

UYDU ISIL KONTROL SİSTEMİNDE IŞINIM İLE ISI TRANSFERİNDE MONTE CARLO YÖNTEMİ

Enis SARIKAYA^{*}, Murat BULUT[†]
Türksat A.Ş., Ankara

Nedim SÖZBİR[‡] ve Şenol GÜLGÖNÜL[§]
Türksat A.Ş., Ankara

ÖZET

Uyduların ısı kontrol sisteminde uydu üzerinde yer alan ekipmanların güvenilir sıcaklık aralıklarında çalışmaları için ışınım ile ısı transferi önem arz etmektedir. Işınım ile ısı transferi hesaplarında kullanılan en önemli yöntemlerden bir tanesi Monte Carlo yöntemi olup uydu sıcaklıklarının hesaplanması için ticari firmalar tarafından geliştirilen yazılımlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Monte Carlo yöntemi ile ışınım ile ısı transferinde hesaplanması zor olan ve belirsiz olan karmaşık problemi basitleştirilir. Monte Carlo yöntemi fiziksel değişkenleri rasgele olarak ışınım ile ısı transferi çözümleri için en iyi tahmin varyasyonlarında bulunur ve ayrıca da ısı transferi için olasılık fonksiyonunu modelleme uygulamasıdır. Bu yayında Monte Carlo yöntemi genel hatları ile anlatılmış ve örneklemeler ile uyduların sıcaklık hesaplamalarında kullanılışı gösterilmiştir.

SİMGELER

F	=	görüş (şekil) faktörü
k	=	ısı iletim katsayısı, W/m*K
K	=	ısı iletim matrisi, W/K
Mc	=	ısı kütle, J/K
MCRT	=	monte carlo ray tracing
REF	=	ışınım değişim faktörü
Q	=	ısı, W
q	=	ısı akısı, W/m ²
T	=	sıcaklık, K, °C
t	=	zaman, s
α	=	yüzey soğurulma katsayısı
ε	=	yüzey yayınlama katsayısı
∑	=	ışınım değiştirme faktörü
σ	=	Stefan _ Boltzmann katsayısı

Üst simge

A	=	albedo ile ilgili
d	=	üretilen ısı
E	=	dünya ışınımı
r	=	ışınım ile ilgili

* Nükleer Mühendis.,Uydu Kontrol Direktörlüğü ., E-posta: eniss@turksat.com.tr

† Kıdemli Uzman, Uydu Montaj Entegrasyon ve Test Direktörlüğü., E-posta: muratbulut@turksat.com.tr

‡ Danışman., ArGe ve Uydu Tasarım Direktörlüğü., E-posta: nsozbir@turksat.com.tr

§ Genel Müdür Yardımcısı., E-posta: sgulgonul@turksat.com.tr

S,s = güneş ışınımı

GİRİŞ

Isıl kontrol uydunun verimli çalışması için gerekli alt sistemlerden biridir. Uyduda yer alan her bir ekipmanın güvenilir çalışma sıcaklığı farklı olup ısı kontrol alt sistemi yardımı ile çalışması sağlanmaktadır. Ekipmanların maksimum performans da çalışmalarını sağlamak ısı kontrol sisteminin görevleri arasında yer almaktadır. Ekipmanların çalışmaları için gerekli sıcaklık aralığı oluşturulamaz ise performanslarında düşme ya da ekipmanı kaybetme riski oluşabilir. Örnek olarak pillerin ömrü çalışma sıcaklığı ile yakından ilişkilidir. Pillerinin ömürlerini uzun tutmak için ekipman üretici firması tarafından belirtilen sıcaklıkta tutulması gerekmektedir. Aksi durumda çok soğuk ve çok sıcak ortamlarda piller boşalıp dolarken sıcaklık farkının fazla olmasından dolayı pillerin ömründe azalma olacaktır. Uydunun itki alt sisteminde verimli yanmasının gerçekleşebilmesi için gerek yanıcı gerekse yakıcı yakıtların belirli sıcaklık aralığında tutulması gerekmektedir. Uyduda yer alan mekanik ve yapısal ekipmanlar ani sıcaklık değişimlerinde termal strese maruz kalmaktadır. Termal stresin en aza indirgenmesi için ısı kontrol sistemi ile gerekli önlemler alınmaktadır.

Isıl kontrol sistemi uyduyu örümcek ağı gibi saran ısı kontrol mekanizması olup sistemden kaynaklanan bir sorun oluşması durumunda ekipmanların çalışmasını etkileyeceğinden uydunun görevini yerine getirememesine neden olmaktadır.

Uyduların tasarımı yapılırken uydunun yapısının ve ekipmanların uydunun ömrü boyunca yüksek performans da çalışmalarını için ısı kontrol sistemi büyük önem arz etmektedir. Isıl kontrol sistem tasarımı aşamasında ekipmanların ürettiği ısı yükü ya da uzayda çevresel kaynaktan ısının transfer edilmesi için ısının izleyeceği yol belirlenir. Bütün uydunun enerji denge hesaplaması yapıldıktan sonra ve her bir ekipman ve alt sistemler için uygun sıcaklık aralıkları belirlenip ısıya mı ihtiyacı var yoksa ısıyı atmaya mı ihtiyacı var belirlenip tasarımı yapılır.

Uyduda, hem uydudan kaynaklı hem de dışarıdan gelen ısı yükü bulunmaktadır. Uydunun kendi içerisindeki ısı üretimi elektronik cihazlardan kaynaklanmaktadır. Dışarıdan gelen ısı yükü ise güneşten, dünyadan ve dünyadan yansıyan ısı yükleridir. Uyduda ekipmanların bir kısmı ısıya ihtiyaç duyarken diğer kısmı da fazla ısıyı atmaya ihtiyaç duyan sistemlerle doludur. Aktif ve pasif kontrol sistemler ile sağlanmaktadır. Pasif kontrol sistemi doğal yollarla çalışan sistemdir. Aktif kontrol sistemi ise elektrikle çalışan sistemdir.

Uydu ısı kontrolünde iletim, taşınım ve ışınım ile ısı transferi gerçekleşmektedir. Taşınım ile ısı transferi iletim ve ışınım ile ısı transferine oranla daha küçük bir yer kaplamaktadır. Taşınım ile ısı transferi fırlatma anında uydunun vakum ortamına kadar geçen sürede dikkate alınmaktadır. İletim ile ısı transferi uyduda ısı boruları, ısı yutucu (heat sink), petek (honeycomb) yapı, ısı iletim katsayısı (thermal conductivity-k) yüksek yapıştırıcılar gibi ekipmanlar kullanılarak yapılmaktadır. Işınım ile ısı transferinde görüş faktörü (F), yüzey soğurulma (α) ve yüzey yayınlama (ϵ) katsayıları önemlidir. Özellikle görüş faktörünün hesaplanması basit geometrik modeller için kolay olmaktadır. Karmaşık geometrik modeller için çeşitli metotlar kullanılmaktadır. Bunlardan Monte Carlo metodu en yaygın olanıdır. Monte Carlo metodu kullanılarak elde edilen değerler ısı matematiksel modelde kullanılarak her bir ekipman için sıcaklık değerleri hesaplanmaktadır.

ISIL MATEMATİKSEL MODEL

Isıl matematiksel modelleme ısı kontrol sistemin tasarımdan sonraki en önemli adımıdır. Isıl matematiksel modellemede enerjinin korunumu göz önüne alınarak yapılmaktadır. Uydunun uzayda vakum ortamında enerji dengesi sadece iletim ve ışınım ile ifade edilmektedir. Taşınım ile ısı transferi olmadığından enerji denge denkleminde taşınım ifadesi yer almamaktadır. Uydularda yer alan ekipmanların sıcaklıkları enerji (ısı) balansı denkleminin çözümünden elde edilmektedir. Bu sebeple uydunun her eleman için enerji denklemi yazılır. Bu denklem iletim, ışınım terimleri ve sınır şartlar (albedo, güneş, dünya ışınımı) ile oluşur. Bu denklem aşağıdaki gibi yazılabilir [Bulut, Demirel, Gülgönül ve Sözbir, 2008; Karam, 1998; Okan, Çelenligil ve Tekinalp 2001].

$$(Mc)_i \frac{dT_i}{dt} = Q_i^d + (\alpha^s A^s q^s + \alpha^A A^A q^A + \varepsilon A^E q^E)_i - \sum_j \mathfrak{T}_{ij} A_i^r (\sigma T_i^4 - \sigma T_{jr}^4) - \sum_j K_{ij} (T_i - T_{jk}) \quad (1)$$

Denklemin sol tarafı uydu elemalarının ısı kapasitansını gösterir. Sağ taraftaki ilk terim çalışma yükünü, ikinci terim net soğurulan ısıyı, ve üçüncü terim ışınlama uzaya atılan ısıyı ve son terimde iç ısı iletimini gösterir.

Denklemden yer alan katsayılar doğrusallaştırılmış bağımsız veya bağımlı katsayılardır. T_i sıcaklığındaki bir izoisil i cismi için ısı kütle $(Mc)_i$ ve yüzey radyatör alanı (A_i^r) , uydunun tüm bölgesi için geçerli bir durumdur. Q_i^d uydu da yer alan ekipmanların ürettiği ısıdır. Işınlama j'ye (T_{jr} sıcaklıklarında) değişim faktörleri \mathfrak{T}_{ij} ile, ve j'ye iletimle (T_{jr} sıcaklıklarında) iletim matrisi K_{ij} (W/K) ile net ısı transferidir. A^s , A^A , ve A^E doğrudan gelen güneş, dünyadan yansımaya gelen (albedo) ve doğrudan dünyadan yayılan kızılötesi ışınlama ile ilgili alanlardır. (α) Güneş soğurulma ve (ε) yayınlama katsayılarıdır.

MONTE CARLO METODU

Monte Carlo Metodu ilk 1970 yıllarda havacılık sektöründe başlamış ve günümüzde de uzay ve havacılık sektöründe kullanılmaya devam edilmektedir. 1970 yıllarda NEVADA Monte Carlo kodu olarak ticarileşmiştir. 1990 yıllarında havacılık ve uzay sektöründe yer alan firmalar Monte Carlo kodlarını aktif olarak kullanmaya başlamışlardır.

Analitik olarak ışınlama ile ısı transferinin çözümü belli durumlar için yapılabilir ve bunlarda basit geometriler içindir. Karışık problemler de nümerik sonuçlara ihtiyaç duyulur. Nümerik sonuçların elde edilmesinde sonlu fark, sonlu hacim ve sonlu eleman yöntemleri kullanılmaktadır. Işınlama ile ısı transferi çözümü için bu nümerik sonuçların alternatifi ise Monte Carlo metodudur.

Monte Carlo metodu, bir olasılık dağılımı veya olasılık dağılımları, bir çözüme ulaşmak için fiziksel sorunu yöneten parametrelerin temsilcisi olarak kullanılmaktadır. Metot en iyi fiziksel işlemlere uygundur ve en iyi tahmin varyasyonuna sahiptir. Işınlama ile ısı transferi de bu işlemlerden biridir. Işınlama ile ısı transferi için Monte Carlo uygulaması sadece olasılık fonksiyonunu veya yeterince ısı transferi esaslarını modellemek için fonksiyonların seçimi ve uygulamasıdır. Monte Carlo yöntemi ışınlama ile ısı transferi problemlerinin çoğunluğunda uygulanmakta ve karışık geometriye örnek olarak ve kolayca diğer çözüm yöntemlerine (sonlu farklar, sonlu elemanlar) entegre edilmektedir. İki yüzey arasındaki ışınlama ile ısı transferinde konum faktörü hesaplaması yapılmaktadır. Sonuç için nerelerde ne kadar olduğu bilinmeyen ışınlama ile taşıma ya da iletim ısı transfer oranları için, konum faktörü probleminde sonlu eleman gösterimin içine dâhil edilir.

UYDU ISIL TASARIM VE ANALİZLERDE KULLANILAN YAZILIMLAR

Karışık problemlerde analitik çözüm için nümerik hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle uydunun ısı kontrol sistemi ile sıcaklıkların hesaplanması ticari yazılımlar kullanılarak yapılmaktadır. Uydu üretimi yapan firmalar tarafından yaygın olarak kullanılan yazılımlar ve bu yazılımlarda uygulanan sayısal metotlar aşağıda yer almaktadır.

- THERMICA= Toplu Parametre (Lumped-Parameter)
- ESATAN-TMS = Toplu Parametre (Lumped-Parameter) / Sonlu Farklar (Finite Difference)
- Thermal Desktop = Sonlu Farklar (Finite Difference) / Sonlu Elemanlar (Finite Element)
- TRASYS= Toplu Parametre (Lumped-Parameter)

Thermal Desktop C&R Technologies (Cullimore and Ring Technologies, Inc.) firmasına ait uydu termal analizlerinde kullanılan programdan biridir. RadCAD, Thermal Desktop programına ait bir

termal ışınım analiz modülüdür. RadCAD modülünde Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) metodu kullanılmaktadır. RadCAD, CAD tabanlı bir program olup ışınım değişim faktörlerin (radiation exchange factors), görüş faktörlerin (view factors), Dünya'dan gelen ve Dünya dışında başka gezegenler den ve güneşten gelen ışınım nedeniyle oluşan ısıl yüklerin hesaplamasında kullanılmaktadır. RadCAD programı keyfi oluşturulan yüzey ile benzer parametrik yüzeyleri (TRASYS benzeri) entegre eden ilk ışınım programdır.

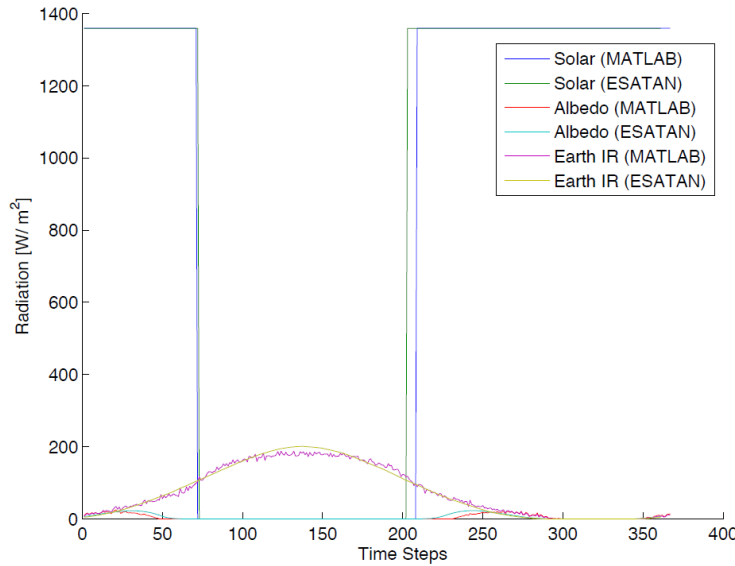
Esatan TMS programı ITP Engines UK ltd firmasına ait olup Workbench, Thermal (ESATAN), ThermNV, ThermXL, Fluids, Radiative ve Mission alt bileşenlerinden oluşmaktadır. Radiative modül' de yer alan MCRT metodu kullanıp görüş faktörleri veya ışınım değişim faktörlerini (REFs) hesaplamaktadır.

SINDA/THERMICA uydu termal tasarım ve analizlerinde yaygın olarak kullanılan yazılım programlarıdır. SINDA MSC software firmasına ait, THERMICA Astrium EADS firmasına ait programdır. THERMICA Avrupa'da MCRT metodunu kullanan ilk yazılım programıdır. Işınım değişim faktörlerini, Güneş ısı yüklerini, Dünya ısı yüklerini hesaplamak için kullanılmaktadır.

The Thermal Radiation Analyzer System (TRASYS) 1960 yılında Lockheed Martin tarafından geliştirilmiş ve şu anda NASA ' ya ait programdır. NASA Johnson Space Center tarafından yazılım üzerinde geliştirmeler devam etmektedir. 1980 yıllarında MCRT metodu TRASYS yazılımda kullanılmaya başlanmıştır. TRASYS, yörüngede yer alan uzay aracı için gerekli olan ısıl ışınım çevresel durumları hesaplamaktadır.

MONTE CARLO UYGULAMALARI

Uyduların ısıl analizlerinde çevresel ışınım olarak, doğrudan gelen güneş ısı yükü, dünyadan yansarak gelen (albedo) ısı yükü ve doğrudan dünyadan yayılan kızılötesi ısı yükü göz önüne alınır [Bulut, Kahrıman ve Sözbir, 2010]. Yerle dönen uyduların Şekil 1 ' de çevresel ışınım (Güneş, Dünya'dan yansıyan ve albedo) analizlerinin karşılaştırılması ESATAN-TMS programı ve MATLAB programında Monte Carlo yöntemi kullanılarak yazılan kod ile çözümlemesi görülmektedir. ESATAN-TMS programında yüzeylerden 10,000 ışın ateşleme yapılmıştır [Reiss, 2012]. MATLAB programında Monte Carlo yönetiminde ise 500 ışın ateşlemesi yapılmıştır [Reiss, 2012]. Işın sayısının artması ile birlikte eğrinin daha düzgün olduğu görülmektedir.



Şekil 1: Monte Carlo Uygulaması [Reiss, 2012]

Şekil 1 uydunun yüzeyinin aldığı radyasyonu miktarı göstermektedir. Uydunun yüzeyine gelen ışın sayısı arttıkça ESATAN-TMS programının eğrisinin daha düzgün olduğu görülmektedir. MATLAB programında ray tracing yöntemi kullanılarak yazılan kod ile çözümlemesi yapıldıktan sonra

güneşten gelen ısı yükü farkı daha küçük ama dünyadan gelen ısı yükü farkı daha büyüktür. Güneşten gelen ısı yükünün sapması 1 W/m^2 den küçüktür. Dünyadan gelen albedo ve kızıl ötesi ışınlarının hata payı yaklaşık olarak %12'dir. Dünyadan gelen ısı yükünün hata payını azaltmak için uydunun dünyaya baktığı yüzeyin normali dünyaya göre olabildiğince eğik olmalıdır. Güneşten gelen ısı yüküyle dünyadan gelen ısı yükünün hata paylarını karşılaştırdığımızda birbirlerine eşittir ve bunun nedeni de görüş faktörüdür. Uydunun çalışma periyodunun son bölümünde görüldüğü üzere ESATAN-TMS programının sonuçları daha sürekli olarak görülmektedir.

SONUÇ

Işınım ile ısı transferi uyduların ısı kontrolünde önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Işınım ile ısı transferinde yer alan değişken parametrelerin direk olarak hesaplanması zordur. MCRT metot ile ışınım ile ısı transferi hesaplamalarında zor olan bu parametrelerin nümerik olarak hesaplanmasını sağlayan yöntemdir. Uzayda yer alan uyduların tam olarak ışınım miktarı bilinmeyen durumlarda Monte Carlo yöntemi ile olasılık fonksiyonu modellemesi yapılarak ışınım ile ısı transferi hesaplaması yapılmaktadır. Monte Carlo yöntemi karmaşıklığı basitleştirerek bilinmeyen fiziksel değişkenleri rasgele tanımlamakta ve olasılık fonksiyonu modellemesi yapmaktadır. Bu yayında MCRT metodunun uydulardaki uygulamaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Kaynaklar

Bulut, M., Demirel, S., Gülgönül, Ş. ve Sözbir, N., 2008. Battery Thermal Design Conception of Turkish Satellite, 6th International Energy Conversion Engineering Conference (IECEC), Cleveland, Ohio, 28 - 30 Haziran

Karam, D.R., 1998. *Satellite Thermal Control for System Engineers*, AIAA, Inc.,VA

Okan, A., Çelenligil, M.C., Tekinalp, O., 2001. *Uyduların Isıl Kontrolü ve Isıl Analizlerinde Kullanılan Yöntemler*, 1. Uluslararası Uzay sempozyumu, Ankara, Türkiye, S. 435-442, Mayıs

Reiss, P., 2012. *New methodologies for the thermal modelling of cubesat*, 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Utah State University in Logan, Utah, USA, 13-16 Ağustos.

Williams, J. R., 2009. *Application of the monte carlo method to the simulation of thermal radiation heat transfer in a Simple gas turbine combustor*, Thesis, s.11-20