bağlantı yapılacak iki bölge arasında uygulama aşamasında farklılık bulunmaktadır ve bu durumun temel sebebi DPS kolu ile itki modülü arasındaki kaynak yerinin ucunun iticilerden dolayı kapalı olmasıdır. Bu bölümde tanımlanan uygulama aşamaları ve değerler E3000 platformuna ait haberleşme uydularının robotik kol içerisinde bulunan 6.35 mm (¼ inç) çapındaki paslanmaz çelik boru hattına göre tanımlanmıştır ve değerler uygulanan farklı bölgelere, boru kalınlığı ve çapına göre değişkenlik göstermektedir.

DTMA Kolu ile Uydu Servis Modülü Yakıt Borusu Bağlantısı ve Muayenesi

DTMA kolu üzerinden geçen yakıt borusu ile itki modülündeki iticileri besleyen yakıt hattının kaynağından önce DTMA kolu ile uydu servis modülünün yakıt hattı bağlantısının yapılması gerekmektedir. Kaynak işlemine başlanmadan önce kaynak makinesinin düzgün çalıştığını teyit etmek amacıyla paslanmaz çelik boru yerine aynı ölçülere sahip ve erime noktası 1670°C olan titanyum boru üzerinde kaynak işlemi gerçekleştirilmelidir. Kaynak makinesinin düzgün çalıştığı doğrulandıktan sonra kaynak yapılacak paslanmaz çelik boru hattı mengene ile aksel kayma olmayacak ve iki boru arasında boşluk kalmayacak şekilde sabitlenerek Ksenon hattı içerisinde bulunan Helyum gazından arındırılması için yaklaşık olarak 2 bar seviyesinde Argon gazı test girişlerinden boru hattına yaklaşık olarak 10 dakika süresince verilmelidir. Boru hattı Helyum gazından temizlendikten sonra kaynak makinesi yerleştirilir ve makine çalışma sıcaklığına ulaştığında otomatik olarak kaynak işlemi başlar. Paslanmaz çeliğe uygulanan TIG kaynak yönteminde kaynak bölgesinin konkav veya konveks olmaması için kaynak işlemi süresince boru hattı içerisinde koruyucu gaz olarak atmosferik basıncın üzerine ek olarak 6mbar (~2.5 inH₂O) civarında Argon asal gazı bulundurulmalıdır. Aynı boru ölçümlerine sahip titanyum bir boru için ise 11mbar (~4.3 inH₂O) civarında asal gaz bulundurulması gerekmektedir. Bu sayede içeri oksijen kaçması önlenmiş olacaktır. Kaynak bölgesinde her tarafın eşit erime sıcaklığı değerine sahip olabilmesi için kaynak makinesinin tungsten elektrotunun 1.5 tur dönmesi yeterli olacaktır. Oksitlenmenin önlenmesi için metal soğuyana kadar 30 saniye gerekli olduğundan kaynak işlemi 30 saniye süresince yapılır [Henon,1999] ve kaynaklama işlemi tamamlandıktan sonra kaynak bölgesinin temizlenmesi için tekrardan 2 bar seviyesinde argon gazı gönderilir ve muayenesi için röntgen cihazı ile çekim yapılır. Röntgen cihazı çalışma sıcaklığına erişene kadar radyasyonun dağılmasını önleme amacıyla kurşun yaprak kullanılır. Kaynak bölgesi muayene işlemi için kaynak bölgesinin arkasına film yerleştirilir ve röntgen cihazı ile çekim yapılırken gönderilen ışınların emilmesi sağlanarak yayılmaması için filmin arkasına kurşun yaprak yerleştirilir. Muayene işleminde kullanılan filmin kalınlığı ve grilik oranı önem arz etmektedir. Filmin grilik oranı çok açık olursa kaynak bölgesinde küçük çatlaklar olması durumunda tespit edilemeyebilir veya filmin grilik oranı çok koyu olursa görüntü düzgün yorumlanamaz. Titanyum borunun röntgen muayenesi işlemi için 40keV güç gerekirken, paslanmaz çelik borunun röntgen muayene işlemi için 64keV güç kullanılmaktadır ve bu değere göre radyasyon dağılımını önleme amacıyla 0.125 mm kalınlığında kurşun yaprak kullanılması yeterli olmaktadır. Görüntünün en verimli şekilde değerlendirilebilmesi için röntgen cihazının mümkün olduğunca kaynak bölgesine yakın olması ve iki yönden 80 dereceden daha büyük bir açıda yön değişimi yapılarak çekim yapılması gerekir.

DTMA Kolu ile İtki Modülü Yakıt Borusu Bağlantısı ve Muayenesi

DTMA kolu üzerinde yapılacak olan diğer kaynak bölgesi ise PTM üzerinde bulunan ksenon kütle debisi kontrolçüsünden DPS kolu üzerine giden ksenon borusu ile DPS kolunda bulunan yakıt iletimini sağlayan boru hattıdır. Kaynak işlemine başlanmadan önce kaynak yapılacak olan bölgeler izopropanol alkol ile temizlenmelidir. Temizlik sonrası borular mengene ile aksel kayma olmayacak ve iki boru arasında boşluk kalmayacak şekilde sabitlenerek Ksenon hattı içerisinde bulunan oksijen gazından arındırılması için test girişlerinden 2 bar seviyesinde yaklaşık olarak 10 dakika süresince Argon gazı verilmektedir. PTM tarafında bulunan Ksenon boru hattının ucu kapalı olduğundan argon gazı verildikten sonra itki modülünün kapalı olan duvarına vurarak geri dönüş

yolunda oksijenin molekül ağırlığından fazla olduğundan dolayı oksijen gazını iterek gazın verildiği test girişinden çıkış sağlanmaktadır. TIG kaynak yönteminde kaynak bölgesinin kusursuz olması için kaynak işlemi süresince boru içerisinde koruyucu gaz olarak atmosferik basıncın üzerine ek olarak 6mbar (~2.5 inH₂O) civarında Argon asal gazı bulundurulmalıdır. Boru hattında istenilen basınç seviyesi sağlandıktan sonra ve kaynak makinesi çalışması gereken sıcaklığa erişim sağladıktan sonra tungsten elektrot otomatik olarak çalışmaya başlar. Kaynak süresi oksitlenme olmaması için metal soğuyana kadar devam etmektedir ve bu süre 30 saniyedir. Kaynak işlemi tamamlandıktan sonra boru hattı kapalı uca sahip olduğundan ötürü temizlenmesine gerek yoktur. Kaynak sonrası temizleme işleminin yapılması durumunda gaz kapalı uca çarparak geri dönerek çıktığından itki sistemi zarar görebilir. Kaynak sonrası kaynak bölgesinde çatlak ya da baloncuk oluşumu olup olmadığının muayenesi ve değerlendirilmesi için röntgen cihazı ile çekim yapılır.

SONUÇ

Uydu sektöründe uzay araçlarının farklı bölgelerinin bağlantıları için farklı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. İtki sistemi uyduların ilgili yörüngelerine ulaşmaları, yörüngede tutunmaları ve manevra yapabilmeleri için gerekli olan kritik sistemlerdir. Bu itki sistemin zarar görmesi görevin başarı ile tamamlanamamasına sebebiyet verir. Bu sebepten ötürü itki sistemin tank ile iticilere yakıt iletimini sağlayan boru hatlarının düzgün ve kusursuz bir şekilde kaynaklanması gerekir. Yakıt hattının boruları ince duvarlara sahip olduğundan el ile düzgün bir kaynak gerçekleştirilmesi çok zordur. Otomatik olarak gerçekleşen OTIG kaynak yöntemi, hem düzgün bir kaynak yapılabilmesi ve yüksek hassasiyet sağlanması hem de borunun kaynak bölgesinde herhangi bir kirlilik yaratmamasından ötürü diğer kaynak yöntemlerine göre daha iyi sonuç vermektedir. Bu sebeple uydu itki sisteminde yakıt iletimini sağlayan boru hatlarının birleşimi işlemi için yörüngesel GTAW kaynağı tercih edilmektedir.

Kaynaklar

ESA,2019“<https://sci.esa.int/web/smart-1/-/34201-electric-spacecraft-propulsion?section=methods-of-electric-propulsion>” Erişim Tarihi 30.01.2020

Henon, B.; Orbital Welding of Stainless Steel Tubing for Biopharmaceutical, Food and Dairy Use, Reprinted from Tube International, September, 1999, AMI

Mallick P. K., 2010, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, Bölüm 8, Joining for lightweight vehicles, s.282-285

NASA,2020 “https://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/100403main_electric_propulsion.pdf” Erişim Tarihi 30.01.2020

Nikou V., 9 Mayıs 2003, Welded Repair and Maintenance in the Space Environment, s.18-22

Polysoude, 2009, The Orbital Welding Handbook

Sembély, X., Wartelski, M., Doubré, P., Deltour, B., Cau, P. ve Rochard, F., 2017, International Electric Propulsion Conference, Atlanta, Georgia, ABD, 8-12 Ekim.

Serafin, M., 2001, Orbital Welding for Space Program Application, Producing welds that withstand the rigors of deep space. TPJ-The Tube and Pipe Journal. CapeCanaveral Air Force Station, 19 Şubat “<http://www.thefabricator.com/article/tubepipefabrication/orbitalwelding-for-space-program-applications--producing-welds-thatwithstand-the-rigors-of-deep-space>.” Erişim Tarihi 20.02.2020

Singh R., 2012, Applied Welding Engineering, Bölüm 3, Welding and Joining Processes, s.155-157, 162

Sutton, G. P., Biblarz, O., 2010, Rocket Propulsion Elements Cilt. 8, s.624-626

Weman K., 2012, Welding Processes Handbook, Cilt. 2, s.63-69