

## YER GÖZLEM UYDULARINDA ISIL MODELLEME VE ANALİZ YAKLAŞIMI

Selin ARABACI<sup>1</sup>

TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., ANKARA

### ÖZET

*Uydu ısı kontrol sistemi tasarımı, ışınım değişim faktörleri ve yörüngedeki ısı akısı hesaplamalarında önemli rol oynayacağı düşünülen yapısal parçaların ve ekipmanların geometrik modellenmesi ve bu ısı geometrik modelin yörüngeye yerleştirilerek uyduya düşen dış ısı akıları ve ışınım değişim faktörlerinin hesaplanmasıyla başlar. Sonrasında ekipmanlar ve yapısal parçalara ait gerekli ısı analiz bilgilerini (düğüm bilgileri, iletim bağları, ısı yayınımları, vs. ) içeren ısı matematiksel model oluşturulur. Uydudaki ekipmanlara ve yapısal parçalara ait yörünge sıcaklık bilgilerine, ısı matematiksel modelin çözülmesi ile ulaşılır. Bu çalışmada, alçak irtifa yörüngede görev yapan örnek bir yer gözlem uydusuna ait ısı geometrik ve ısı matematiksel model oluşturulması ile ısı analiz aşamaları anlatılmış; iki farklı uydu ısı tasarım senaryosu için analiz sonuçları verilmiştir.*

### GİRİŞ

Yer gözlem uydularındaki ısı kontrol sisteminin görevi, uydunun tüm operasyonel durumlarında ve uydunun maruz kalabileceği ısı koşullarda ekipmanlar ve yapısal parçaların kendileri için tanımlanmış sıcaklık aralıklarında kalmasını sağlamaktır. Bu çalışmada alçak irtifa yörüngede görev yapan örnek bir yer gözlem uydusuna ait ısı kontrol sistemi geometrik ve matematiksel modelleme aşamaları anlatılmıştır. Modeller tamamlandıktan sonra gerçekleştirilen ısı analizler, tanımlanan iki ayrı tasarım senaryosunda (sıcak durum ve soğuk durum) gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar verilmiş değerlendirilmiştir.

### YÖNTEM

#### Uydu Isı Geometrik Modelleme Yaklaşımı

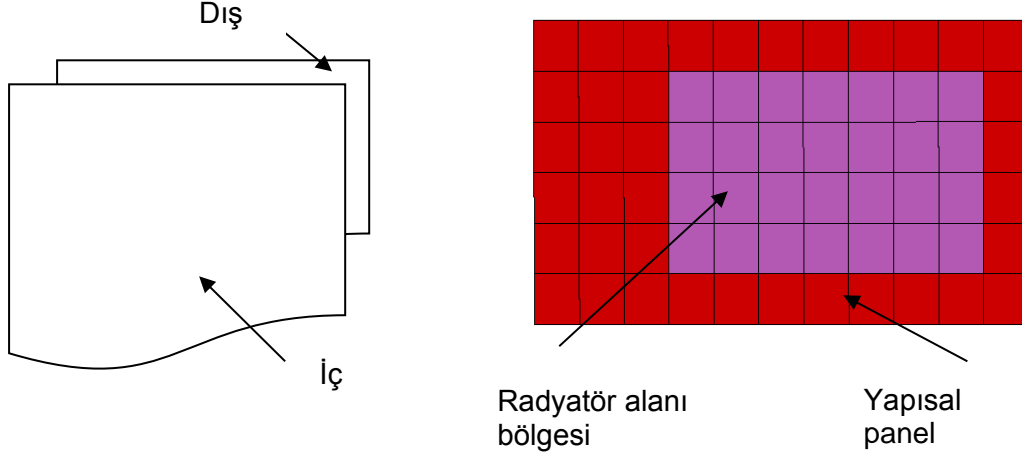
Uydu ısı kontrol sistemi tasarımı, ışınım değişim faktörleri ve yörüngedeki ısı akısı hesaplamalarında önemli rol oynayacağı düşünülen yapısal parçaların ve ekipmanların geometrik modellenmesi ve bu ısı geometrik modelin yörüngeye yerleştirilerek uyduya düşen dış ısı akıları ve ışınım değişim faktörlerinin hesaplanmasıyla başlar.

Uydu ısı geometrik modelleme çalışması ve ışınım analizleri bu çalışmada Thermica v.3.2.20.1

<sup>1</sup> Tasarım Uzmanı, Uzay Sistemleri Başkanlığı Isıl Kontrol Sis. Böl., E-posta: [sarabaci@tai.com.tr](mailto:sarabaci@tai.com.tr)

yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Uydu içi ve dışındaki ekipmanlar gerçeğe en yakın ışınım yüzeyine sahip olacak şekilde modellenmiştir. Uydu geometrik modellemesine yapısal panellerin modellenmesiyle başlanmıştır. Paneller istenilen detay seviyesi doğrultusunda belli bir düğüm büyüklüğü ve sayısına sahip olacak şekilde modellenmiştir (Şekil 1).



Şekil 1: Uydu yapısal panel geometrik modellemesi

Alüminyum balpeteği olan yapısal panellerin uydu içine bakan kısımları iç; çok katmanlı yalıtım battaniyesine bakan tarafları dış olarak isimlendirilmiştir. Radyatör alanları dış kısımda gerekli radyatör alanı büyüklüğünde bölgenin ayrı olarak çizilmesi ve radyatör yüzey özellikleri verilmesiyle modellenmiştir.

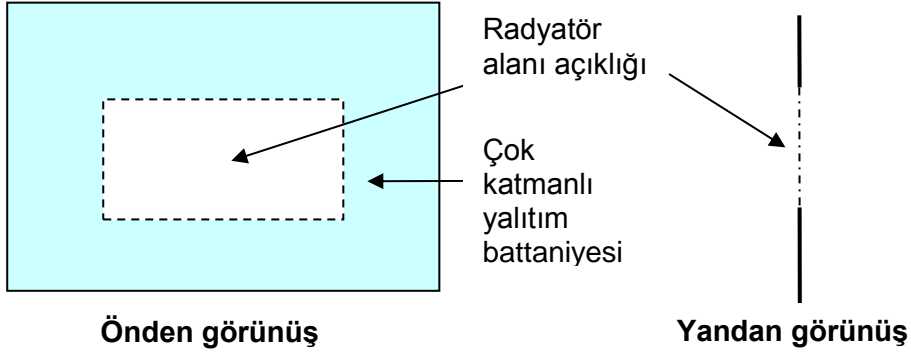
Panellerin hemen sonrasında güneş panelleri, uydu dışında bulunan çok katmanlı yalıtım battaniyeleri, ekipmanlar ve analiz için gerekli diğer yapısal parçalar modellenmiştir. Güneş panellerinin modellenmesi yapısal panellerle benzerdir. Çok katmanlı yalıtım battaniyeleri yapısal panellerin geometrilerine uygun olarak, dış ısı akısını uydu içine almayacak şekilde modellenmiştir (Şekil 2).

Elektronik kartların bulunduğu kutuların geometrik modeli için 5 yüzlü dikdörtgenler prizması tercih edilmiştir (Şekil 3). Yapısal bağlantı elemanları ışınım analizlerinde etki göstermeyeceklerinden geometrik olarak modellenmemişlerdir ve etkileri ısı matematiksel modele dahil edilmiştir.

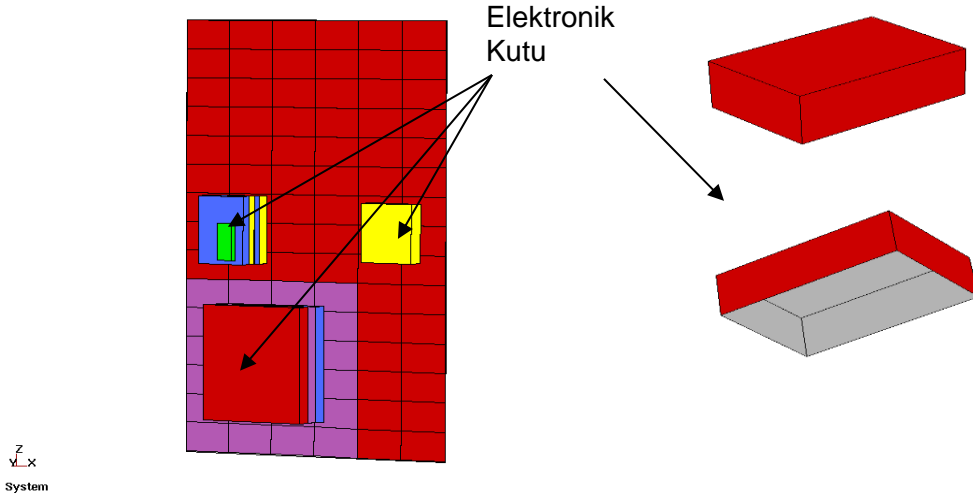
Isıl geometrik model oluşumu sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta yüzeylerin aktiflikleridir. Işınım analizine dahil olacak ekipmanın/panelin yüzey aktifliğinin ve yüzey ısı-optik özelliğinin doğru verilmesi gerekmektedir.

### Uydu Isıl Matematiksel Modelleme Yaklaşımı

Uydu ısı matematiksel modeli uyduya ait analiz bilgilerinin tümünü içermektedir. Düğümlere ait numara ve kapasitans değerleri, düğümler arası iletim ve ışınım bağları, ısı yayılımı bilgisi, düğümlere düşen dış ısı akısı değerleri ısı matematiksel modeli oluşturur. Uydu ısı matematiksel model çözülmesi bu çalışmada SINDA/G yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir SINDA/G yazılımı ile oluşturulan iskelet dosyasına eklenen tüm bu girdi dosyaları beraber çözümlenerek düğümlere ait sıcaklık bilgileri elde edilmektedir.



Şekil 2: Çok katmanlı yalıtım battaniyesi modellemesi



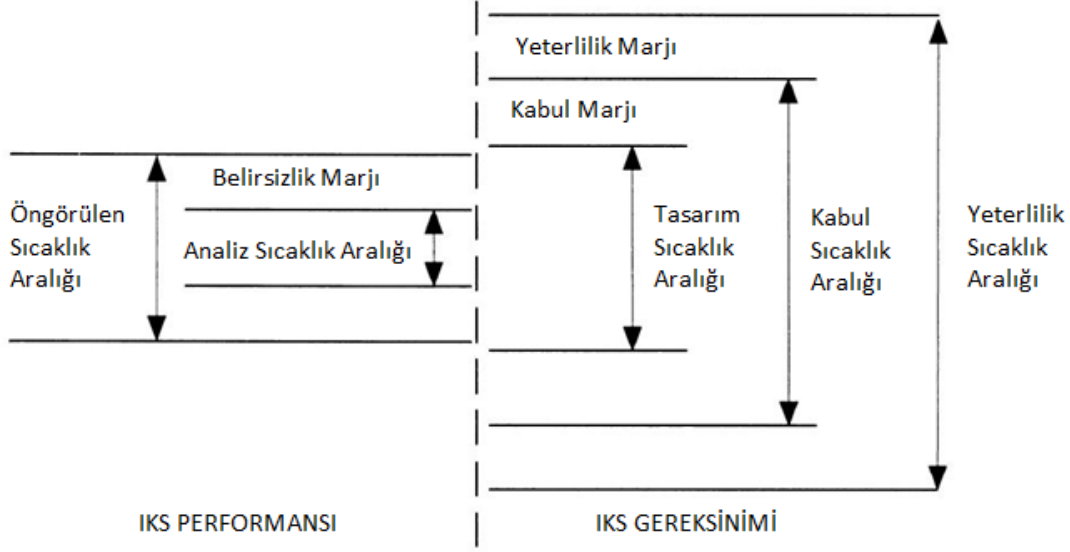
Şekil 3: Kutularla yapısal panel görünümü ve kutu geometrik modellemesi

Analizi gerçekleştirmek için gerekli olan ısı matematiksel model, tasarımı gerçekleştirecek yeterli minimum sayıda düğüm içermelidir ve analiz, tasarım ya da test aşamasında karşılaşılabilecek herhangi bir zorluk karşısında tasarımcının işini basitleştirebilmelidir [Gilmore, 2002].

## UYGULAMALAR

### Sıcaklık Aralıkları

Uydu ısı analizleriyle elde edilmesi beklenen sıcaklıklar ECSS-E-ST-31C standardı gereği belli aralıklar dahilinde kalmalıdır. Her bir ekipmanın sağlıklı bir şekilde çalışabildiği yeterlilik sıcaklık aralıkları kullanılarak analizlerde ulaşılmak istenilen sıcaklık aralıklarına (analiz sıcaklık aralığı) inilir (Şekil 2) [ESA, 2008].



Şekil 4: Uydu ısı kontrol sistemi sıcaklık aralıkları

Belirsizlik marjı ECSS-E-10-03A Testing standardı uyarınca  $10^{\circ}\text{C}$  alınmıştır [ESA, 2002]. Analizler sonucu elde edilen sıcaklıklara belirlenen belirsizlik marjı eklendiğinde elde edilen yörüngede öngörülen sıcaklıkların tasarım sıcaklık aralığı içerisinde kalması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan ekipmanlara ait yeterlilik sıcaklık aralıkları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Ekipman Yeterlilik Sıcaklık Aralıkları

Ekipman adı	Yeterlilik Sıcaklık Aralıkları ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	Operasyonel	Operasyon Harici
Yıldız algılayıcı	[-30, +60]	[-40, +70]
Jiroskop	[-20, +50]	[-30, +60]
Tepki tekeri	[-15, +65]	[-40, +80]
Manyetik tork çubuğu	[-50, +70]	[-55, +75]
Manyetometre	[-30, +60]	[-40, +85]
GPS	[-20, +50]	[-50, +80]
Pil bloğu	[-25, +35]	[-40, +40]
Uydu Bilgisayarı	[-20, +50]	[-20, +50]
S bant verici	[-20, +50]	[-20, +50]
S bant alıcı	[-20, +50]	[-20, +50]
X bant verici	[-20, +50]	[-20, +50]

### Isıl Analizlerin Gerçekleştirilmesi

Uydu ısıl kontrol sistemi tasarımını yönlendiren iki ayrı tasarım senaryosu bulunmaktadır. Bu senaryolardan ilki uydu üzerine düşen en yüksek dış ısı akısının olduğu ve radyatör alanlarının hesaplandığı sıcak durum senaryosudur. İkincisi uydu üzerine düşen en düşük dış ısı akısının olduğu ve gerekli ısıtıcı gücünün hesaplandığı soğuk durum senaryosudur. Isıl analizlerin başlatılabilmesi için bu iki tasarım senaryosu tanımlanmış ve uydunun diğer alt sistemlerinden bu senaryolara yönelik edinilen ısıl arayüz verileri (ekipman ısı yayınımları, ısıl-optik özellikler, ısı sızgıları, vs.) derlenmiştir.

Bir sonraki aşamada uydunun ısıl geometrik matematiksel modeli oluşturulmuştur. Soğuk durum için ömür-başı, sıcak durum için de ömür-sonu ısıl-optik özellikleri kullanılmıştır. Uydu ısıl analizinde kullanılan yüzey ısıl-optik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Yüzey ısıl-optik özellikleri

Kullanıldığı yüzey	Kaplama	Soğurma katsayısı ( $\alpha_s$ )		Yayınım katsayısı ( $\epsilon_{IR}$ )
		Ömür başı	Ömür sonu	
Çok Katmanlı Yalıtım Battaniyesi-dış katman	Kapton	0.46	0.51	0.77
Radyatör alanı	Gümüş kaplı Teflon bant	0.10	0.16	0.75
Uydu içi	Siyah boya	UD <sup>2</sup>	UD <sup>2</sup>	0.90

Tablo 3: Tasarım senaryoları parametreleri

	Sıcak Durum	Soğuk Durum
Güneşten Gelen Isıl Yük	1417 W/m <sup>2</sup>	1326 W/m <sup>2</sup>
Albedo Katsayısı	0.35	0.2
Dünya Sıcaklığı	252.4 K	261.55 K
Uzay Ortamı Sıcaklığı	4 K	

Geometrik model oluşturulması sonrasında sıcak durum ve soğuk durum için yörünge ve yönelim parametreleri Thermica v.3.2.20.1 yazılımında tanımlanarak modele ait ışınım değişim faktörleri ve düğümler üzerine düşen ısı akıları hesaplanmıştır (Tablo 3 ve Tablo 4).

Tablo 4: Yörünge parametreleri

Yörünge Tanımı	Güneşe Eş Zamanlı
İrtifa	700 km
Yörünge Eğimi	98.2°

<sup>2</sup> UD: Uygulanabilir Değil: Uydu içerisinde Güneş akısı alan bir bölge olmadığından soğurma katsayısı ışınım analizlerinde kullanılmamaktadır.

Yükseliş Noktası Yerel Zamanı (YNYZ)	10:30
Basıklık	0

Işınım analizleri sonrasında elde edilen ışınım bağları ve dış ısı akısı verileri kullanılarak ısı matematiksel model oluşturulmuştur. Düğüm bilgileri, ısı yayınımları, iletim bağları bilgileri ışınım dosyalarıyla beraber iskelet dosyasına eklenmiş ve çözüm SINDA/G yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Uydu ısı analizlerine sıcak durum analizleriyle başlanmıştır. Geometrik modelde ihtiyaç duyulan panellere konulan radyatör alanları dögüsel analizler sonrasında optimum değerlerini almıştır. Bu optimum radyatör alanları soğuk durumda kullanılmış ve uydunun gereksinim duyduğu ısıtıcı gücü hesabı yapılmıştır. Isıtıcı analizleri SINDA/G yazılımında termostat rutini kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Isıl analizlerden elde edilen en düşük ve en yüksek sıcaklıklar ile yörüngede öngörülen değerler Tablo 5'te ve Tablo 6'da sırasıyla sıcak durum ve soğuk durum için verilmiştir. Yörüngede öngörülen sıcaklıklar analizlerden elde edilen sıcaklıklara belirsizlik marjı eklenmesiyle bulunmaktayken, en yüksek ya da en düşük tasarım sıcaklıkları yeterlilik sıcaklık aralıklarından 5°C'lik yeterlilik ve 5°C'lik kabul paylarının çıkarılmasıyla bulunmuştur.

Tablo 5: Ekipman sıcaklıkları-Sıcak Durum

Ekipman adı	Zamana bağlı analiz sıcaklıkları		Yörüngede Öngörülen En Yüksek Sıcaklık	En Yüksek Tasarım Sıcaklık Değeri (°C)
	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)
Yıldız algılayıcı	31.4	32.5	42.5	50.0
Jiroskop	23.0	25.7	35.7	40.0
Tepki tekeri	29.8	31.3	41.3	55.0
Manyetik tork çubuğu	24.8	28.0	38.0	60.0
Manyetometre	21.9	29.7	39.7	50.0
GPS	23.6	28.3	38.3	40.0
Pil bloğu	24.5	25.4	25.4	25.0
Uydu Bilgisayarı	25.0	29.5	39.5	40.0
S bant verici	23.3	28.8	38.8	40.0
S bant alıcı	25.1	27.2	37.2	40.0
X bant verici	17.1	26.3	36.3	40.0

### Analiz Sonrası

Analizler sonrasında incelenmesi ve doğrulanması gereken çıktılar geometrik matematiksel model çıktıları ve ısı matematiksel model çıktıları olmak üzere iki başlık altında isimlendirilebilir.

Tablo 6: Ekipman sıcaklıkları-Soğuk Durum

Ekipman adı	Zamana bağlı analiz sıcaklıkları		Yörüngede Öngörülen En Düşük Sıcaklık	En Düşük Tasarım Sıcaklık Değeri (°C)
	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>max</sub> (°C)	T <sub>min</sub> (°C)	T <sub>min</sub> (°C)
Yıldız algılayıcı	3.4	3.8	-6.6	-30.0
Jiroskop	5.9	6.6	-4.1	-20.0
Tepki tekeri	10.8	12.0	0.8	-30.0
Manyetik tork çubuğu	6.7	8.8	-3.3	-40.0
Manyetometre	12.7	18.3	2.7	-20.0
GPS	5.1	5.6	-4.9	-40.0
Pil bloğu	18.0	18.6	18.0**	18.0**
Uydu Bilgisayarı	1.1	3.0	-8.9	-10.0
S bant verici	4.2	4.9	-5.8	-10.0
S bant alıcı	6.6	7.6	-3.4	-10.0
X bant verici	-0.5	0.4	-10.5	-10.0

\*\*Pil blokları için ısıtıcılar 18°C-23°C arasında kontrol sağlamaktadır.

**Geometrik matematiksel model çıktıları:** Thermica yazılımı tarafından yörüngedeki ışınlam analizi sonrası oluşturulan .MLIS ve .FLIS dosyalarıdır. Bu dosyalar uydudaki her bir düğümüne ait ışınlam değişim faktörlerini ve soğurulan dış ısı akısı değerlerini içermektedir. Her bir düğüm için hesaplanan ışınlam değişim faktörü hata yüzdelerine ait grafikler de yine bu dosyalarda bulunmaktadır.

.MLIS dosyası ışınlam değişim faktörleri hesaplama parametrelerini, yörünge parametrelerini, geometrik modele ait modelleme parametrelerini, ısı düğüm tanımlamalarını, yörünge simülasyonları için zaman aralıklarını, yüzey çakışmalarını, geometrik görünüm faktörlerini, kızılötesi Gebhart ve solar Gebhart faktörlerini ve bu faktörler hesaplanırken oluşan hata yüzdelerini içermektedir. Bu dosya kontrol edilirken ilk bakılması gereken değer geometrik görünüm faktörlerinin ve Gebhart faktörlerinin toplamının 1 veya 1'e yakın olmasıdır. Bu değer 1'den çok farklı ise geometrik modellemede hata yapılmış olduğu söylenebilir. Ayrıca birbirlerini görmeyen iki ekipmanın düğüm numaraları arasında görünüm ya da Gebhart faktörü yazılmışsa, aktif olmayan bir yüzeye ait bu değerlerden herhangi biri mevcutsa veya % RMS (Root Mean Square) ve en yüksek hata değeri belirlenmiş bir değer üstündeyse yine modelleme gözden geçirilmelidir. Bu çalışmada .MLIS dosyasındaki görünüm faktörleri ve Gebhart faktörleri için hesaplanmış RMS ve en yüksek hata yüzdelerine bakıldığında en yüksek değer % 0.84 olduğu ve bunun da geometrik modellemenin doğru olduğunu gösteren kabul edilebilir bir değer olduğu söylenebilir.

.FLIS dosyası ise ısı düğümler üzerine düşen dış ısı akısını ve bu akının ne kadarının emildiğini gösteren dosyadır. Hem zamana bağlı hem de ortalama değerleri içerir. Bu dosya verileri içerisinde kontrol edilmesi gereken en önemli nokta uydu içerisinde bulunan ısı düğümlerin hiçbir şekilde dış ısı akısı almamış olmaları gerektiğidir. Değer çok küçük dahi olsa geometrik

modellemede hata olduğunu gösterir. Ayrıca radyatör alanları üzerine düşen dış ısı akılarının hesabı da .FLIS dosyasındaki veriler kullanılarak hesaplanabilir.

**Isıl matematiksel model çıktıları:** SINDA/G yazılımı tarafından oluşturulan ve sıcaklık bilgilerini içeren .sot dosyasıdır. Isıl matematiksel model çıktılarında dikkat edilecek hususlar; birbirlerine yakın olan ekipmanların sıcaklık değerlerinin birbirlerinden kabul edilemeyecek şekilde farklı olmaması, radyatör alanlarının soğurduğu ısı akısı değerlerinin doğru hesaplanması ve dolayısıyla enerji dengesinin doğrulanması, panel sıcaklık dağılımının kabul edilebilir olması ve ekipmanların/yapısal parçaların net enerji birikiminin incelenerek ekipmanın sıcaklık profilinin doğrulanması gibi durumlardır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen ısıl analizler sonrasında elde edilen sıcak durum ve soğuk durumlara ait .sot dosyaları incelendiğinde sıcaklık sonuçlarının kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen toplam radyatör alanı  $0.76 \text{ m}^2$ 'dir. Sıcak durum için hesaplanan bu radyatör alanı hiçbir ekipmanın tasarım üst sınır sıcaklıklarını geçmesine izin vermemiştir. Soğuk durumda ise kullanılan ısıtıcıların, ekipmanların tasarım alt sınır sıcaklıklarının altına inmesini engelleyecek şekilde yeterli olduğu görülmektedir.

## SONUÇ

Bu çalışmada alçak irtifaya sahip bir yörüngede görev yapan örnek bir yer gözlem uydusuna ait ısıl modelleme ve analiz basamakları anlatılmış, iki ayrı tasarım senaryosu dikkate alınarak gerçekleştirilmiş analizler sonrasında elde edilen sıcaklıklar, radyatör alanları ve ortalama ısıtıcı gücü değerleri verilmiştir. İleriki dönemde benzer yaklaşımın farklı alçak irtifa yörüngelerinde ve yer durağan yörüngede görev yapan uydulara uygulanması planlanmaktadır.

## Kaynaklar

ESA-ESTEC Gereksinimler ve Standartlar Bölümü, 2002. ECSS-E-10-03A Space Engineering – Testing, ESA Yayın Bölümü, Hollanda, s.138.

ESA-ESTEC Gereksinimler ve Standartlar Bölümü, 2008. ECSS-E-ST-31C Space Engineering-Thermal Control General Requirements, ESA-ESTEC Gereksinimler ve Standartlar Bölümü, Hollanda, Sürüm 2, s.9-15.

Gilmore D. G., 2002. Spacecraft Thermal Control Handbook - Fundamental Technologies, The Aerospace Press, Kaliforniya, Cilt.2, s.534-537.