

UZAY UYGULAMALARINDA KULLANILACAK OLAN ISI BORULARININ SEÇİM KRİTERLERİ

Murat BULUT¹
Türksat A.Ş., Ankara

Nedim SÖZBİR²
Türksat A.Ş., Ankara
Tübitak Uzay Enstitüsü, Ankara
Sakarya Üniversitesi, Makina Müh. Bölümü,
Sakarya

ÖZET

Isı boruları ısı enerjisinin bir noktadan diğer bir noktaya en hızlı şekilde atılması için kullanılan teknolojilerdir. Isı boruları teknolojileri hem soğutma hemde ısıtma (ısıtıcılar kullanılarak) amaçlı uzay teknolojilerinde kullanılmaktadır. Isıl kontrol sistemin toplam kütlesinin %50'sinden fazlasını oluşturduğundan dolayı ısı borusunun seçimi uzay uygulamalarında önem arz etmektedir. Bu çalışmada genel olarak ısı boru teknolojisi ve uzay teknolojilerinde kullanılacak olan ısı borularının seçiminde dikkat edilmesi gereken kriterler uzay teknoloji alanında çalışma sırasında elde edilen tecrübeler ışığında aktarılmıştır.

SİMGELER

CM	=	Haberleşme Modülü (CM-Communication Module)
CPL	=	Capillary Pumped Loop
ÇİB	=	Çevrimli Isı Borusu
EHP	=	Gömülü Isı Borusu (Embedded Heat Pipe)
GİB	=	Gömülü Isı Borusu
HP	=	Isı Borusu (Heat Pipe)
İB	=	Isı Boruları
İKS	=	Isıl Kontrol Sistemi
LHP	=	Loop Heat Pipes
MLI	=	Çok Katmanlı İzolasyon Örtüsü (multilayer insulation)
OSR	=	Optik Güneş Yansıtıcıları (optical solar reflector)
p	=	Basınç [N/m ²]
SMHP	=	Yüzeye Bağlantılı Isı Borusu (Surface Mounted Heat Pipe)
TAS	=	Thales Alenia Space
TTTP	=	Teknoloji Transfer Programı
UMET	=	Uydu Montaj Entegrasyon ve Test Merkezi
VC	=	Buhar odası (vapor chamber)
YBİB	=	Yüzeye Bağlantılı Isı Borusu

¹ Teknik Uzman, Uydu Programları Direktörlüğü, E-posta: bulut44@gmail.com

² Danışman, Başuzman ve Araştırmacı ve Sakarya Üniversitesi Öğr. Üyesi, E-posta: nsozbir@turksat.com.tr

Alt simge

c	=	kılcal ile ilgili
g	=	yerçekimi ile ilgili
l	=	sıvı ile ilgili
v	=	buhar ile ilgili

GİRİŞ

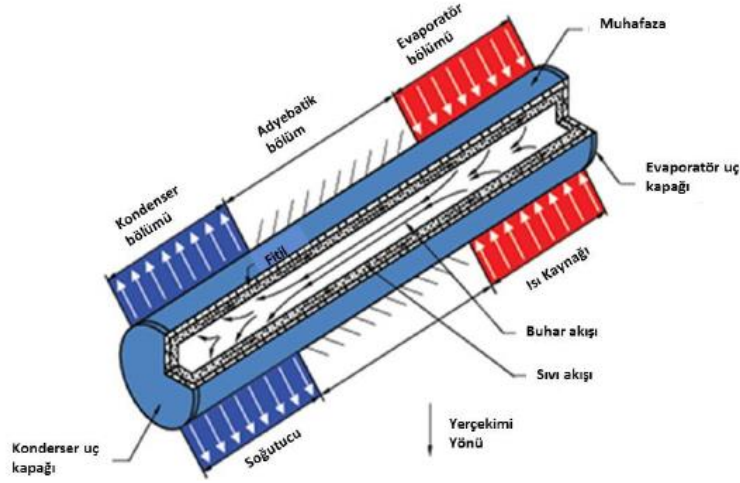
1831 yılında Angier March Perkins tarafından tasarımı yapılan hermetik boru kazanı, ilk ısı borusu uygulaması olarak kabul edilmekte olup 1839 yılında Angier March Perkins tarafından İngiltere’de patenti alınmıştır. 1944 yılında General Motors firmasında R.S.Gaugler tarafından günümüzde kullanılan ısı borusunun temelini oluşturan bir ısı değiştirici tasarlamış ve bunu soğutma sisteminin bir parçası olarak tanımlama yapıp patentini almıştır [Arslan, 2007]. Isı transfer deneylerinde kullanımı 1964 yılında Los Alamos National Laboratuvarında Grover, Cotter ve Erikson tarafından yapılmıştır. Isı borusu teknolojisinin özellikle uzay uygulamalarında kullanılması 50 yıl öncesine kadar uzanmaktadır. 1969 yılında uzay uygulamalarında kullanılmış ve NASA tarafından ilgi gösterilmiş ve günümüzde de kullanılmaya devam edilmiştir [Bulut ve Sözbir, 2016].

Sanayi ve teknolojide yaşanan ilerleme ile birlikte cihazların fiziksel boyutlarında küçülme ve ısı yüklerinin artışı ile birlikte yüzey alana düşen ısı yükü miktarı da (W/cm^2) artış göstermektedir. Isı yükünün yakın zamanda özellikle askeri uygulamalarda $1 kW/cm^2$ olacağı öngörülmektedir. Bu nedenle ısı borularının geliştirilmesi için son yıllarda bilim insanları tarafından yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Isı borularında yüzey alanına düşen ısı yükü miktarının transferinin sınırlı olması nedeni ile son yıllarda bilim insanları buhar odası (vapor chamber (VC)) teknolojileri üzerinde çalışmalar yapmaktadır [Bulut, Kandlikar ve Sözbir, 2018].

Bu çalışmada ısı borusu çalışma prensibi, uzay uygulamalarında ısı boruları teknoloji kullanımı ve ısı borusu seçim kriterleri hakkında bilgiler verilecektir.

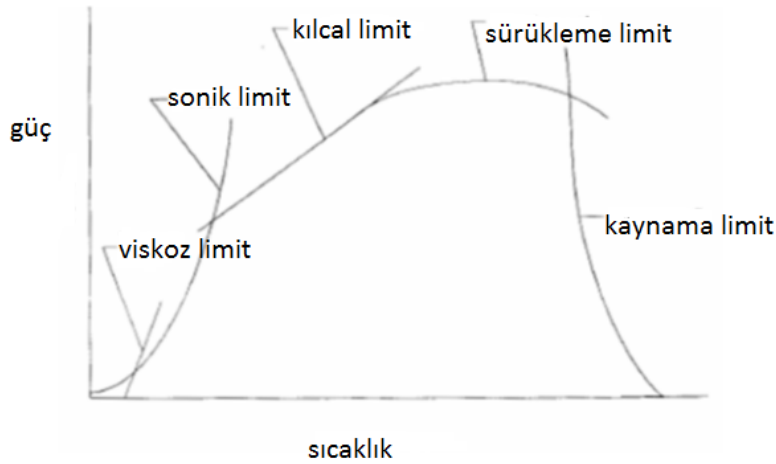
ISI BORUSU ÇALIŞMA PRENSİBİ

Isı boruları buhar-sıvı (iki fazlı ısı transfer) faz değişimi ile çalışan ekipmanlardır. Isı borularında ısıнын transferi kapalı çevrimli iki fazlı akış buharlaşma ve yoğunlaşma bölgesi yardımı ile elektrik gücü olmadan transferi gerçekleşmektedir [Gilmore, 2002]. Isı boruları, ısı borusu içerisinde yer alan sıvı ısıyı çektikten sonra buharlaşarak çektikleri ısıyı daha soğuk ortama hareketi ile yoğunlaşarak ısıyı bırakma prensibine göre çalışmaktadır. Isı borusu ve çalışma prensibi Şekil 1’de görülmektedir [Faghri, 2014]. Sıvı halde bulunan akışkan ısı borusunun iç kısmında yer alan fitil içerisinde ısıнын etkisi ile buharlaşacak ve ısı borusunun iç kısmında (fitil yapının olmadığı) yer alan kanal içerisinde hareket edecektir. Isı transferinin sıcak (buharlaşma alanı) bölgeden soğuk (yoğunlaşma alanı) bölgeye akış şeklide olacaktır. Düşük sıcaklıkta yoğunlaşan buhar, sıvılaştıktan sonra tekrar fitil bölgesine kılcal basınç yardımı ile geçecektir. Bu sayede ısıнын transferi küçük sıcaklık farkı ile gerçekleşmiş olacaktır. Isı borularında ısı performansı, borunun fiziksel boyutları (uzunluk ve çap), borunun iç yapısını oluşturan fitil yapının türü (yivli yapı, sinterlenmiş yapı, elek yapı, vb.), gözenek yapının büyüklüğü, boru içerisinde yer alan sıvının miktarı ve türü, boru malzemesi, soğuk bölgenin alanı, borunun yatay eksen ile yapmış olduğu açı ile etkilenmektedir.



Şekil 1: Isı Borusu ve Çalışma Prensibi [Faghri, 2014].

Isı borularında maksimum ısı taşıma kapasitesi ısı borusu sınırlamalarına bağlıdır. Şekil 2’de ısı borusu sınırlamaları yer almaktadır. Isı borularında boru içerisinde yer alan sıvının akışı viskoz, sonik, kılcal, sürüklenme ve kaynama sınırlamaları ile kısıtlanmaktadır. Her bir sınırlama operasyon sıcaklığının belirli bir bölgesinde etkisini göstermektedir.



Şekil 2: Isı Borusu Sınırlamaları [Bulut ve Sözbir, 2016].

Isı boru tasarımlarında en önemli parametrelerinden biri de boru içerisinde kılcal basınç toplam basınç ile dengede olmasıdır. Eşiklik (1)’de basınçlar ile ilgili denge görülmektedir. Toplam basınç düşümleri ısı borusu boyunca fitilin maksimum kılcal basıncını asla aşmamalıdır. Aksi taktirde ısı borusu çalışmamaktadır.

$$\Delta p_c = \Delta p_v + \Delta p_l + \Delta p_g \quad (1)$$

Eşitlik (1) ‘in sol tarafı toplam kılcal basıncı (Δp_c), sağ tarafındaki ilk terim buhar basıncını (Δp_v), ikinci terim sıvı basıncını (Δp_l), ve üçüncü terim yerçekimi basıncını (Δp_g) ifade etmektedir.

UZAY UYGULAMALARINDA ISI BORULARI TEKNOLOJİ KULLANIMI

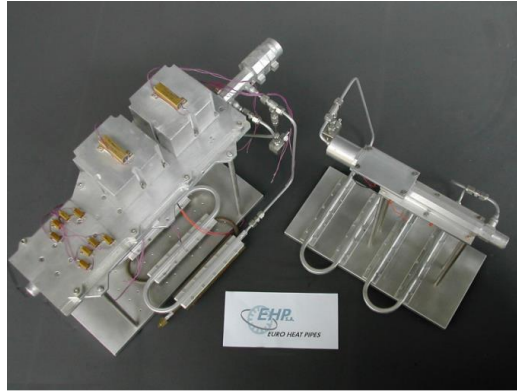
Uzay teknolojilerinde ısı boruları 1969 yılından bu yana yaygın olarak kullanılmaktadır. Uzay uygulamalarında kullanılacak olan ısı boruları ısı kontrol sisteminin en önemli ekipmanlarından biridir. Uzay uygulamalarında ısı borusunun yer aldığı uzay aracı tasarlanmış ise ısı boruları genellikle toplam ısı bütçesinin (kütlesi) en az yarısını oluşturmaktadır. Gözlem uydularında ısı

boruları ısı yükünün az olması nedeni ile kullanılmamaktadır. Haberleşme uydularında ısı boruları toplam ısı kontrol system (IKS) bütçesinin %50'inden fazlasını oluşturmaktadır. Bilimsel uydularda uydunun misyonuna bağlı olarak ısı boruları kullanılmakta olup ısı kütle bütçesi değişim göstermektedir.

Uzay teknolojilerine sahip üretici firmalara uzay araçlarında ısı kontrolü farklı ısı kontrol teknikleri ile gerçekleştirmektedir. IKS'ini sağlayan sistemler iki fazlı sistem olup ısı boruları ve çevrimsel ısı boruları olarak iki gruba ayrılmaktadır. Isı boruları (IB) (heat pipe-HP) yüzeye bağlantılı ısı boruları (YBIB) (surface mounted heat pipe-SMHP) ve gömülü ısı boruları (GIB) (embedded heat pipe-EHP) olarak ikiye ayrılmaktadır. Thales Alenia Space (TAS) uydularında YBIB kullanılmaktadır. TAS GIB sadece pillerin ısı kontrolünde kullanılmaktadır. TAS GIB teknolojileri görev yükü panellerinde kullanmak için son yıllarda çalışmalar yapmaktadır. Mitsubishi Electric Space Systems ve Astrium firması uydularında GIB kullanılmaktadır.

Çevrimsel ısı boruları (ÇIB) Capillary Pumped Loops (CPL) ve Loop Heat Pipe (LHP) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Gelişen teknoloji ile birlikte elektronik cihazların birim alan düşen ısı miktarı artmaktadır. Bu nedenle ısı borunun yerini uydularda ÇIB (CPL ve LHP) almaktadır [Bulut, Kahriman ve Sözbir, 2010; Sözbir, 2008]. Şekil 3'de çevrimli ısı borularından LHP görülmektedir. LHP 1972 yılında Gerasimov ve Maydanik tarafından Ural Polytechnic Institute'de geliştirilmiş ve 1985 yılında patenti Maydanik tarafından alınmış ve 1989 yılında uzayda ilk uygulaması yapılmıştır. Isı borularında olduğu gibi iki fazlı ve pasif çalışan ve ısı geçişini sağlamak için tasarlanmış cihazlardır. Pasif cihazlar olduğu için sisteme dışarıdan herhangi bir şekilde güç beslemesi yapılmamaktadır. Ayrıca herhangi bir hareketli parça olmaması nedeni ile çalışma güvenilirliği yüksek olan ekipmanlardır [Arslan, 2007].

CPL NASA Lewis Research Center'de 1966 yılında Stenger tarafından bulunmuştur [Stenger, 1966]. Avrupalılar 1990'ların başlarında kendi elektronik cihazlarının ısı kontrolünü CPL kullanarak Stentor uydusu içinde test etmişlerdir [Delil ve arkadaşları, 1995]. CPL the Earth Observing System, the Hubble Space Telescope and the Mars Surveyor gibi uydularda termal kontrol sağlamak için test edilmiştir [Clayton, Martin ve Baumann, 1997].



Şekil 3: Çevrimli ısı borusu (Loop Heat Pipe <http://www.ehp.be/>)

Dünya da uydu üretimi ticari (gözlem, haberleşme ve bilimsel) olarak yapan firmaların listesi Şekil 4' de görülmektedir.

Uydu üretici firmaları farklı IKS'i kullanmaktadır. Rusya'da bulunan uydu üreticileri genellikle LHP kullanmaktadır. LHP' in kullanıldığı yada tasarlandığı uydular: NASA's ICESat, SWIFT, TES, EOS-Chemistry, GOES, AMS-02, RKA's OBZOR, YAMAL, ESA's ATLID, EXOMARS, Alman TerraSAR-X, CNES's STENTOR (roket fırlatma kazası), Çin FY-1C meteoroloji uyduları. Intelsat Americas-8 (IA-8) uydusunda Loral Space& Communications LHP teknolojisi kullanmıştır. Boeing's (Hughes) HS 702 ve 601 uydularda LHP kullanılmıştır. NASA tarafından geliştirilen ve uzaya gönderilen AURA uydusunda 5 adet LHP, ICESat uydusunda 2 adet LHP, SWIFT uydusunda 2 adet LHP, GOES N-Q uydusunda 5 adet LHP kullanılmıştır. GOES R-U uydusunda 4 adet LHP, ICESat-2 uydusunda 1 adet LHP, SWOT uydusunda 4 adet LHP kullanılmış ve yakın zamanda bu uydular NASA tarafından fırlatılacaktır. LHP'ler etkili sıcaklık kontrol sistemleri olarak, hem yerde hemde

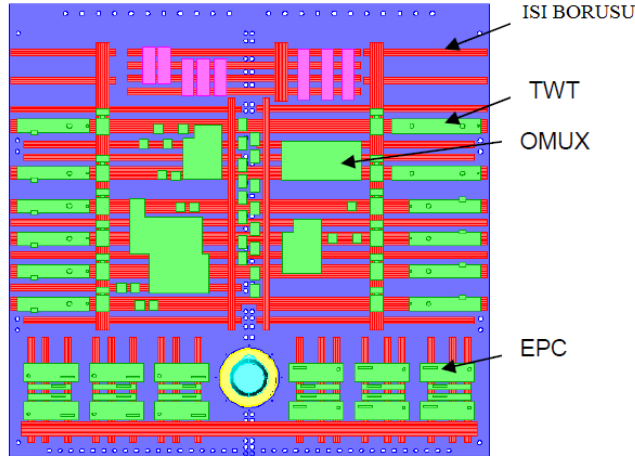
uzayda kullanılmış ve uydu üreticileri tarafından kabul görmüştür. LHP'ler çeşitli avantajları bereberinde getirmiştir. Bunlar; bükülebilir taşıma kanalları, katlanabilir radyatörler, kriyojenik uygulanma, yüksek g kuvvetleri (dönen uzay aracı ya da yüksek ivmeli manevralar).

Uydu Üretici Firmaları	Ülke
Airbus Defence and Space	Birden fazla ülke
Boeing	Amerika
China Great Wall Industry Corporation	Çin
ESA	Birden fazla ülke
Indian Space Research Organization	Hindistan
ISS Reshetnev	Rusya
Lockeed Martin	Amerika
Mitsubishi Electric Corporation	Japonya
NASA	Amerika
Orbital ATK	Amerika
Surrey Satellite Technology	İngiltere
Space System Loral (SSL)/MDA	Amerika/Kanada
Thales Alenia Space	Fransa

Şekil 4: Uydu üretici firmaları

NASA tarafından geliştirilen ve uzaya gönderilen TERRA uydusunda 6 adet CPL, HST/SM-3B uydusunda 1 adet CPL. Alphabus platformunda Thales Alenia Space ve EADS Astrium ÇİB kullanma teknolojisi üzerinde çalışmaktadırlar.

Şekil 5'de örnek olarak TÜRK SAT AŞ IKS ekibi tarafından tasarlanmış TUSAT haberleşme uydusuna ait haberleşme modülü (CM-Communication Module) güney paneli görülmektedir [Sözbir ve Bulut, 2009]. Isı boruları YBİB'dir.



Şekil 5: TUSAT Haberleşme Uydusu Görev Yüğü Güney Panel [Sözbir ve Bulut, 2009].

Yüzeye bağlantılı ısı borusu ve gömülü ısı borusu geometrik ve ısı matematiksel modelleri hazırlanmış ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir [Ataer, Çokgezen ve Dirgin, 2016]. GIB kullanılan modelin YBİB kullanılarına göre daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. GIB yer alan modeldeki operasyonel olan ekipmanların sıcaklıkları YBİB yer alan modeldekilere göre ortalama 8.3 °C daha düşük olduğu ve operasyonel olmayan ekipmanlarda ise bu farkın 1.75 °C olarak hesaplamalarda görülmüştür [Ataer, Çokgezen ve Dirgin, 2016].

UZAY UYGULAMALARINDA ISI BORUSU SEÇİM KRİTERLERİ

Uzay uygulamalarında kullanılacak olan ısı borularının seçimleri proje başlangıç aşamasında IKS grubunda çalışan ısıl tasarım ve analiz mühendislerin en önemli görevlerinden biridir. Uzay teknolojilerinde elde edilen tecrübeler ışığında seçim kriterleri aşağıda özetlenmiştir.

1. *Isı borusu kullanım gerekliliği:* Genel tasarım kuralı olarak uzay teknolojilerinde en kolay ve güvenilir sistemden daha gelişmiş sistemlere doğru iteratif bir yaklaşım ile yaklaşılmaktadır. Bu sebeple proje başlangıcında öncelikli olarak pasif sistemlerin kullanımı tercih edilmektedir. Pasif sistemlerin yeterli olmadığı durumda aktif sistemler kullanılmakta ve özellikle ısı borularının kullanımı tercih edilmektedir.
2. *Kütle:* Uzay araçlarında en önemli kriterlerden bir tanesi uzay aracının kütledir. Uzay teknolojilerinde kütle ile maliyet doğru orantılıdır. Bu sebeple kütlenin artışı ile birlikte fırlatma maliyetinde artış göstermektedir. Isı borularının kullanıldığı uzay araçlarında IKS'in % 50'sinden fazlasını ısı boruları oluşturmaktadır. Kuru kütlesi 2000 kg'lık bir haberleşme uydusu düşünüldüğünde %5 lik kısmı ısıl kütleyi oluşturmaktadır. Bunun yarısının ısı borusu olduğunu düşünürsek eğer yaklaşık 50 kg'lık ısı borusu kullanılmaktadır. Isıl kontrol sisteminin diğer yarısında çok katmanlı izolasyon (MLI- Multi Layer Insulation), optik güneş reflektörü (OSR- optic solar reflector), boyalar, sıcaklık ölçen ekipmanlar oluşturmaktadır [Sözbir, 2015].
3. *Çalışma sıcaklık aralıkları:* Uzay aracının kullanılacağı yere uygun olarak ısı borularının seçilmesi gerekmektedir. Haberleşme, gözlem ve bilimsel amaçlı kullanılacak olan uzay araçlarındaki ısı borularının çalışma sıcaklık aralıkları kullanılacak olan ekipmanlara göre değişiklik göstermektedir. Çalışma sıcaklık aralıkları özellikle uygun ısı transfer kapasiteli ısı borularının seçiminde önem arz etmektedir.
4. *Isı borusu çeşitleri:* Isı boruları, ısı boruları (YBIB ve GIB) ve çevrimli ısı boruları olarak iki gruba ayrılmaktadır. Çevrimli ısı boruları (CPL-Capillary Pumped Loop ve LHP-Loop Heat Pipe) iki gruba ayrılmaktadır. Proje başlangıcında kullanılacak olan teknolojinin seçimi yapılmalıdır.
5. *Isı transfer kapasitesi:* Isı transfer kapasitesi (heat transfer capacity) ayrıca ısı taşıma kabiliyeti (heat transport capability) olarak ifade edilmektedir. Isı borularında en önemli kriterlerden bir tanesi ısı transfer kabiliyetinin seçimidir. Isının transfer kabiliyetleri üretici firma tarafından uzay aracı üreten firmaya bilgi olarak verilmektedir. Isı transfer kabiliyetine uygun olarak IKS tasarımları yapılmaktadır. Isı transfer kapasitesi ısı boruları için W/m ile ifade edilmektedir. Isı borusunun çalışma sıcaklığı ile değişmektedir. Uygun çalışma sıcaklık aralığı için uygun olan ısı transfer kapasitesine sahip ısı borularının seçimi yapılmalıdır.
6. *Isı yükü:* Isı yükü yüksek olmadığı sürece LHP ve CPL sistemlerin kullanımları tavsiye edilmemektedir. Eğer elektronik ekipmanın ürettiği ısı yükü fiziksel boyutları gözönüne alındığında yüksek ise LHP ve CPL kullanılmaktadır.
7. *Maliyet:* Maliyet olarak incelendiğinde ısı boruları çevrimsel ısı borularına göre daha ucuzdur. Fırlatma maliyeti 1 kg olan maliyet olarak sıralama yapılacak olursa: Isı borusu < Değişken konduktans ısı borusu & Diyot ısı borusu < LHP & CPL.
8. *Modelleme ve test:* Isı borularının modellenmesi ve test aşamaları ısı borusu tipine göre farklılıklar göstermektedir. Modelleme tasarım ve analiz olarak iki kısımdan oluşmaktadır. Test kısmı ise ısı denge ve döngü testlerinden oluşmaktadır. Dünya da yerçekimi yardımı ile etkin olarak çalışan ısı borularının performansı, yerçekimsiz ortam olan uzay şartlarında ısı performansı daha düşük olmaktadır. Bu nedenle Dünya da yapılan testlerde ısı borularının test sırasındaki pozisyonları çok önemlidir.

SONUÇ

Uydu projelerinde özellikle ön tasarım aşamasında ısı kontrol sisteminde kullanılacak olan ısı borularının seçimi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, ısı boruları hakkında genel bilgi ve uzay uygulamalarında kullanılacak olan ısı borularının seçim kriterleri hakkında bilgiler 2006-2007 TÜRK SAT 3A-TTTP programı ve 2010-2013 yıllarında Uydu Montaj Entegrasyon ve Test (UMET)

merkezi- entegre tesis ekibi (Integrated Facility Team-IFT) takım görevi ve Türksat 6A projesi sırasında kazanılmış olan tecrübeler ışığında verilmiştir.

Kaynaklar

Arslan, G., 2007. *Üç Kolonlu Titreşimli Isı Borusunun Matematiksel Modellenmesi ve Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.

Ataer, S.K., Çokgezen, O.Ö., ve Dirgin, E., 2016. *Haberleşme Uydularında Gömülü ve Yüzeye Monteli Isı Borularının Isıl Kontrol Açısından Karşılaştırılması*, VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 28-30 Eylül.

Bulut, M., Kahriman, A. ve Sözbir, N., 2010. *Uydularda Isıl Kontrol*, Termodinamik, Sayı - 209, S.72-78, Ocak 2010.

Bulut, M., ve Sözbir, N., 2016. *Isı Borusu Teknolojisi ve Uzay Uygulamaları*, VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 28-30 Eylül.

Bulut, M., Kandlikar, S.G. ve Sözbir, N., 2010. *A Review of Vapor Chambers*, Heat Transfer Engineering. DOI: 10.1080/01457632.2018.1480868

Clayton, S., Martin, D., ve Baumann, J., 1997. *Mars Surveyor Thermal Management Using a Fixed Conductance Capillary Pumped Loop*, SAE paper 972467, Elsevier, sayfa: 899-910.

Delil, A.A.M., Heemskerk, J.F., Mastenbroek, M., Dubois, M., Van Oost, S., Coesel, M.J.N., Supper, W., ve Acet, R., 1995. *TPX for In-Orbit Demonstration of Two-Phase Heat Transfer Technology -Evaluation of Flight and Post-Flight Experiments Results*, Journal of Aerospace, Vol.104, Section 1, pp.595-614

Faghri, A., 2014. *Heat Pipes:Review, Opportunities and Challenges*, *Frontiers in Heat Pipes*, 5(1), 1-48.

Gilmore, D.G., 2002. *Spacecraft Thermal Control Handbook Volume I: Fundamental Technologies*, 2nd ed., The Aerospace Press, California.

Sözbir, N., Bulut, M., Öktem, M.F., ve Kahriman, A., 2008. *TUSAT Haberleşme Uydusunun Isıl Tasarımı*, II. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, İstanbul, 15-17 Ekim.

Sözbir, N., 2008. *Heat Pipe or Fluid Loops Tradeoff*, Report, Türksat A.Ş.

Sözbir, N. ve Bulut, M., 2009. *Thermal Control of CM and SM Panels for Turkish Satellite*, SAE 39th International Conference on Environmental Systems, Savannah, Georgia, USA, 12-16 Temmuz.

Stenger, F., 1966. *Experimental Feasibility Study Water-Filled Capillary-Pumped Heat-Transfer Loops*, NASA TM X-1310, Society of Automotive Engineers.