

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİF ESASLI YALITIM MALZEMELERİNDE
ISI GEÇİŞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Can GÜÇLÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Haziran 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİF ESASLI YALITIM MALZEMELERİNDE
ISI GEÇİŞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali Can GÜÇLÜ
503091175**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seyhan Uygur Onbaşıoğlu

Haziran 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü’nün 503091175 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ali Can GÜÇLÜ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**LİF ESASLI YALITIM MALZEMELERİNDE ISI GEÇİŞİNİN İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İsmail Cem Parmaksızoğlu**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hale Canbaz KARAKAŞ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **02 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **05 Haziran 2012**

Ailem ve dostlarıma,

ÖNSÖZ

Lif esaslı yalıtım malzemeleri, özellikle enerji verimliliği ve malzemelerin korunması konusunda çok büyük önem taşımaktadır. Bu yüzden, bu malzemelerin ısı özelliklerinin incelenmesi bu çalışma ve benzer pek çok çalışmaya konu olmuştur.

Bu çalışmada, öncelikle, bilgisini ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Seyhan Uygur ONBAŞIOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, tüm yüksek lisans eğitimim boyunca çalışmalarına sıkıntısız devam etmemi sağlayan PİM Mühendislik Ltd. Şti. teknik müdürü Sayın İbrahim KARAKAŞ'a ve başta teknik ofis şefim Dr. Zozan TÜRKGENÇ olmak üzere tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Son olarak, yaptığım her şeyde katkıları olan, ailem ve dostlarıma sonsuz saygılarımı sunarım.

Mayıs 2012

Ali Can GÜÇLÜ
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
1.3 Hipotez	4
2. MONTE CARLO YÖNTEMİ.....	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Olasılık Dağılım Fonksiyonları	8
2.2.1 Işın yayılma noktasının örneklenmesi.....	10
2.2.2 Işın Yönünün Bulunması	12
2.3 Işın İzleme	16
2.4 Lif Esaslı Yalıtım Malzemelerini Oluşturan Temel Geometriler İçin Elde Edilen Monte Carlo Yönteminin Doğrulanması	19
2.4.1 Sonsuz uzunluklu paralel düz levha ile çizgisel eleman arası şekil faktörü değerinin bulunması.....	20
2.4.2 Sonsuz uzunluklu birbirine dik yüzeyler arası şekil faktörü değerinin bulunması.....	21
2.4.3 Sonsuz uzunluklu silindir ve sonsuz uzunluklu yüzey arası şekil faktörü değerinin bulunması.....	22
2.4.4 Sonsuz uzunluklu paralel silindirler arası şekil faktörü değerinin bulunması.....	23
2.4.5 Sonuç.....	23
3. LİF ESASLI YALITIM MALZEMELERİNDE IŞINIMLA ISI GEÇİŞİ	25
3.1 Giriş.....	25
3.2 Geometrik Yansıma Bölgesinde Monte Carlo Metodu Kullanılarak Işınımın Isı	

Geçişinin Bulunması	29
3.3 Mie Saçılması Bölgesinde Monte Carlo Metodunun Kullanımı	33
3.3.1 Giriş.....	33
3.3.2 Faz fonksiyonları.....	38
4. DİĞER ISI GEÇİŞİ MEKANİZMALARI	43
4.1 Lif Esaslı Yalıtım Malzemelerinde Gaz İletimi ile Isı Geçışı	43
4.2 Lif Esaslı Yalıtım Malzemelerinde Katı İletimi ile Isı Geçışı.....	44
4.3 Gaz İletimi ve Katı İletimi ile Isı Geçışı Katsayılarının Toplanması	44
5. UYGULAMALAR VE KARŞILAŞTIRMA.....	47
5.1 Geometrik Yansıma Bölgesinde Yapılan Çözümleme ve Sonuçlar	47
5.1.1 Çalışma düzeneği ve kabuller	48
5.1.2 Sonuçlar.....	48
5.2 Mie Saçılması Bölgesinde Yapılan Çözümleme ve Sonuçlar	51
5.2.1 Çalışma düzeneği ve kabuller	52
5.2.1 Sonuçlar.....	54
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
6.1 Öneriler.....	63
6.2 İleri Çalışmalar	63
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

MC	: Monte Carlo
MCII	: Monte Carlo Işın İzleme
HG	: Hanyey-Greenstein
MATLAB	: Matrix Laboratory
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
SVF	: Solid Volume Fraction

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Sonsuz uzunluklu paralel düz levha ve çizgisel eleman arası şekil faktörü değerinin bulunuşu	20
Çizelge 2.2 : Sonsuz uzunluklu birbirine dik yüzeyler arası arası şekil faktörü değerinin bulunuşu	21
Çizelge 2.3 : Sonsuz uzunluklu silindirik ve düz yüzeyler arası arası şekil faktörü değerinin bulunuşu	22
Çizelge 2.4 : Sonsuz uzunluklu paralel silindirler arası arası şekil faktörü değerinin bulunuşu	23
Çizelge 3.1 : Boyut parametresine göre saçılım tipleri.....	25
Çizelge 3.2 : Lif çapı ve sıcaklığa göre saçılım tiplerinin oranları.....	27
Çizelge 3.3 : Legendre Katsayıları	40

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 :	Örnek bir lif esaslı malzemede ısı geçişi mekanizmaları.....	3
Şekil 2.1 :	Geleneksel Yöntem ile MC yöntemi karşılaştırması	7
Şekil 2.2 :	MC metodunun örneklerle açıklanması	9
Şekil 2.3 :	Olasılık dağılım fonksiyonları.....	10
Şekil 2.4 :	Işın yayılma noktasının gösterimi.	12
Şekil 2.5 :	Işın yayılımının vektörel gösterimi	12
Şekil 2.6 :	Yaygın ışın yayan yüzeyden ışın yayılımı.	13
Şekil 2.7 :	a) 3 boyutlu geometride ışın yönünün gösterimi b) 2 boyutlu geometride ışın yönünün gösterimi.	17
Şekil 2.8 :	MCIİ yöntemi için gerekli doğru denklemleri	18
Şekil 2.9 :	Çizgisel elemandan sonsuz uzunluklu paralel düz levhaya ışıınım	20
Şekil 2.10 :	Birbirine dik yüzeyler arası ışıınım.....	21
Şekil 2.11 :	Sonsuz uzunluklu silindirik ve düz yüzeyler arası ışıınım.....	22
Şekil 2.12 :	Sonsuz uzunluklu paralel silindirler arası ışıınım	23
Şekil 2.13 :	Şekil Faktörü Hesabı Akış Şeması.	24
Şekil 3.1 :	Ortalama yalıtım malzemesi sıcaklığı ve lif çapına göre uygulanacak çözüm yöntemi.....	28
Şekil 3.2 :	Geometrik yansıma bölgesinde rasgele sayılar ilişkisine göre oluşturulan iç yapı ve ışın demetinin davranışı.....	29
Şekil 3.3 :	Geometrik yansıma bölgesinde ısı geçişinin bulunması	31
Şekil 3.4 :	Şekil Faktörleri ve lif sıcaklıklarının bulunması	33
Şekil 3.5 :	Mie Saçılımı bölgesinde ışın demetinin hareketi	34
Şekil 3.6 :	Mie çözümü için akış diyagramı	37
Şekil 3.7 :	Mie bölgesinde eşdeğer ışın seçiminin gösterimi	38
Şekil 3.8 :	Saçılma tiplerinin faz fonksiyonu grafiğinde örnek gösterimleri: a) İzotropik b) İleri yönlü c) Geri yönlü.....	39
Şekil 3.9 :	Faz Fonksiyonları.....	41
Şekil 5.1 :	Yalıtım malzemesi boyunca sıcaklık değişimi	49
Şekil 5.2 :	Değişik SVF oranlarına sahip malzemelerin ısııl enerji geçirgenliğinin malzeme kalınlığı ile değişimi	49
Şekil 5.3 :	Farklı lif absorbtivite değerlerinde ısııl geçirgenlik	50

Şekil 5.4 : Absorbtivite ve katı oranı terimlerinin ışınlama ısı geçişine etkisi.....	51
Şekil 5.5 : Yalıtım malzemesi lif çapının ısı geçişine etkisi.....	51
Şekil 5.6 : Daryabeigi deney düzeneği şeması	52
Şekil 5.7 : Tong deney düzeneği şeması.....	54
Şekil 5.8 : Farklı faz fonksiyonları için ısı geçişinin incelenmesi	55
Şekil 5.9 : Isı geçişi terimlerinin toplam ısı geçişine etkisi	56
Şekil 5.10 : Katı iletimi ile gaz iletiminin toplam iletme etkisi.....	56
Şekil 5.11 : Değişik yoğunluklardaki ve kalınlıktaki lif esaslı yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı eşdeğer ışınlama ısı iletimi katsayısı	57
Şekil 5.12 : Ortam basıncının ısı geçiş katsayısına etkisi	58
Şekil 5.13 : Örnekleme sayısı-hata oranı- süre grafiği	59
Şekil 5.14 : 2.54 cm’lik örnek için vakum ortamında gözlenen ısı akısı.....	59
Şekil 5.15 : 4.06 cm’lik örnek için vakum ortamında gözlenen ısı akısı.....	60
Şekil 5.16 : 2.54 cm’lik örnek için 1 atm basınçta gözlenen ısı akısı.....	60
Şekil 5.17 : 4.06 cm’lik örnek için 1 atm basınçta gözlenen ısı akısı.....	61
Şekil 5.18 : Farklı albedo değerleri için yalıtım malzemesinde ısı iletim katsayısı değişimi	61

SEMBOL LİSTESİ

C_j	: Legendre katsayıları
d_f	: Yalıtım malzemesi ortalama lif çapı, μm
d_g	: Gaz çarpışma çapı, m
e	: Işınım gücü, W/m^2
e_0, e_1	: Kaybolma katsayısı katsayıları
E	: Hata oranı
f	: Yalıtım malzemesi yoğunluğunun, lif malzemesi yoğunluğuna oranı
f_a	: Lif absorptivite değeri
F	: Şekil faktörü
F'	: Isı kaynağı-ısı kuyusu arası şekil faktörü
g	: HG katsayısı
i	: Toplam ışıınım yoğunluğu, $W/m^2.sr$
i_n	: Normal doğrultusundaki toplam ışıınım yoğunluğu, $W/m^2.sr$
$k_{ışıınım}$	: Eşdeğer ışıınımla ısı iletimi katsayısı, $W/m.K$
k_{iletim}	: Isı iletimi katsayısı (katı+gaz), $W/m.K$
k_g	: Gaz ısıl iletkenlik katsayısı, $W/m.K$
k_g^*	: Atmosfer basıncındaki gaz ısıl iletkenlik katsayısı, $W/m.K$
k_s	: Katı ısı iletimi katsayısını, $W/m.K$
k_s^{**}	: Lif ana malzemesinin ısı iletim katsayısı
K	: Eşdeğer Toplam Isı İletim Katsayısı, $W/m.K$
K_B	: Stefan-Boltzmann sabiti
K_e	: Kaybolma katsayısı
Kn	: Knudsen sayısı
$L_{ü}, L_a$	: Işın demeti üst ve alt sınırlara çarpma mesafesi, m
L_h, L_c	: Işın demeti ısı kaynağı ve ısı kuyusuna çarpma mesafesi, m
L_f	: Işın demeti life çarpma mesafesi, m
L_k	: Karakteristik uzunluk
m	: Işın demeti doğru eğimi
$M_{i,j}$	: i fiberinden çıkan ve j fiberine çarpan toplam ışıın demeti sayısı
$M_{i,c}$	: i fiberinden çıkan ısı kuyusuna çarpan toplam ışıın demeti sayısı
$M_{i,h}$	: i fiberinden çıkan ve ısı kaynağına çarpan toplam ışıın demeti sayısı
P	: Ortam basıncı, Pa

Pr	: Prandtl sayısı
P_j	: Legendre polinomları
R	: Rasgele sayı
T	: Sıcaklık, K
T₁	: Isı kaynağı sıcaklığı, K
T₂	: Isı kuyusu sıcaklığı, K
q''	: Isı akısı, W/m ²
q''_{ışınım}	: Işınım ile meydana gelen ısı akısı, W/m ²
x, y, z	: Kartezyen koordinatlar
x_e, y_e	: Işın yayılma yeri koordinatları
x_f, y_f	: Lif merkezi koordinatları
α	: Boyut parametresi
α'	: Işın eğim açısı, rad
β, Ψ	: Knudsen sayısına bağlı boyutsuz katsayılar
γ, τ	: Isıl etkiyi gösteren katsayılar
ε	: Emisivite
ς	: Lif ışın yutma katsayısı
θ	: Polar açı, rad
θ_p	: Polar sapma açısı, rad
κ_s	: Işın sönümleme katsayısı
λ	: Işın dalga boyu, μm
ξ	: Gaz moleküler ortalama serbest yolu
σ	: Stefan-Boltzmann sabiti, 5.67x10 ⁻⁸ W/m ² .K ⁴
σ_s	: Işın saçma katsayısı
Φ	: Faz fonksiyonu
ψ	: Azimuthal açı, rad
Ψ_p	: Azimuthal sapma açısı, rad
ω	: Katı açı, sr
	: Lif albedosu

LİF ESASLI YALITIM MALZEMELERİNDE ISI GEÇİŞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yalıtım malzemeleri farklı sıcaklıktaki iki ortam arasındaki ısı geçişini azaltmak için kullanılan, endüstriyel ve domestik çok geniş bir uygulama alanında, konfor, enerji verimliliği ve kimi malzemelerin korunması gibi kaygılar nedeniyle kullanımı zorunlu olan malzemelerdir. Lif esaslı yalıtım malzemeleri ise çeşitli maddelerden üretilen liflerden oluşmakta ve tüm yalıtım malzemelerinin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, lif esaslı yalıtım malzemelerinin ısı geçişi özellikleri incelenmiştir. Bu incelemede, malzemenin ısıl özelliğinin bir göstergesi olan Eşdeğer Toplam Isı İletim Katsayısı ($W/m.K$) terimi, genelde kullanılan deneysel yığın yöntem ile değil, ışıınım, gaz iletimi, katı iletimi gibi ısı geçişi mekanizmalarının ayrı ayrı incelenmesi ile teorik olarak elde edilmiştir.

Literatürde, fiber bazlı yalıtım malzemeleri, geniş kullanım alanı nedeniyle bir çok çalışmaya konu olmuştur. Bu çalışmaların genel bir sonucu, fiber bazlı yalıtım malzemelerinde ısı geçişinin ışıınım, gaz iletimi ve katı iletimi ile meydana geldiğidir. Diğer taraftan, fiberler arası sıkışan havanın oldukça küçük miktarda ve durgun olması, taşınım ve doğal taşınım mekanizmalarının oluşmasını engellemektedir.

Araştırmacılar, fiber bazlı yalıtım malzemelerinin incelenmesinde katı ve gaz iletimi terimleri için genel olarak ampirik formüllerden yararlanmışlardır. Işıınımın çözümlenmesinde ise ampirik formüllerin yanısıra İki Akı Yöntemi de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise, katı ve gaz iletimi, diğer araştırmacılar gibi ampirik formüllerle incelenmiş, yüksek sıcaklık ya da düşük basınç gibi durumlarda baskın mekanizma olan ışıınım ise sayılan iki yöntemle değil, bilgisayar programlanmasına daha uygun olan ve bir Monte Carlo (MC) yöntemi olan, Monte Carlo Işın İzleme (MCIİ) yöntemiyle incelenmiştir.

Monte Carlo yöntemi bir stokastik çözüm yöntemi sınıfını ifade eder. Bu yöntem rasgele sayıların kullanımı ve olayların olasılık dağılımları üzerine kuruludur ve ışıınım problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Öte yandan, lif esaslı yalıtım malzemelerinde ise şimdiye kadar sadece birkaç çalışmada kullanılmıştır. Yöntemin ışıınım problemleri için faydası karmaşık geometrilerde kolaylıkla uygulanabilmesidir.

MCIİ yönteminde ısı kaynağı ile ısı alıcı arasına yerleştirilmiş lif esaslı yalıtım malzemesine, ısı kaynağından yeri ve yönü kümülatif olasılık dağılımına göre rasgele sayılar ilişkisi ile belirlenmiş ışın demetleri gönderilir. İç yapısı modellenen yalıtım malzemesi içinde bu ışın demetleri izlenerek ısı alıcıya ulaşan ışın demetleri sayılır. Isı alıcıya ulaşan toplam ışın demeti sayısının, ısı kaynağından gönderilen toplam ışın demeti sayısına oranı yardımıyla ışıınımla ısı geçişi miktarı elde edilir. Bu değer ampirik olarak hesaplanan iletim terimlerine eklenerek toplam ısı geçişi bulunur.

Burada önemli olan nokta, malzeme iç yapısının ve ışın demetlerinin izolasyon malzemelerini oluşturan liflere çarptıktan sonraki hareketinin doğru modellenmesidir. Bunun için çalışmada, ışın demeti dalga boyuna ve fiber çaplarına bağlı yöntemler önerilmiştir.

Çalışmada, literatürden seçilmiş bazı deneysel ve teorik çalışmalar incelenmiş ve MCII yöntemiyle alınan sonuçlar, ilgili çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları MCII yönteminin lif esaslı yalıtım malzemelerinin ısıtılmasında etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir.

INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER IN FIBROUS INSULATION MATERIALS

SUMMARY

Insulation materials are the materials used for decreasing the heat transfer rate between two mediums or surfaces. In buildings, furnaces, boilers, reactors or any other applications, right use of these materials is very important in terms of energy efficiency and protection of materials. Besides, in manned space vehicle application, which is one of an important application area, right usage is even vital.

Fibrous insulation materials, comprise the majority of insulation materials. Rockwool and glasswool insulations are the most known examples of fibrous insulation materials. They decrease the heat transfer due to their low Equivalent Total Thermal Conductivity (K) property. This term can be defined as the thermal conductivity of the materials which allow more than one heat transfer mechanisms like radiation and conduction etc. or which compose of different mediums like gas and a solid or two different kind of solids etc., considered as a pure solid material. In fibrous insulation materials, the fibers and the squeezed gas between the fibers, allow solid conduction, gas conduction, radiation etc. heat transfer mechanisms. That makes necessary to use of the term Equivalent Total Thermal Conductivity.

It is generally acknowledged that for insulation materials, Equivalent Total Thermal Conductivity value must be lower than 0.1 W/m.K. Thermal conductivity value of air is lower than any other solid material. Dry air which has a small quantity so as to disallow the natural convection provides best heat insulation. In fibrous insulation materials, the air between fibers provides that feature and those materials owe their low total thermal conductivity value to this air mass.

In conventional techniques, heat transfer rate of insulation materials is found by using an experimental bulk method. In this method, the insulation material is put between two plates whose temperatures are known and a heat flux is created. By measuring this heat flux and thickness of the material, the Equivalent Total Thermal Conductivity can be calculated by Fourier Law.

$$K=q''\frac{\Delta x}{\Delta T} \text{ (W/mK)}$$

Here; K, q'' , Δx and ΔT defines Equivalent Total Thermal Conductivity, heat flux, thickness of the insulation material and temperature difference of two plates respectively.

In this study, instead of experimental bulk model, a theoretical model is suggested to calculate the heat flux to use it in the Fourier Law formula.

In literature, since fibrous insulation materials has an extensive application area, there is a lot of research to increase the understanding of heat transfer mechanisms in that kind of materials. Previous research indicates that radiation, solid conduction

and gas conduction occur as heat transfer mechanisms in fibrous insulation materials. On the other hand, convection and natural convection are negligible in that kind of materials. In addition to that, since radiation heat transfer depends on the fourth power of the temperature, but conduction is not, at high temperatures ($\sim$ above 500 K) radiation heat transfer becomes most dominant heat transfer mechanism in fibrous insulation materials.

In general, researchers investigate solid and gas conduction mechanisms with empirical formulations. But for radiation heat transfer term, a method called Two Flux Method is used conventionally. Some researchers, however, use empirical formulations as well.

In this study, instead of those heat flux and empirical techniques, for the analysis of radiation heat transfer, a Monte Carlo (MC) Method, called Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) Method, is used because of its advantages in terms of computer programming. Although this method is commonly used for radiation problems, till now it has been used rarely for radiation heat transfer analysis of fibrous insulation materials.

MC methods are a class of stochastic techniques. These methods are based on usage of random numbers and probability distributions of events. In the analysis of radiation heat transfer, these methods become very advantageous when the geometry of heat transfer surfaces is very complicated to reach a solution analytically.

In this study, conduction mechanisms are investigated with empirical formulations as in literature. By these formulations the sum of gas conduction and solid conduction thermal conductivity values are calculated and added to equivalent radiation thermal conductivity value, which is calculated with Fourier Law after finding radiation heat flux with MCRT Method. This summation of thermal conductivity values gives the Total Equivalent Thermal Conductivity of insulation material, what this study aims.

In MCRT method, in general, a bundle of rays is emitted from a randomly selected point with regard to its probability distribution from a heat source surface to the direction that is again chosen randomly according to its probability distribution and then it is traced until it is absorbed by an element in the domain. Because the study is done under the steady state conditions and considering the conservation of energy, if the ray bundle is absorbed by fiber then it is emitted again isotropically. If the heat source or the heat sink, however, absorbs the ray bundle then the process is terminated and then restarts with a new bundle emission from the heat source until adequate number of ray bundles are emitted. When the heat sink absorbs a bundle, it is registered. Then, by considering the total number of those, the heat flux from heat source to heat sink can be calculated.

As stated before, in MCRT method, true determination of probability distribution of the event is vital and there are two important probability distributions to be known: probability distribution of the emission point and probability distribution of direction of rays. It is generally easy to find probability distribution of emission point of ray bundles because of constant temperature distribution assumption of heat sources. But when deciding the directional probability distribution of ray bundles, the number of parameters to be known is greater. First of all it is important to know whether the event is emission or scattering. For emission from surfaces, both from source or fibers, all surfaces assumed as Lambertian surface and the probability distribution is reached according to that. For scattering conditions, first we must determine the scattering type: Geometric Scattering (mirror like reflection), Mie scattering or

Rayleigh Scattering. Scattering type is determined with the help of Size Parameter, which depends on radiation wavelength and particle size (fiber diameter).

In this study it is shown that Rayleigh Scattering does not occur in insulation materials. On the other hand Geometric Scattering can be seen especially when the fiber diameters are bigger than 30 μm and the temperature of heat source is more than 1000 K. In general, fiber diameters change between 3-15 μm that means the mostly seen phenomena in fibrous insulation materials is Mie Scattering.

In this study both Mie scattering and Geometric scattering cases are analyzed. Firstly, in Mie scattering conditions, scattering behavior of rays is determined with Legendre Polynomials. To do this three different models created with three different Legendre coefficients, which are formed with the help of Mie equations for different forward Mie scattering conditions, are taken from literature. Results revealed that Linear Anisotropic Scattering (LAS) Model, that is one of those mentioned three models, best describes the scattering phenomena for fibrous insulations.

Secondly, for geometric scattering conditions, mirror like reflection assumption is used.

For each Mie scattering and Geometric scattering condition, problems selected from literature are solved with MCRT method and results are compared with the results of earlier experimental and theoretical works.

The most important result of this study is that it is proven that MC method can be effectively used for radiation heat transfer analysis of fibrous insulation materials. Besides, this study presents that increasing fiber absorptivity value of fibrous insulation materials causes an increase on radiation heat transfer under Geometric Scattering conditions. On the contrary, under Mie scattering conditions, radiation heat transfer rate decreases if fiber absorptivity value increases. So, roughly, to provide a better insulation, it is suggested that for fibrous insulation materials, low absorptivity fibers should be used when fiber diameter is bigger than 30 μm and high absorptivity fibers should be used for lower fiber diameters.

In this study it is also shown that while the rate of radiation heat transfer is about 25% for 100 K temperature difference between heat source and heat sink, the rate increases to 75% when difference is 900 K. So, it is confirmed that radiation heat transfer is the dominant mechanism especially at high temperatures. Besides, it is shown that since the gas conduction terms are negligible in the vacuum conditions, the dominant heat transfer mechanism is radiation even at low temperature difference intervals.

It is observed that, for geometric scattering cases, fiber diameter of the insulation material has no effect on radiation heat transfer, on the other hand, it is known that under Mie scattering cases, fiber diameter of the insulation material affects radiation heat transfer rate. Because fiber diameter size is one of a parameter of Mie equations and Legendre Polynomial solution that is used for this study is formed with Mie Equations.

Another hypothesis that is presented with this study is that the Hanyey-Greenstein equation (an equation that can be used for modeling scattering behavior in Mie scattering conditions but mostly used for radiation in tissues in literature) with the HG coefficient of 0.35 can be used for fibrous insulation materials as well. The benefit of using HG equation is to decrease computer process time to 1/3 of the processing time spent for the LAS model.

As future works, this research can be validated experimentally for different insulation materials and some studies can be done for extending the usage area of this method, like taking into account the wavelength distribution of scattered rays for non-grey fiber materials. In addition to that, there can be done some studies on extinction coefficient value, which is a very important parameter in the solution of Mie Scattering case radiation heat transfer problem. If a trustable empirical formulation can be reached that depends on fiber diameter and insulation material's density, then application of MCRT method become easier.

1. GİRİŞ

Yalıtım malzemeleri, farklı sıcaklıktaki iki ortam arasındaki ısı geçişini azaltmak için kullanılan malzemelerdir. Binalarda, fırınlarda, kazanlarda, reaktörlerde ve daha pek çok uygulamada doğru kullanılması, enerji verimliliği, konfor, kimi malzemelerin korunması gibi kaygılar nedeniyle büyük önem taşır. Önemli kullanım alanlarından biri olan, insanlı uzay araçlarındaki kullanımı gibi durumlarda ise doğru uygulanması hayati öneme sahiptir.

Bu çalışmanın konusunu oluşturan lif (fiber) esaslı yalıtım malzemeleri ise tüm yalıtım malzemelerinin büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır [1]. Bunların en bilinenleri olan cam yünü ve taş yünü yalıtımlar binalarda ve endüstriyel uygulamalarda çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Öte yandan pek çok maddeden lif üretilmekte ve bunlarla yalıtım malzemesi yapılabilmektedir. Lif üretilen maddelerin başlıcaları amfibolit, polyester, alumina ve silis olarak sayılabilir.

Yalıtım malzemeleri, ısı geçişini, düşük Eşdeğer Toplam Isı İletim Katsayısı (K) özelliği sayesinde azaltır. Eşdeğer toplam ısı iletim katsayısı terimi, çarşılmada daha sonra da anlatılacağı üzere, birden fazla maddeden oluşan ya da ısıyım, iletim gibi birden fazla ısı geçişi mekanizması ile ısı geçişine izin veren malzemelerin saf bir katı malzeme gibi kabul edilmesiyle bulunan ısı iletim katsayısı olarak tanımlanabilir. Yalıtım malzemelerinde, kullanılan lifler ve lifler arasına sıkışan gaz; katı iletimi, gaz iletimi, ısıyım vb. gibi ısı geçişi mekanizmalarına neden olduğu için bu terimin kullanılmasını gerekli kılar.

Eşdeğer Toplam Isı İletim Katsayısı değerinin, yalıtım malzemelerinde genelde 0.1 W/mK 'den küçük olması gerektiği kabul edilir. Havanın ısı iletim katsayısı, tüm katı malzemelerin ısı iletim katsayısından düşüktür ve doğal taşınımına izin vermeyecek kadar küçük miktardaki kuru durgun hava en iyi ısı yalıtımını sağlar. Lif esaslı yalıtım malzemelerinde, lifler arası sıkışan hava yaklaşık olarak bu özellikleri sağlamaktadır ve düşük toplam ısı iletim katsayısı değerini bu hava kütesine

borçludur [1] .

Lif esaslı yalıtım malzemeleri, bir diğer geniş kullanım alanına sahip organik köpükten mamul yalıtım malzemelerinin aksine, yüksek sıcaklık dayanımına sahiptir ve yangın dayanımı gerektiren uygulamalarda ya da yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren uzay aracı yalıtımı gibi uygulamalarda kullanılabilir.

1.1 Tezin Amacı

Geleneksel olarak yalıtım malzemelerinde ısı geçişi yığın (bulk) model kullanılarak bulunur. Önceden hazırlanmış bir yalıtım malzemesi, sıcaklığı bilinen iki ortam arasına konularak bir ısı akısı yaratılır. Bu ısı akısının belirlenmesi ve malzeme kalınlığının bilinmesi ile yalıtım malzemesinin eşdeğer toplam ısı iletim katsayısı Fourier kanununa göre bulunur.

$$K=q'' \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (1.1)$$

Burada, Δx değeri malzeme kalınlığını, ΔT değeri malzemenin ayırdığı iki ortamın sıcaklık farkını, q'' ise tüm ısı geçişi mekanizmalarıyla (ışınım, iletim, taşınım) olan ısı akısının toplam değerini göstermektedir –ki giriş kısmında da anlatılan, iletim katsayısı yerine Eşdeğer Toplam Isı İletim Katsayısı teriminin kullanılmasının sebebi budur. Yalıtım malzemelerinin bu şekilde incelenmesi, üretilen malzemeler için kesin sonuç verdiğinden çok faydalı olsa da, yeni bir yalıtım malzemesi üretimi açısından yetersizdir.

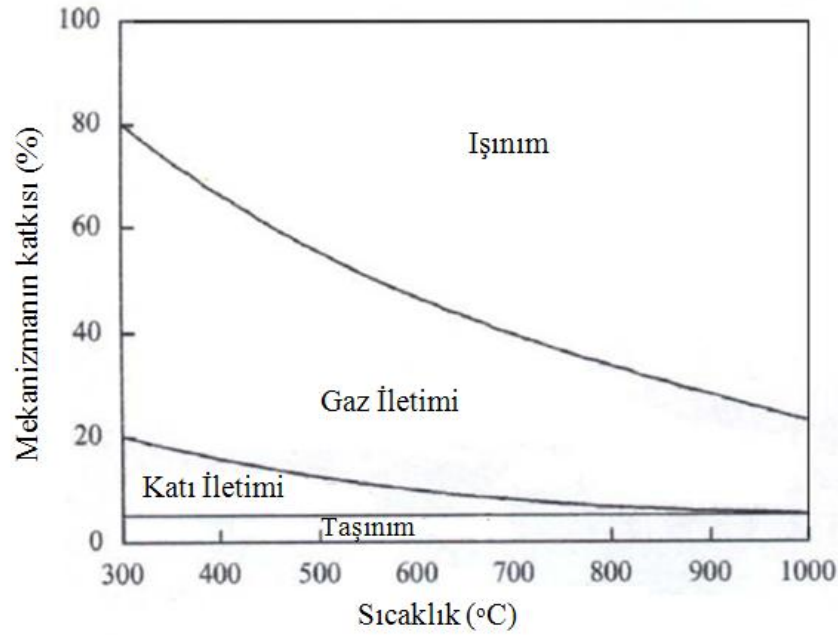
Bu tezde ısı geçişi yığın modelle incelenmemiş, bunun yerine ısı geçişi terimleri ayrı ayrı incelenmiştir. Böylelikle değişik maddelerle üretilebilecek yalıtım malzemeleri, malzeme iç yapısı değiştirilerek bilgisayar ortamında modellenilebilecektir.

1.2 Literatür Araştırması

Lif esaslı yalıtım malzemelerinden ısı geçişinin incelenmesi uzun yıllardır, yaygın bir uygulama alanına sahip olması sebebiyle, birçok araştırmaya konu olmuştur.

Bunların en temel olanlarından biri Verschoor'un çalışmasıdır[2]. Verschoor çalışmasında gaz iletimi modeli kullanmış ve 340 K sıcaklığa kadar 0,133 – 101,32 kPa basınçları arasında analitik ve deneysel sonuçlar elde etmiştir. Çalışmasının

sonucunda ısı geçişinin, baskın mekanizmasının gaz iletimi ve ışınım olduğunu bulmuştur. şekil 1.1’de benzer bir çalışmanın sonuçları gösterilmiştir [3].



şekil 1.1 : Örnek bir lif esaslı malzemede ısı geçişi mekanizmaları.

Lif esaslı yalıtım malzemeleri üzerine yapılan en önemli çalışmaların bir kısmı, bu malzemelerin yüksek sıcaklık dayanımları sayesinde uzay araçlarında kullanılabilmesi nedeniyle, NASA araştırmacılarınca yapılmıştır. Bu araştırmacılar Daryabeigi geniş bir sıcaklık aralığında (300-1200K) alışmıştır [4]. Işınımın matematik modellemesinde çok yaygın kullanılan İki Akı (Two Flux) yönteminden faydalanmıştır. İletim terimlerini ise ampirik formüllerle hesaplamış ve çalışmasında doğal taşınımın etkilerini de incelemiştir. Yaptığı çalışmayı deneylerle karşılaştırmıştır. Sonuçları doğal taşınımın ısı geçişine etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermiştir. Öte yandan, ışınımın özellikle orta ve yüksek sıcaklıklarda baskın ısı geçişi mekanizması olduğunu doğrulamıştır.

Literatürde konuyla ilgili ilginç araştırmalardan biri Veiseh’ e aittir [5]. Veiseh, iletim terimlerini diğer araştırmacılar gibi ampirik formüllerle hesaplamış, Mie saçılması bölgesinde olduğunu düşündüğü ışınım çözümlemesini ise Monte Carlo Işın İzleme (MCII) metodu ile yapmış; bunu yaparken de bir başka ışın davranışı bölgesi olan geometrik yansıma bölgesinde yaygın olarak kullanılan, bu çalışmada da Bölüm 2.3 ve Bölüm 3.2’ de anlatılan malzeme iç yapısını tanımlama ve ışın hareketini buna göre izleme metodunu benimsemiştir. Bu alışma kapsamında ilerde değinileceği üzere, böyle bir yöntemin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için Mie

denklemlerinin tekrar yazılması gerekmektedir ve literatürde böyle bir çalışmaya şimdiye kadar bu çalışmanın sahibi rastlamamıştır. Veiseh de bunu nasıl yaptığını çalışmasında belirtmemiştir.

Bir çok araştırmacı iletim terimlerinin haricinde, ışıınım terimi ile ısı geçini de ampirik formüllerle hesaplamıştır. Bu tarz bir çalışma yapan Karamanos açık hava basıncında yüksek yoğunluklu taş yünü yalıtım malzemesi için analitik yöntemle bir sonuç bulmuş ve deneylerle test etmiştir [1]. Deney sonuçları artan yalıtım malzemesi yoğunluğunun ışıınımla ısı geçişini azalttığını; fakat iletimle ısı geçişini artırdığını göstermiştir.

Özellikle yüksek sıcaklık değerlerine çıkıldığında lifli yalıtım malzemelerindeki ısı geçişinin çoğunlukla ışıınımla meydana geldiği daha önce belirtilmişti. Bu yüzden birçok araştırma, yalnızca lif esaslı yalıtım malzemelerinde ışıınımla ısı geçişi üzerine yapılmıştır. Bu çalışmalardan birini yapan Tong ve Tien çalışmalarında orta sıcaklıklarda, iki akı yöntemiyle ışıınımı modellemiş ve vakum ortamında yaptıkları deneylerle karşılaştırmışlardır [6]. Işın saçılımını Lineer Anizotropik (İzotropik olmayan) Saçılım (LAS) modeli ile modellemişlerdir. Deney sonuçları bu modelin kullanılabilirliğini göstermiştir.

Çok yüksek sıcaklıklara çıkıldığında (yaklaşık 1000K ve üzerinde), kalın liflere sahip bir yalıtım malzemesinde, bu çalışmada daha sonra detaylı olarak üzerinde durulacağı üzere, lifler gelen ışıını geometrik olarak yansıtır. Bu durum malzeme içyapısı bilindiği takdirde gelen her hangi bir ışıının malzeme içinde rahatlıkla izlenebileceği anlamına gelir. Bu koşullarda araştırma yapan araştırmacılardan Arambakam, ısı geçişini sürekli rejimde incelemiş ve malzeme içyapısı ve lif özelliklerinin ısı geçişine etkisini ortaya koymuştur [7]. Yaptığı çalışmalarla geometrik yansıma bölgesinde, lif çapının ısı geçişine etkisi olmadığını, artan lif absorbtivite değerinin ise ısı geçişini azalttığını ileri sürmüştür.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasında, literatürdeki yukarıda da anlatılan pek çok araştırmada olduğu gibi katı iletimi, gaz iletimi ve ışıınım terimleri geniş bir sıcaklık aralığında (300 – 1200 K dereceleri arasında), değişik çaplı liflerden oluşan farklı yoğunluklu yalıtım malzemeleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Yapılan çalışmada iletim terimleri için

ampirik formüller kullanılmıştır. Işınım ısı geçişi ise MCİİ yöntemiyle incelenmiştir. Işınım terimi, literatürde de oldukça fazla kullanıldığı gibi, eşdeğer ısı iletim katsayısı ile ifade edilmiştir.

$$q_{ışınım} = \sigma (T_1^4 - T_2^4) = k_{ışınım} (T_1 - T_2) \quad (1.2)$$

Bulunan $k_{ışınım}$ değeri, iletimle ısı geçişi ısı iletim katsayısı terimi ile toplanarak eşdeğer toplam ısı iletim katsayısı bulunmuştur.

$$K = k_{ışınım} + k_{iletim} \quad (1.3)$$

20 kg/m³'ten daha yoğun yalıtım malzemelerinde doğal taşınım ihmal edilebilir düzeyde olduğundan doğal taşınım terimleri, lifler arasındaki hava durgun kabul edilebileceğinden taşınım ısı geçişi terimleri çalışmada göz önünde bulundurulmamıştır [4].

Işınım ısı geçişinin çözümlenmesi lif esaslı yalıtım malzemelerinin incelenmesinde üzerinde en fazla durulan konudur. Bu çalışmada, ısı iletim teriminin incelenmesinde kullanılan MCİİ yöntemi ısı iletim problemlerinde sıklıkla kullanılmasına rağmen, yalıtım malzemelerinin incelenmesinde şu ana kadar çok fazla kullanılmamıştır. Oysa bu yöntem kullanılan diğer yöntemlere nazaran bilgisayar programlamasına daha uygun, ve hızlı bir çözüm yöntemidir. Öte yandan diğer ısı iletim modelleme tekniklerinde karşılaşılan optik kalınlık problemi gibi konular da bu yöntemde karşılaşılmamaktadır.

Bu çalışmanın özgünlüğü böylesi geniş bir çalışma aralığında, Monte Carlo metodu kullanılarak yapılan bir çözümlemenin, lif esaslı yalıtım malzemeleri için yapılmış olmasıdır.

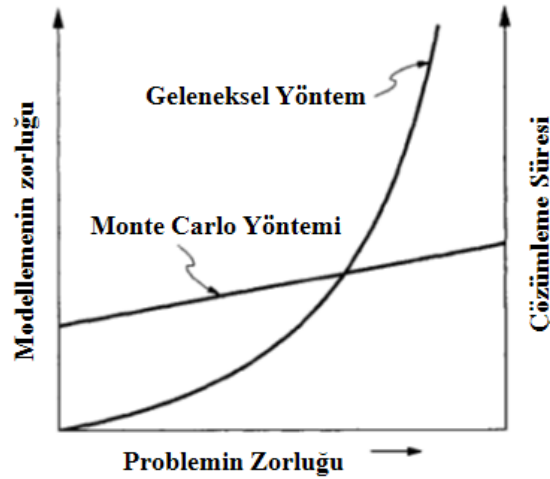
2. MONTE CARLO YÖNTEMİ

2.1 Giriş

Monte Carlo (MC) yöntemi bir stokastik çözüm yöntemi sınıfını ifade eder. Bu yöntem rasgele sayıların kullanımı ve de olayların olasılık dağılımları üzerine kuruludur. Ekonomiden, nükleer fiziğe ya da trafik akışının düzenlenmesinden, ısıtım problemlerinin çözülmesine kadar birçok konuda kullanılmaktadır.

Isıtım problemlerinde MC yöntemine ihtiyaç duyulmasının temel sebebi, ısıtımın birçok zaman karmaşık geometrilerde meydana gelmesi ve analitik çözümlemenin birçok durumda mümkün olmamasıdır. Araştırmacılar, sonlu farklar, sonlu hacimler gibi yöntemler kullanarak ısıtım problemlerini çözmeye çalışsalar da problemin zorluğu arttıkça bu tekniklerin de uygulanması oldukça zorlaşmaktadır.

Şekil 2.1’de ısıtım problemlerinin çözümünde, geleneksel çözüm yöntemi ile MC yöntemi arasındaki karşılaştırma gösterilmiştir [8]. Hızla gelişen bilgisayar teknolojisinin MC yönteminin kullanılabilirliğini günümüzde daha da artırdığını tahmin etmek güç değildir.



Şekil 2.1 : Geleneksel Yöntem ile MC yöntemi karşılaştırması.

MC metodunun kullanılması için öncelikle uygun bir örnekleme tekniğine ihtiyaç vardır. Bu yolla yapılan tahminin doğruluğu ise tekniğin doğruluğuna ve örnekleme sayısına bağlıdır. Yani ışıınım konusu göz önüne alındığında, ışıın yayılma noktası, ışıınım yönü ve ışıınım saçılması örneklendiği takdirde ışıın demetleri izlenerek, ısı geçişi incelenebilir ve burada örnek ışıın sayısı artırılarak çözümün doğruluğu iyileştirilebilir.

İşıınım problemleri MC metodu için çok uygundur. Çünkü enerji (fotonlar) herhangi bir engele çarpana kadar, mesafeleri düz bir yol izleyerek alırlar. Bu nedenle örneklenen ışıın çok karışık geometrilerde dahi kolaylıkla izlenebilir.

Bu yöntemin dezavantajı ise barındırdığı istatistiksel hatadır. Bu hatanın küçültülmesi örnekleme sayısının artırılmasıyla mümkündür. Fakat bu da bilgisayarın çözüm süresini uzatmaktadır. Yapılan bu çalışmada, hata oranı ve çözümleme süresini gösterir bir grafik Bölüm 5’te verilmiştir.

2.2 Olasılık Dağılım Fonksiyonları

Giriş kısmında anlatıldığı gibi, MC yönteminde yapılan örneklemenin uygunluğu, doğru çözüm almak için ön koşuldur. İşte bu örnekleme, çalışılan konunun olasılık dağılımını $P(\xi)$ belirlemekle elde edilebilir. Burada, $P(\xi)$ olasılık dağılımı ξ özelliğinin gerçekleşme olasılığının dağılımı olarak da tanımlanabilir. Daha sonra bu fonksiyon yardımıyla kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu bulunarak rasgele sayılar ilişkisi ile olay modellenir.

ξ özelliğinin bir fonksiyonu olan $P(\xi)$ olasılık dağılımına sahip herhangi bir P fiziksel olayının kümülatif dağılım fonksiyonu, $\xi_{\min}$ ve $\xi_{\max}$ arasında gerçekleşmektedir ve MC yöntemi rasgele sayılar ilişkisi aşağıdaki şekilde matematiksel ifadesini bulur [9].

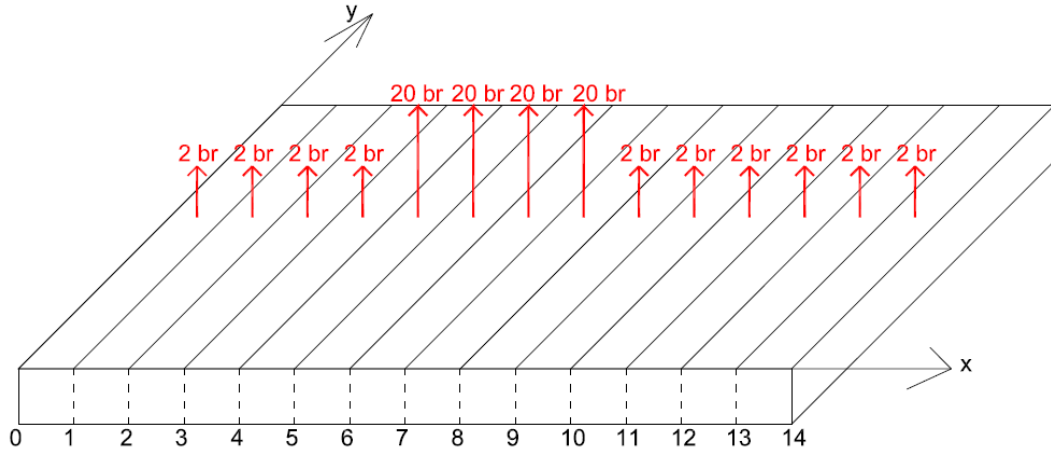
$$\frac{\int_0^{R_\xi} d\xi^*}{\int_0^1 d\xi^*} = \frac{\int_{\xi_{\min}}^{\xi} P(\xi^*) d\xi^*}{\int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} P(\xi^*) d\xi^*} \quad (2.1)$$

Burada, R_ξ 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıdır.

Bahsedilen durumu bir örnekle açıklamak gerekirse; Şekil 2.2’de çevresine ısı enerjisi yayan herhangi bir plaka örneklenmiş ve çevresine yayılan enerji birim olarak

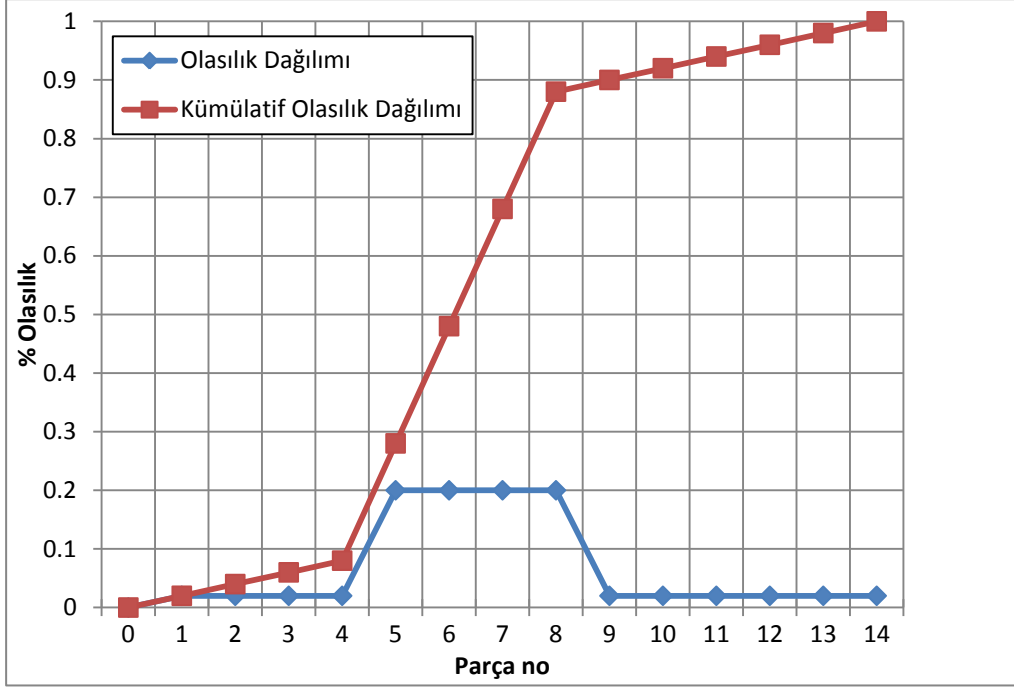
gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, toplam 100 birim enerji yayan plakanın 5,6,7 ve 8. sıradaki bölümleri 20'şer birim enerji yayarken diğer bölümleri 2'şer birim enerji yaymaktadır. Bu dağılım, Denklem 2.1 düşünülürse, x yönündeki enerji yayılma olasılık dağılımıdır ($P(\xi)=P(x)$).

Örnek olarak, yayılan 1 birimlik enerjinin 5. parçadan yayılma olasılığı %20 iken, 3. parçadan yayılma olasılığı %2'dir.



Şekil 2.2 : MC metodunun örnekle açıklanması.

Belirlenen olasılık dağılımı plakanın 1. parçasından 14. parçasına kadar integre edilerek kümülatif olasılık dağılımı elde edilir. Söz konusu örnek için olasılık dağılımı ve kümülatif olasılık dağılımı Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Olasılık dağılım fonksiyonları.

Eğer bu plakadan enerji yayılımı x koordinatına göre MC yöntemi kullanılarak modellenmek istenirse Denklem 2.1 şunu verecektir: 0.08’den 0.88’e kadar üretilen rasgele sayılar için örneklemede enerji yayılım bölgesi 5,6,7 ve 8. sıradaki plakalar olacaktır. Bu üretilen rasgele sayıların %80’i demektir -ki toplam 100 birim enerjinin 80 birimi bu bölgeden yayıldığına göre bu yöntemle doğru bir modellemeye ulaşılmış olur.

Işınım problemi söz konusu olduğunda, olasılık dağılım fonksiyonları ışıının kanunları gözetilerek bulunur. Daha sonra Denklem 2.1 kullanılarak ışıın yayılma yeri ve yönü modellenenir. Işın izlenebilir.

Aşağıda bu durumlar alt başlıklar halinde incelenmiştir.

2.2.1 Işın yayılma noktasının örnekleme

Işınım probleminin Monte Carlo çözümünde öncelikle ışıının yayıldığı yer bulunmalıdır. Denklem (2.1) bunun için aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$R_x = \frac{\int_{x_{\min}}^x P(x^*) dx^*}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} P(x^*) dx^*} \quad (2.2)$$

$P(x^*)$ olasılık dağılım fonksiyonu, ışıınım problemi için her hangi bir x koordinatındaki toplam ışıınım miktarıdır.

$$P(x^*) = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} q_{ışıınım}''(x^*) dy^* \quad (2.3)$$

$$q_{ışıınım}''(x) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T(x)^4 \quad (2.4)$$

Böylelikle;

$$R_x = \frac{\int_{x_{\min}}^x \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \varepsilon \cdot \sigma \cdot T(x^*)^4 dy^* dx^*}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \varepsilon \cdot \sigma \cdot T(x^*)^4 dy^* dx^*} \quad (2.5)$$

Olarak elde edilir. Eğer ışıınımın meydana geldiği bölgenin sıcaklığı sabitse, Denklem 2.5'teki integraller alındığı takdirde;

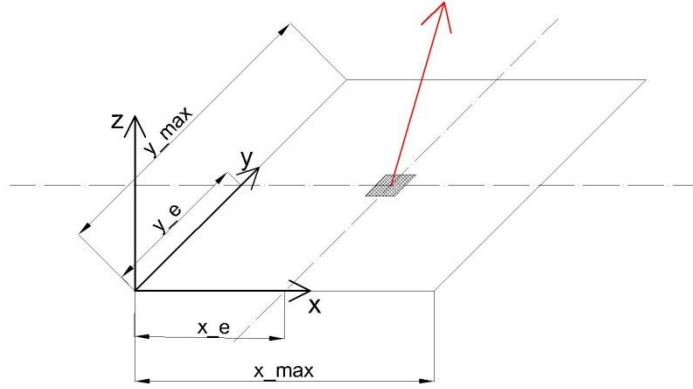
$$x_e = R_x (x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min} \quad (2.6)$$

Aynı işlemler y yönü için yapılırsa;

$$y_e = R_y (y_{\max} - y_{\min}) + y_{\min} \quad (2.7)$$

Burada, x_e ve y_e ışıının yayıldığı koordinatları, $x_{\max}, y_{\max}, x_{\min}, y_{\min}$ değerleri de ışıın yayan yüzeyin belirlenen koordinat sistemine göre sınırlarını belirtmektedir.

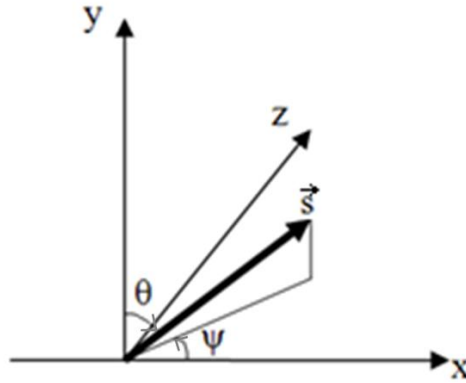
R_x ve R_y ise sıfırla bir arasında seçilen rastgele sayılardır. Bu çalışmada, rastgele sayı üretici olarak, çalışmada kullanılan MATLAB programının içinde tanımlı üreteç kullanılmıştır.



Şekil 2.4 : Işın yayılma noktasının gösterimi.

2.2.2 Işın Yönünün Bulunması

Işının yayılma yerinden sonra, ışınım problemlerinin Monte Carlo çözümlenmesinde diğer bir önemli konu ışın yönünün örneklenmesidir.



Şekil 2.5 : Işın yayılımının vektörel gösterimi.

Bir fotonun yönünü 2 açıyla tanımlayabiliriz: θ polar açısı ve Ψ azimuthal açısı. Şekil 2.5'ten de görülebileceği gibi bir yüzeyden yayılan ışınım için polar açı maksimum ve minimum değerlerini 0 ve $\pi/2$ olarak azimuthal açı ise 0 ve 2π olarak almaktadır.

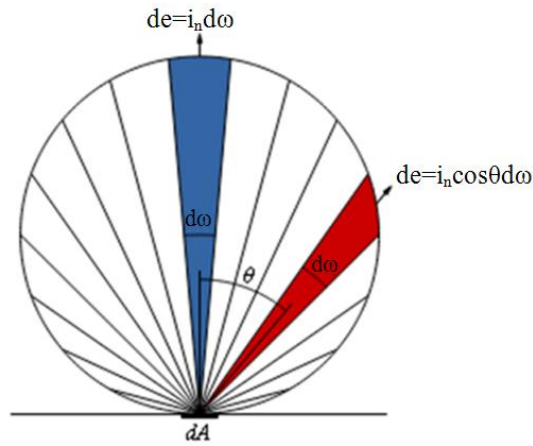
$$0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.8)$$

$$0 \leq \psi \leq 2\pi \quad (2.9)$$

Işın yayma yönü, ışın yayan yüzeyin ya da hacmin bir özelliğidir. Bu çalışmada ışın yayan yüzeyler yaygın ışınım yayan yüzey (Lambert yüzeyi) (diffuse surface - Lambertian surface) kabul edilmiştir [10]. Bir hacimden olan ışın yayılımı ise izotropik ve izotropik olmayan yayılım durumları için araştırılmıştır.

Yaygın ışınım yayan yüzeylerde, toplam ışınım yoğunluğu (i) (total intensity of power) polar açının kosinüsüne bağlı olarak Lambert Kanununa göre değişir. Bu durum Denklem 2.10 ile matematiksel ifadesini bulur ve Şekil 2.6 ile ışın yayılımı şematik olarak gösterilmiştir [11]. Burada e ve ω , sırasıyla ışınım gücü (emissive power (W/m^2)) ve katı açıdır (solid angle (sr)).

$$i = i_n \cos \theta \quad (2.10)$$



Şekil 2.6 : Yaygın ışın yayan yüzeyden ışın yayılımı [11].

İzotropik ışınım, toplam ışınım yoğunluğunun yöne bağlı olarak değişmediği yayılım türüdür. İzotropik olmayan (anizotropik) yayılımda ise toplam ışınım yoğunluğu ortam özelliğine bağlı olarak yöne bağlılık gösterir.

Tüm bu bahsedilen durumlar için ayrı olasılık dağılımları mevcuttur. Dolayısıyla, bu çalışmada tüm bu durumlar için MC yöntemi formülasyonu yapılmış ve gerekli durumlarda kullanılmıştır.

Öncelikle, yaygın ışınım yayan yüzeyden yayılan ışınım için olasılık dağılımları aşağıdaki şekilde bulunur.

Denklem 2.1, polar yöndeki yaygın ışınım için kümülatif dağılım fonksiyonunun

bulunması için tekrar yazılırsa;

$$R(\theta) = \frac{\int_0^\theta P(\theta^*) d\theta^*}{\int_0^{\pi/2} P(\theta^*) d\theta^*} \quad (2.11)$$

$P(\theta^*)$ olasılık dağılım fonksiyonu herhangi bir θ yönündeki toplam ışıdır.

$$P(\theta^*) = e(\theta) = \int_{\psi_{\min}}^{\psi_{\max}} i(\theta^*) d\omega \quad (2.12)$$

ω katı açısı aşağıdaki şekilde matematiksel ifadesini bulur.

$$d\omega = \sin \theta d\theta d\psi \quad (2.13)$$

2.13 denklemini 2.12’de yazılırsa,

$$P(\theta^*) = \int_0^{2\pi} i(\theta^*) \sin \theta^* d\theta^* d\psi^* \quad (2.14)$$

2.14 integrali alınır,

$$P(\theta^*) = 2\pi i(\theta^*) \sin \theta^* d\theta^* \quad (2.14)$$

2.14 denklemini 2.11 içine yazılırsa,

$$R(\theta) = \frac{2\pi \int_0^\theta i(\theta^*) \sin \theta^* d\theta^*}{2\pi \int_0^{\pi/2} i(\theta^*) \sin \theta^* d\theta^*} \quad (2.15)$$

$$2\pi \int_0^{\pi/2} i(\theta^*) \sin \theta^* d\theta^* = e \quad (2.16)$$

$$i_n = \frac{e}{\pi} \quad (2.17)$$

$$e = \sigma T^4 \quad (2.18)$$

Yüzey sıcaklığı sabit olduğundan, 2.16, 2.17 ve 2.18 denklemleri Denklem 2.15'te tekrar yazılırsa polar yöndeki olasılık dağılımı bulunur;

$$R(\theta) = 2 \int_0^{\theta} \cos \theta \sin \theta d\theta = \sin^2 \theta \quad (2.19)$$

$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{R(\theta)} \quad (2.20)$$

Azimuthal yöndeki, olasılık dağılımı ise benzer şekilde aşağıdaki gibi bulunur.

$$R(\psi) = \frac{\int_0^{\psi} P(\psi^*) d\psi^*}{\int_0^{2\pi} P(\psi^*) d\psi^*} \quad (2.21)$$

$$P(\psi^*) = \int_0^{\pi/2} i(\psi^*) \sin \theta^* d\theta^* d\psi^* \quad (2.22)$$

$$R(\psi) = \frac{\int_0^{\psi} \int_0^{\pi/2} i(\psi^*) \sin \theta^* d\theta^* d\psi^*}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} i(\psi^*) \sin \theta^* d\theta^* d\psi^*} \quad (2.23)$$

Belirtildiği gibi, azimuthal yönde izotropik ışıyım kabulü yapıldığından, toplam ışıyım yoğunluğu sabittir. 2.23 denklemi çözüldüğünde ψ azimuthal açısı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\psi = 2\pi R(\psi) \quad (2.24)$$

Bir hacim içinden olan ışıyımın çözümlenmesinde de benzer bir prosedür uygulanır. Bir yüzeyden olan ışıyım yayılımından farklı olarak, hacim içinden yayılan ışıyımında, polar yöndeki yayılım açısı 0'dan $\pi/2$ 'ye değil, 0'dan π 'ye olmaktadır. Bu yüzden 2.15 ve 2.24 denklemleri hacim içinden ışıma için aşağıdaki şekli alır.

$$R(\theta) = \frac{\int_0^\theta i(\theta^*) \sin \theta^* d\theta^*}{\int_0^\pi i(\theta^*) \sin \theta^* d\theta^*} \quad (2.25)$$

$$R(\psi) = \frac{\int_0^\psi \int_0^\pi i(\psi^*) \sin \theta^* d\theta^* d\psi^*}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi i(\psi^*) \sin \theta^* d\theta^* d\psi^*} \quad (2.26)$$

Bir hacimden yayılan izotropik ışıının için Denklem 2.26'nin çözümü yine Denklem 2.24'ü verecektir. Polar yöndeki rasgele sayılar ilişkisi ise Denklem 2.25'in çözümünden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\theta = \cos^{-1}(1 - 2R(\theta)) \quad (2.27)$$

i yöne bağlı toplam ışıının yoğunluğu, MCİİ tekniğinde literatürde genellikle faz fonksiyonu (Φ) olarak adlandırılır ve yüzey ışıması için Denklem 2.15 ve 2.23, hacim ışıması için Denklem 2.25 ve 2.26, faz fonksiyonu kullanılarak rasgele sayılar ilişkisi bulunan temel denklemler olarak kabul edilebilir.

İzotropik olmayan ışıının durumlarında, ilgili faz fonksiyonları bu çalışmada Bölüm 3.3.2'de anlatılan tekniklerle bulunur ve burada bulunan temel denklemlere koyularak rasgele sayılar ilişkisi tanımlanır.

Bulunan bu rasgele sayılar ilişkileri ile ışın demetleri olasılık dağılımlarına uygun olarak neşredilebilir. Bundan sonra ise MCİİ yöntemi; ışının izlenmesi ve çarptığı noktanın bulunması, daha sonra yansınması-saçılması ya da yutulması, yutulduğu takdirde sürekli rejim nedeniyle yutulduğu lif tarafından tekrar neşredilmesi şeklinde, ışın ısı kaynağına tekrar dönüp yutulana ya da ısı kuyusuna ulaşana kadar devam ettirilecektir.

2.3 Işın İzleme

Lif esaslı yalıtım malzemelerinde MCİİ yöntemi ile ışıının modellenmesi esnasında, ışının yayıldığı yer ve ışının doğrultusu belirlendikten sonra, uygulanan çözüm yöntemine göre ışın takip edilir.

Bu çalışmada, ışıınınla ısı geçişi problemi çözümünde kullanılmak üzere Bölüm 3.2

ve Bölüm 3.3’te açıklanan iki çözüm yöntemi tanımlanmıştır.

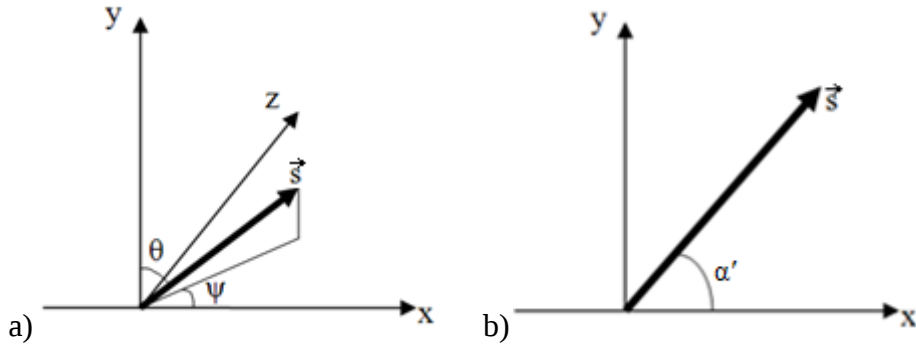
- Geometrik yansıma bölgesi çözümü
- Mie saçılması bölgesi çözümü

Işın izleme prosedürü bu çözümleme bölgelerine göre değişiklikler gösterse de her iki çözümlemede de temel olarak analitik geometriden faydalanılır.

Bu bölümde ışın izleme ile ilgili genel prosedür açıklanmıştır. Gerekli detaylar ayrıca ilgili bölümlerde belirtilmiştir.

Işın izleme prosedüründe, öncelikle gönderilen ışın demetinin, doğru denklemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için Bölüm 2.2.2’de rasgele sayılar ilişkisine göre bulunan açılar kullanılacaktır.

Şekil 2.7a’da ışın demetinin yayılma açıları gösterilmiştir. Yapı z boyunca değişmediğinden, yani yalıtım malzemelerinde liflerin ısı kaynağına paralel yerleşmiş kusursuz silindirler olduğu varsayımı nedeniyle, 2.4a şekli 2.4b’deki şekle indirgenebilir. Fakat burada rasgele sayılar ilişkisine göre bulunan polar (θ) ve azimuthal (Ψ) açılar yardımıyla α' eğim açısı tekrar tanımlanmalıdır ve Denklem 2.28’deki şekilde tanımlanabilir.



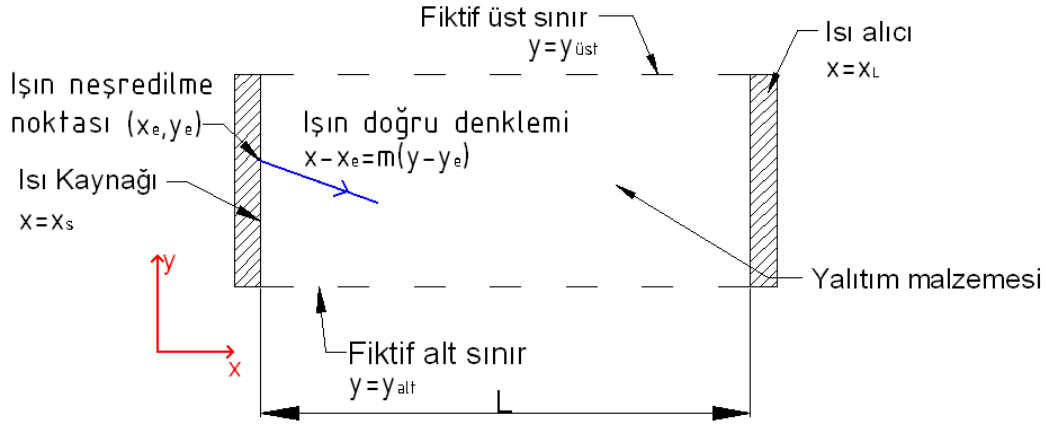
Şekil 2.7 : a) 3 boyutlu geometride ışın yönünün gösterimi b) 2 boyutlu geometride ışın yönünün gösterimi.

$$\alpha' = \tan^{-1} \tan \theta \cdot \cos \Psi \quad (2.28)$$

Işın demeti doğru denklemi ise, doğru eğimi $\tan(\alpha')=m$ denilirse, aşağıdaki şekilde elde edilir;

$$y - y_e = m \cdot x - x_e \quad (2.29)$$

Burada y_e ve x_e daha önce bulunan ışın yayılma yeri ya da yansıma/saçılma noktası olarak tanımlanabilir. y ve x ise ışının herhangi bir sistem elemanına çarptığı, bir sonraki noktadır. Bu noktanın analitik geometri yardımıyla bulunabilmesi için malzeme iç yapısının tanımlanması gerekmektedir. Şekil 2.8’de her hangi bir yalıtım malzemesi için bu iç yapıya ait sınırlar doğru denklemleri ile beraber verilmiştir.



Şekil 2.8 : MCII yöntemi için gerekli doğru denklemleri.

Burada sanal sınırlar kullanılmasıdaki amaç, çözüm alanını küçültürken bilgisayar işlem süresini kısaltmaktır. Bu yüzden malzemenin y yönünde periyodik bir yapıya sahip olduğu kabulü yapılmıştır. Ayrıca y yönündeki uzunluğun malzeme kalınlığına oranla çok daha büyük oluşu bu yönde ısı kaybı olmadığı kabulüne de olanak sağlamıştır.

Sınır denklemleri ışın demeti doğru denklemi ile eşitlenerek, ışın demetinin bahsedilen sınırlara çarpma mesafeleri bulunur.

Üst sınıra çarpma mesafesi; (L_u)

$$L_u = \sqrt{(m(y_{üst} - y_e))^2 + (y_{üst} - y_e)^2} \quad (2.30)$$

Alt sınıra çarpma mesafesi; (L_a)

$$L_a = \sqrt{(m(y_{alt} - y_e))^2 + (y_{alt} - y_e)^2} \quad (2.31)$$

Isı kaynağına çarpma mesafesi; (L_h)

$$L_h = \sqrt{(x_s - x_e)^2 + \left(\frac{x_s - x_e}{m}\right)^2} \quad (2.32)$$

Isı kuyusuna çarpma mesafesi; (L_c)

$$L_c = \sqrt{(L - x_e)^2 + \left(\frac{L - x_e}{m}\right)^2} \quad (2.33)$$

Işın demeti sınırların haricinde elbetteki liflere de çarpabilir. Liflere çarpma mesafesinin (L_f) bulunuşu ise her iki çözüm bölgesinde farklı şekillerde olmaktadır ve ilgili bölümlerde açıklanmıştır.

Işın izleme yönteminde bu 5 uzunluk ($L_{\bar{u}}$, L_a , L_h , L_c , L_f) bulunduktan sonra bu uzunluklardan en kisasını ($L_{\min}$) sağlayan koordinatlar ışının çarptığı noktayı verecektir.

$$x = x_e + \sin \alpha' * L_{\min} \quad (2.34)$$

$$y = y_e + \cos \alpha' * L_{\min} \quad (2.35)$$

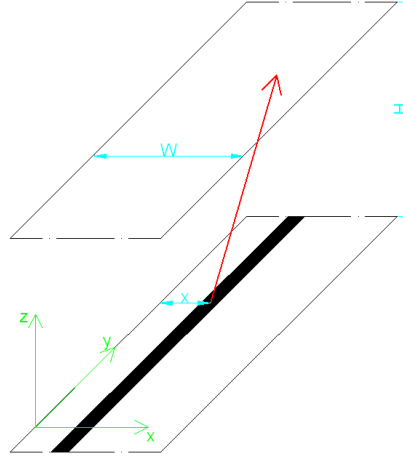
Işının çarpacağı nokta bulunduktan sonra ışının çarptığı yerde yutulup yutulmadığı ve bu her iki durumda hareketine nasıl devam ettiği tanımlanmalıdır. Bu hareket geometrik yansıma ve Mie saçılması bölgelerinde farklıdır ve yine Bölüm 3.1 ve 3.2 de açıklanmıştır.

2.4 Lif Esaslı Yalıtım Malzemelerini Oluşturan Temel Geometriler İçin Elde Edilen Monte Carlo Yönteminin Doğrulanması

Bölüm 2.2'de bulunan olasılık dağılım fonksiyonları, bu çalışmada modellenen lif esaslı yalıtım malzemelerinin geometrisini oluşturan bazı temel parçalar için test edilmiştir. Burada Monte Carlo Işın İzleme yöntemiyle, bu temel geometriler için analitik olarak hesaplanabilen şekil faktörü değeri farklı sayıda ışın gönderilerek bulunmuş ve analitik değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca hata oranları da Denklem 2.36 ile bulunmuş ve tablolarda belirtilmiştir.

$$E \% = \frac{|\text{Analitik değer} - \text{MCII yöntemi değeri}|}{\text{Analitik değer}} \times 100 \quad (2.36)$$

2.4.1 Sonsuz uzunluklu paralel düz levha ile çizgisel eleman arası şekil faktörü değerinin bulunması



Şekil 2.9 : Çizgisel elemandan sonsuz uzunluklu paralel düz levhaya ışınlım.

Uzunluk değerleri (herhangi bir birimde):

$$W=2$$

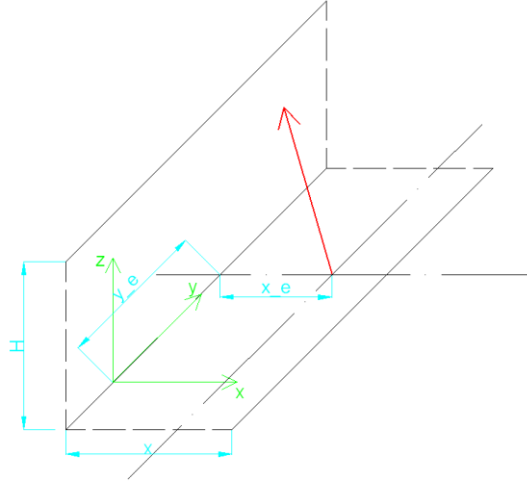
$$x=0,5$$

$$H=1$$

Çizelge 2.1 : Sonsuz uzunluklu paralel düz levha ve çizgisel eleman arası şekil faktörü değerinin bulunuşu.

Gönderilen Işın Sayısı	Şekil Faktörü (F) Analitik Değeri[10]	Monte Carlo Yöntemi ile bulunan değer	Hata %
100	0.6396	0.6100	4.63
1000		0.6280	1.81
10000		0.6353	0.67
100000		0.6394	0.03

2.4.2 Sonsuz uzunluklu birbirine dik yüzeyler arası şekil faktörü değerinin bulunması



Şekil 2.10 : Birbirine dik yüzeyler arası ışınlım.

Uzunluk değerleri:

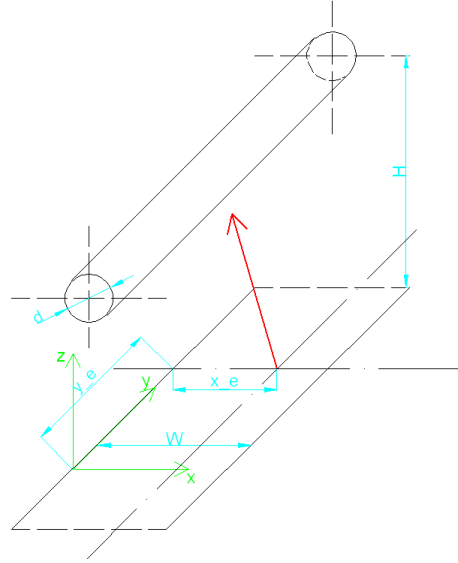
$$H=5$$

$$x=10$$

Çizelge 2.2 : Sonsuz uzunluklu birbirine dik yüzeyler arası şekil faktörü değerinin bulunuşu.

Gönderilen Işın Sayısı	Şekil Faktörü (F) Analitik Değeri[12]	Monte Carlo Yöntemi ile bulunan değer	Hata %
100	0,1910	0.1600	16.23
1000		0.1770	7.33
10000		0.1928	0.94
100000		0.1907	0.16

2.4.3 Sonsuz uzunluklu silindir ve sonsuz uzunluklu yüzey arası şekil faktörü değerinin bulunması



Şekil 2.11 : Sonsuz uzunluklu silindirik ve düz yüzeyler arası ışınlım.

Uzunluk değerleri:

$$W=10$$

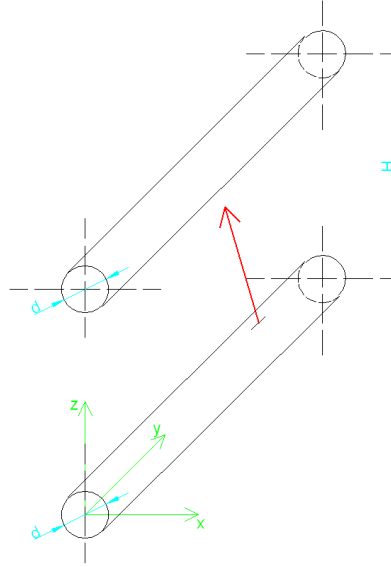
$$H=5$$

$$d=2$$

Çizelge 2.3 : Sonsuz uzunluklu silindirik ve düz yüzeyler arası şekil faktörü değerinin bulunuşu.

Gönderilen Işın Sayısı	Şekil Faktörü (F) Analitik Değeri[12]	Monte Carlo Yöntemi ile bulunan değer	Hata %
100	0.1571	0.1200	23.62
1000		0.1720	9.48
10000		0.1534	2.36
100000		0.1570	0.006

2.4.4 Sonsuz uzunluklu paralel silindirler arası şekil faktörü değerinin bulunması



Şekil 2.12 : Sonsuz uzunluklu paralel silindirler arası ışınlım.

Uzunluk değerleri:

$$d=2$$

$$H=3$$

Çizelge 2.4 : Sonsuz uzunluklu paralel silindirler arası şekil faktörü değerinin bulunuşu.

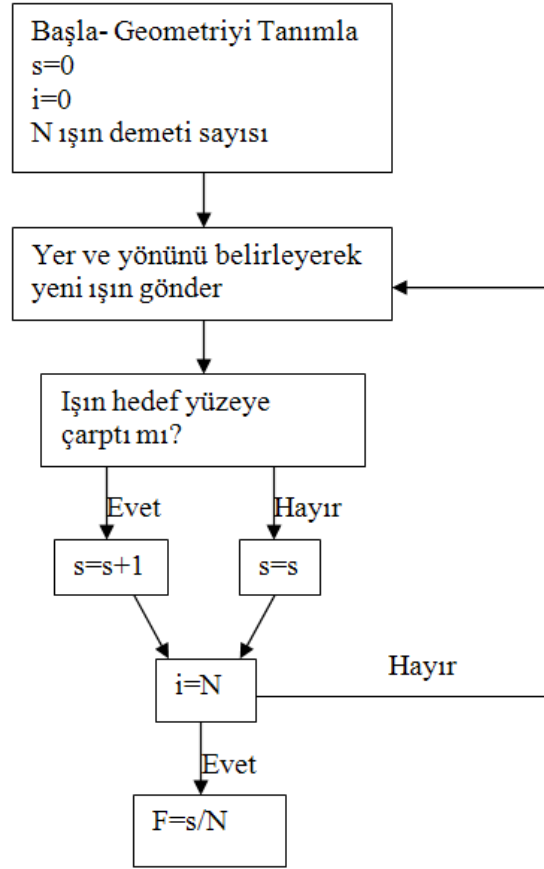
Gönderilen Işın Sayısı	Şekil Faktörü (F) Analitik Değeri[12]	Monte Carlo Yöntemi ile bulunan değer	Hata %
100	0.1110	0.1400	26.13
1000		0.1010	9.01
10000		0.1096	1.26
100000		0.1111	0.09

2.4.5 Sonuç

Daha önce de öngörüldüğü üzere örnekleme sayısının artması hata oranını düşürmüştür. Şekil faktörü hesaplamalarında, böyle basit geometriler için, genellikle 10000 ışın demetinin gönderilmesi yeterli görünmektedir.

Alınan sonuçlar, kullanılan MCII yönteminin uygunluğunu göstermiştir.

Şekil faktörlerinin bulunması için yazılan MATLAB kodunun akış şeması aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.13 : Şekil Faktörü Hesabı Akış Şeması.

3. LİF ESASLI YALITIM MALZEMELERİNDE IŞINIMLA ISI GEÇİŞİ

3.1 Giriş

Lif esaslı yalıtım malzemeleri, %90'ın üzerindeki boşluklu yapısı sayesinde, iletimle ısı geçişine karşı direnç gösterir. Fakat öte yandan, bu boşluklar ısı elektromanyetik ışınların malzeme içinde yayılmasına da neden olur. Işınımın, sıcaklığın dördüncü derecesiyle orantılı olması sıcaklık arttıkça ışınlımla ısı geçişinin çok daha fazla artması manasına gelir. Bu yüzden yüksek sıcaklıklarda ışınlım, lif esaslı yalıtım malzemelerinde ısı geçişindeki ana mekanizmadır. Öte yandan, lif esaslı yalıtım malzemelerinde ısı geçişinin bir diğer baskın mekanizması olan gaz iletimi ile ısı geçişi ortam basıncı ile birlikte azalır. Işınım ise basınçla değişmediğinden, düşük basınçlı sistemlerde, tüm sıcaklık değerlerinde, baskın ısı geçişi mekanizmasıdır. Bu yüzden doğru incelenmesi büyük önem taşır.

Işınım ile ısı geçişinin modellenmesinde önemli parametrelerin ilki boyut parametresi (α) dır. Bu parametre parçacığın herhangi bir engele çarptıktan sonraki, aşağıda belirtilecek, muhtemel üç olaydan hangisine göre hareket ettiğini gösterir.

$$\alpha = \frac{\pi d_f}{\lambda} \quad (3.1)$$

Burada d_f ve λ , sırasıyla yalıtım malzemesini oluşturan liflerin ortalama çapı ve ışının dalga boyudur. Boyut parametresine göre ışının çarptığı liften sonraki davranışını açıklayan durumlar aşağıda verilmiştir.[13]

Çizelge 3.1 : Boyut parametresine göre saçılım tipleri.

α değeri	Durum
$\alpha > 10$	Geometrik Yansıma
$0.1 < \alpha < 10$	Mie Saçılması
$\alpha < 0.1$	Rayleigh Saçılması

Geometrik yansıma bölgesinde ışın, çarptığı liflerden ayna benzeri yansırken, Mie ve Rayleigh bölgelerinde ise, boyut parametresi, lif refraktif indeksi ve yutma katsayısı

gibi faktörlere bağılı olarak yöne bağılı bir şekilde saçılır.

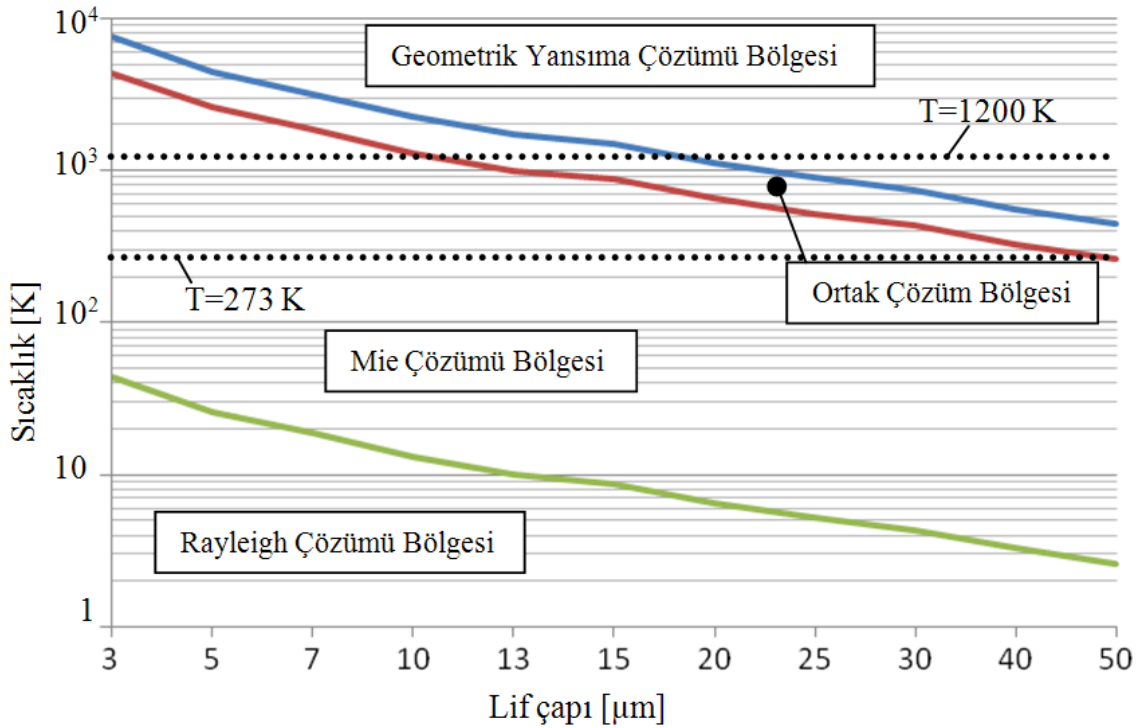
Denklem 3.1'den görüldüğü üzere boyut parametresini belirleyebilmek için ışıının dalga boyuna ihtiyaç vardır.

ışıının dalga boyunun bulunmasında bant emisyonlarından faydalanılır [14]. Spektral band ve boyut parametresine göre oluşturulmuş Çizelge 3.2'de lif çapı ve sıcaklığa göre saçılım tiplerinin oranları verilmiştir. Çizelge küçük ve orta büyüklüklü lif çaplarında baskın olayın Mie saçılması olduğunu, büyük çaplı liflerin ise özellikle yüksek sıcaklıklarda Geometrik yansımaya sebep olduğunu göstermektedir. Öte yandan, Rayleigh saçılımı ise lifli malzemelerde hemen hemen hiç meydana gelmemektedir.

Çizelge 3.2 : Lif çapı ve sıcaklığa göre saçılım tiplerinin oranları.
(R:Rayleigh,M:Mie, G:Geometrik)

Sıcaklık T [K]	$d_f=3 \mu\text{m}$			$d_f=10 \mu\text{m}$			$d_f=30 \mu\text{m}$			$d_f=50 \mu\text{m}$			Ortalama Lif Çapı
	R	M	G	R	M	G	R	M	G	R	M	G	Saçılım Tipi
1200	~0	99.83	0.17	~0	56.3	43.7	~0	6.3	93.7	~0	1.6	98.4	% Saçılım tipi oranı
900	~0	100.0	~0	~0	76.6	23.4	~0	12.6	87.4	~0	3.7	96.3	
600	0.1	99.9	~0	~0	96.1	3.9	~0	29.4	70.6	~0	9.9	90.1	
300	0.7	99.3	~0	~0	100.0	~0	~0	76.6	23.4	~0	40.5	59.5	

Şekil 3.1’de lif esaslı yalıtım malzemelerinde ışınımın çözülmesinde, hangi çözüm yönteminin uygulanması gerektiği, renkli sınırların arasında, lif çapı ve yalıtım malzemesinin ortalama sıcaklığına bağlı olarak gösterilmiştir. Burada ortalama sıcaklık olarak ısı kaynağı ve ısı kuyusu sıcaklıklarının aritmetik ortalaması alınabilir. Şekil kısaca açıklanacak olursa, örnek olarak 5 μm çapındaki fiberlerden oluşan ve ortalama 1000 K sıcaklıkta olan bir yalıtım malzemesi için çözümleme Mie saçılımına göre yapılmalıdır. Öte yandan aynı sıcaklıkta malzeme 40 μm çapındaki liflerden oluşuyorsa, bu kez çözümleme geometrik yansıma prensibine göre yapılmalıdır. Ortak çözüm bölgesinde bulunan koşullarda ise yalıtım malzemesinin sıcaklık dağılımı bulunarak, iki çözüm yöntemi birleştirilerek çözüme gidilmelidir.



Şekil 3.1 : Ortalama yalıtım malzemesi sıcaklığı ve lif çapına göre uygulanacak çözüm yöntemi.

Yalıtım malzemelerinde kullanılan liflerin çapları değişiklik göstermekle beraber genelde 3-15 μm arasında değişmektedir. Buna göre lif esaslı yalıtım malzemelerinde genelde etkin olan durumun Mie Saçılımı olduğu anlaşılmaktadır. Işınımın, geometrik yansıma ve Mie saçılımı durumlarında MC metodu kullanılarak modellenmesi aşağıdaki bölümlerde incelenmiştir.

yazılarak ışın demetinin herhangi bir life çarpıp çarpmadığı, çarpıyorsa hangi lifleri hangi noktalarda kestiği bulunur. Bu noktaların ışın demetinin yayıldığı noktaya en yakın olanı ışın demetinin çarptığı noktayı (x,y) verecektir.

Örnek olarak, Şekil 3.2 gözönüne alınırsa, kaynaktan çıkan ışın demeti (x,y), (x',y') ve (x'',y'') noktalarını kesmektedir ve ışın demetinin ilk çarptığı nokta olan (x,y) noktasından ışın demeti ayna benzeri yansıyacaktır. Bu noktanın yayılma noktasına uzaklığı ise basit bir şekilde aşağıdaki gibi bulunur.

$$L_f = \sqrt{(x - x_e)^2 + (y - y_e)^2} \quad (3.3)$$

Işının herhangi bir life çarpmadığı durumda ise ışın demeti, Bölüm 2.3' te anlatıldığı gibi bir sınıra çarpacak demektir.

Geometrik yansıma bölgesinde ışın demetinin çarptığı yerde iki hareketi olasıdır:

- Ayna benzeri yansıyabilir: Yutulmadıysa ($R_f > f_a$) liflerden ve sanal sınırlardan
 - Yutulabilir: Isı kaynağında, ısı kuyusunda ya da $R_f < f_a$ durumunda liflerde.
- Burada R_f ve f_a sırasıyla rasgele sayı üretici tarafından üretilmiş sıfır ile bir arasında bir sayı ve lifin yutma katsayısı (absorbtivite) değeridir.

Işın demeti lif tarafından yutulduğunda enerjinin korunumu gereğince izotropik olarak tekrar neşredilir. Isı kuyusu ya da ısı kaynağı tarafından yutulduğu takdirde ise ışın izleme sona erer ve kaynaktan yeni bir ışın demeti gönderilir. Bu işlem yeter sayıda ışın demeti gönderilene kadar devam ettirilip ısı kuyusuna ulaşan ışın demetleri sayılarak ısı geçişi bulunur. Şekil 3.3'te bu prosedürü açıklayan MATLAB akış şeması verilmiştir.

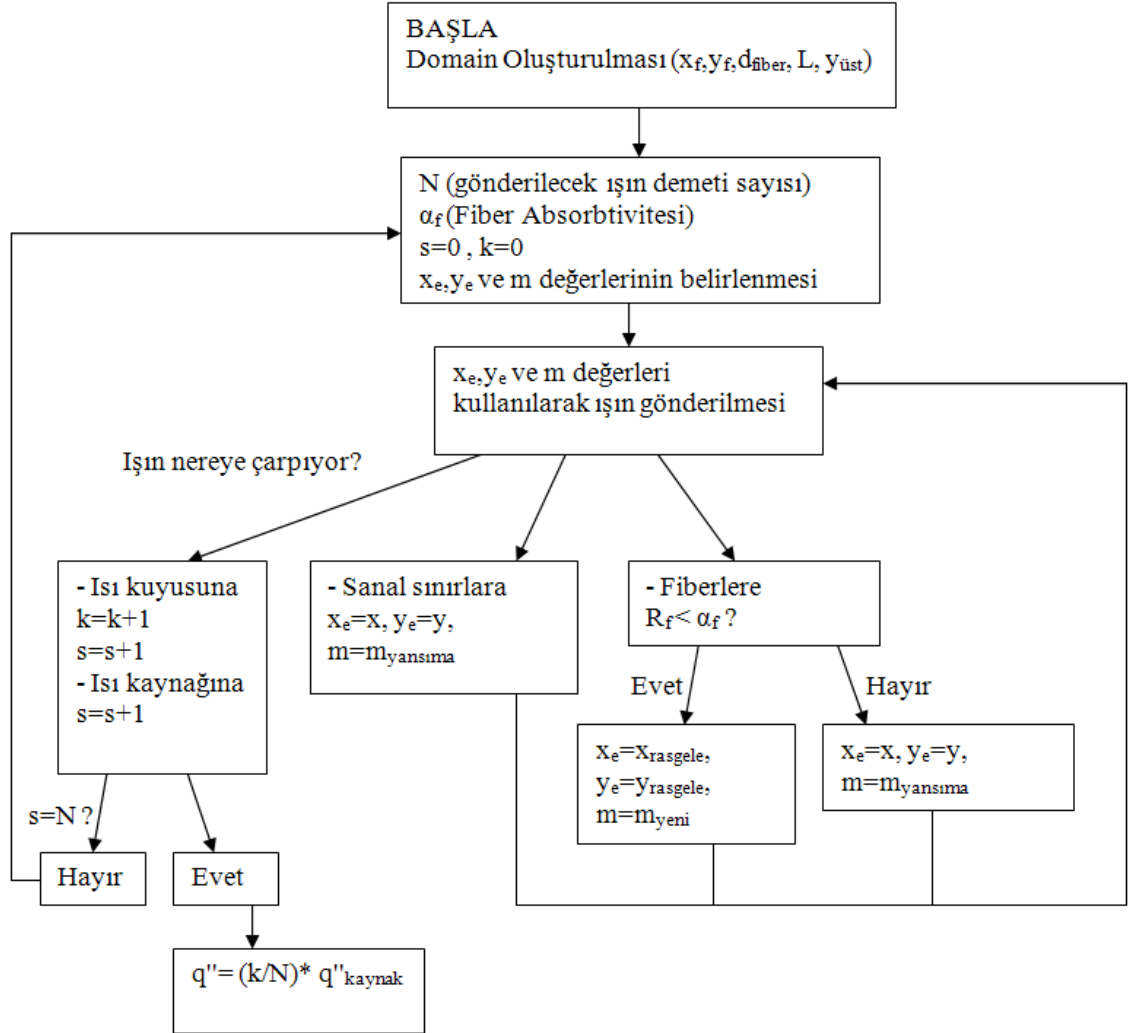
Şemada $m_{yansima}$ terimi, m eğimine sahip ışının çarptığı noktadan ayna benzeri yansdıktan sonra aldığı eğimi, m_{yeni} değeri, lif tarafından yutulduktan sonra enerjinin korunumu gereği tekrar neşredilen ışının eğimini göstermektedir ve m ile aynı şekilde Denklem 2.25 yardımıyla bulunur. $x_{rasgele}$, $y_{rasgele}$ terimleri ise lif tarafından yutulan ışının, tekrar yayılacağı noktanın koordinatlarını göstermektedir. Bu noktalar rasgele sayılar ilişkisine göre aşağıdaki şekilde bulunur;

$$\Theta = 2\pi R_\Theta \quad (3.4)$$

$$x_{rasgele} = x_m + \sin \Theta \cdot d_f \quad (3.5)$$

$$y_{rasgele} = y_m + \cos \Theta . d_f \quad (3.6)$$

Burada R_Θ ve şemada bulunan R_f terimleri rasgele sayı üretici ile üretilmiş 0 ile 1 arası sayılardır.



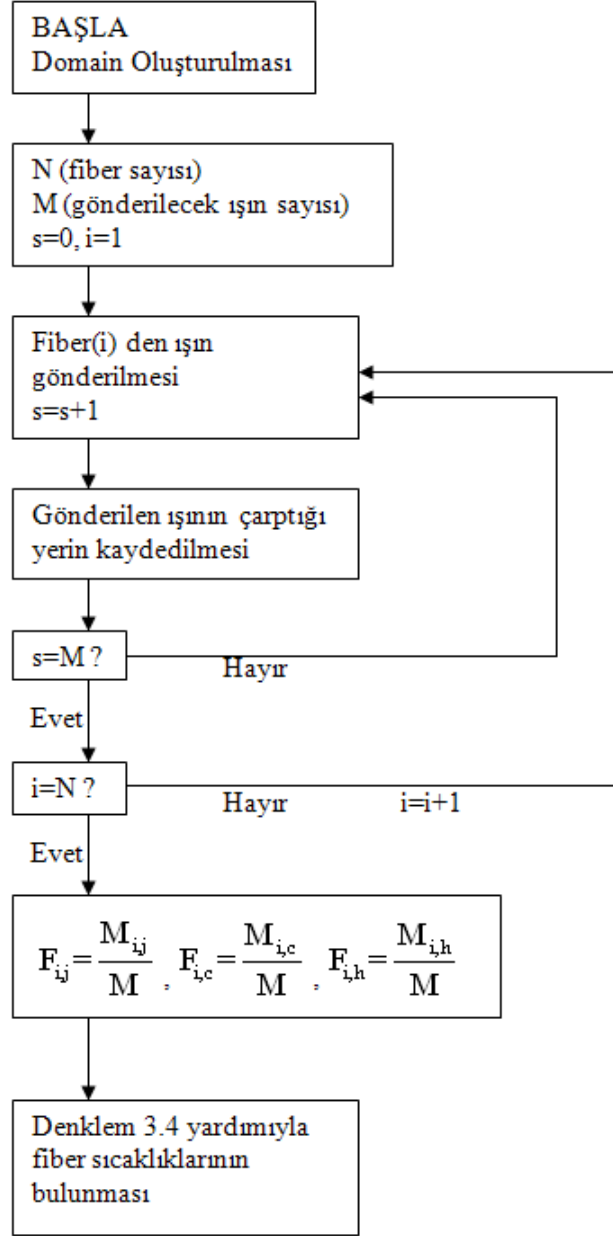
Şekil 3.3 : Geometrik yansıma bölgesinde ısı geçişinin bulunması.

Geometrik yansıma bölgesindeki en önemli sınırlamalardan birinin yüksek sıcaklık gerekliliği olduğuna değinilmişti. Bu nedenle yalıtım malzemesi içinde sıcaklığın giderek düşmesi yapılan çözümleme de hataya sebep olmaktadır. Bu hatanın kabul edilebilir bir mertebede olup olmadığının bilinmesi için yalıtım malzemesi içinde sıcaklık dağılımına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ise her bir lifin ışınlam ısı dengesinde olduğu düşünülerek aşağıdaki enerji denklemi yardımıyla bulunur [7].

$$\sum_{j=1}^n F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) + F_{i,h} (T_i^4 - T_h^4) + F_{i,c} (T_i^4 - T_c^4) = 0 \quad (3.4)$$

Burada $F_{i,j}$ lifler arasında şekil faktörünü, $F_{i,h}$ ve $F_{i,c}$ ise sırasıyla lif-ısı kaynağı ve lif-ısı kuyusu şekil faktörünü belirtmektedir. Denklem 3.4 tüm lifler için yazılıp bilinen sınır sıcaklık değerleri ve ışıın izleme prosedürüne göre bulunan şekil faktörleri yardımıyla çözülerek lif sıcaklıkları elde edilir.

Şekil 3.4'te şekil faktörlerinin ve sıcaklıkların bulunması için yazılan MATLAB kodunun akış diyagramı verilmiştir. Şemada $M_{i,j}$, $M_{i,c}$, $M_{i,h}$ terimleri i fiberinden çıkan ve sırasıyla j fiberine, ısı kuyusuna ve ısı kaynağına çarpan toplam ışıın demeti sayılarını göstermektedir.



Şekil 3.4 : Şekil Faktörleri ve lif sıcaklıklarının bulunması.

3.3 Mie Saçılması Bölgesinde Monte Carlo Metodunun Kullanımı

3.3.1 Giriş

Daha önce de değinildiği ve 3.1 grafiğinden de görüldüğü gibi, geometrik saçılma yalıtım malzemelerinde çok kısıtlı durumlarda görülmektedir. Bunun için sıcaklıkların çok yüksek ve lif çaplarının kalın olması gerekmektedir. Dahası lif sıcaklıkları yalıtım malzemesi boyunca düştüğünden ısı kaynağı çok sıcak olsa dahi malzeme içinde ışın davranışı Mie Saçılmasına göre olabilecektir. Dolayısıyla

sonra ya lif tarafından yutulur ya da, Şekil 3.7’de şematik olarak gösterildiği gibi, yöne bağlı olarak birçok ışın olarak saçılır. Fakat Monte Carlo metodunda tek bir ışının izlenmesi gerektiğinden, gelen ışının, saçılma faz fonksiyonuna göre, Şekil 3.5’te gösterilen, θ_p ve Ψ_p kadar bir sapma göstererek hareket ettiği düşünülüp ışın izlenmeye devam edilir. θ_p ve Ψ_p açısıyla sapan doğrunun yeni eğimi ise analitik geometri yardımıyla aşağıdaki şekilde bulunur [15];

$$\theta' = \cos^{-1} \left(\cos \Psi_p \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \sin \theta_p + \cos \theta \cos \theta_p \right) \quad (3.6)$$

Lif çarpan ışın demetinin yutulup yutulmadığına ise lif albedosu (ω) ve rasgele sayılar ilişkisine göre karar verilir.

- $R_\omega < \omega$ ise saçılıyor
- $R_\omega > \omega$ ise lif tarafından yutuluyor

Lif albedo değeri, lif ışın saçma katsayısının (σ_s) lif ışın sönümlleme katsayısına (κ_s) oranıdır ve Denklem 3.7 ile ifade edilir. R_ω ise 0 ile 1 arasında rasgele bir sayıdır.

$$\omega = \frac{\sigma_s}{\kappa_s} = \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \zeta} \quad (3.7)$$

Işın sönümlleme katsayısının, lif ışın saçma katsayısı ve lif ışın yutma katsayısının (ζ) toplamı olduğu Denklem 3.7’de görülmektedir.

Sürekli sistemde bir ışınım dengesi olduğu kabulü yapılırsa, ışın yutulduğunda, yine yutulduğu lif tarafından izotropik olarak tekrar neşredilecektir [16]. Bu durumda, ışın demeti Bölüm 2.2.2’de verilen Denklem 2.24 ve Denklem 2.27’e göre hareketine devam ettirilmelidir.

Işın demeti yutulmayıp saçılıyorsa, Ψ_p değeri, azimuthal yönde ışınım hep izotropik kabul edildiğinden yine aynı şekilde Denklem 2.24’e göre belirlenecek, θ_p ise faz fonksiyonlarına göre Denklem 2.25 ile bulunacaktır. Faz fonksiyonları Bölüm 3.3.2’de açıklanmıştır.

Yukarıda anlatılan ışın izleme prosedürü aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1. Işının neşredilme yeri saptanır
2. Işın yönü MC metoduna göre belirlenir

3. Işının çarptığı nokta bulunur (Denklem 2.34 ve 2.35)
4. Bu noktada ışının yutulup yutulmadığı belirlenir
 - $R_\omega < \omega$ ise saçılıyor
 - $R_\omega > \omega$ ise lif tarafından yutuluyor
5. Enerjinin korunumu dolayısıyla eğer ışın yutulduysa yutulduğu yerden izotropik olarak tekrar neşredilir.

Yutulmadıysa faz fonksiyonuna uygun olarak saçılacaktır. Bu saçılma tanımlanarak, ışın demeti izlenmeye devam edilir.
6. Işın demeti ısı kaynağına ya da ısı kuyusuna gelirse izlenmesi son bulur ve istenen demet sayısına ulaşılan kadar ısı kaynağından yeni bir ışın gönderilir. Isı kuyusu tarafından yutulan ışın demetleri sayılır ve ısı kuyusuna gelen ısı akısı Denklem 3.8 ile hesaplanır.

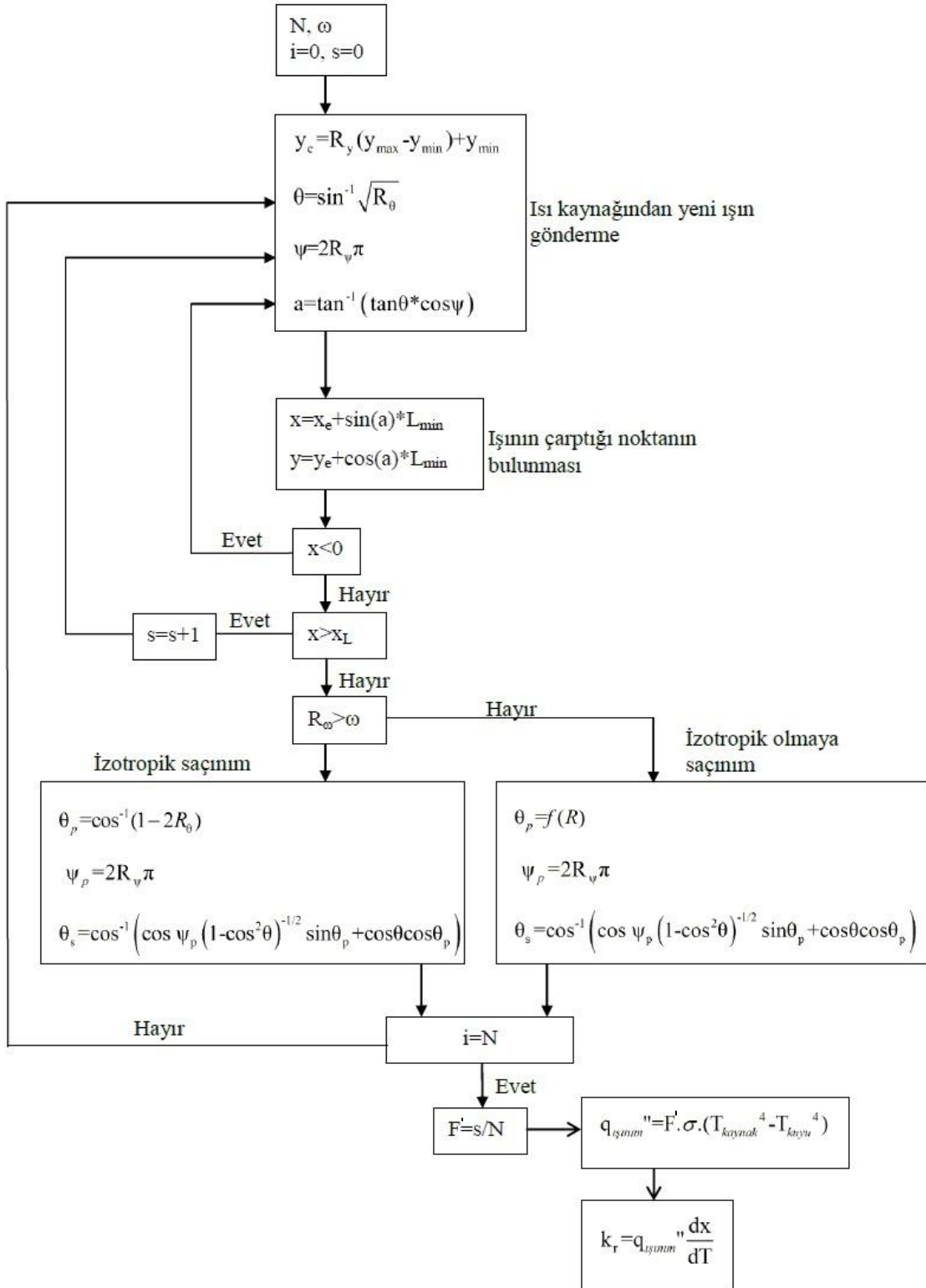
$$q_{ışınım}'' = F' \cdot \sigma \cdot (T_{kaynak}^4 - T_{kuyu}^4) \quad (3.8)$$

Burada, F' terimi ısı kuyusuna ulaşan ışın demetinin ısı kaynağından yayılan toplam ışın demeti sayısına oranıdır. σ ise Stefan-Boltzmann sabitidir.

7. Eşdeğer ışınlımla ısı iletimi katsayısı bulunur.

$$k_r = q_{ışınım}'' \frac{dx}{dT} \quad (3.9)$$

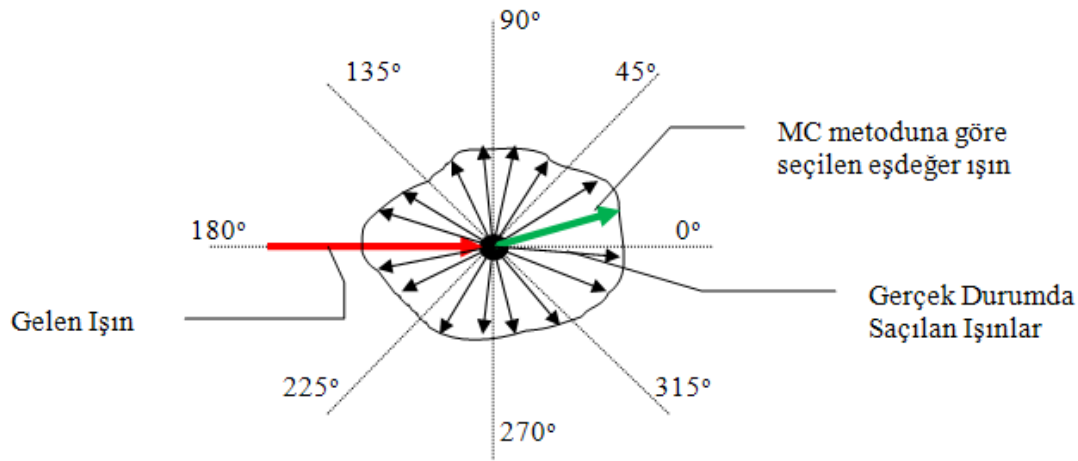
Aşağıda olayı çözümlleyen Matlab akış şeması verilmiştir. Şemada ω lif albedo değerini, N gönderilen ışın demeti sayısını göstermektedir.



Şekil 3.6 : Mie çözümü için akış diyagramı.

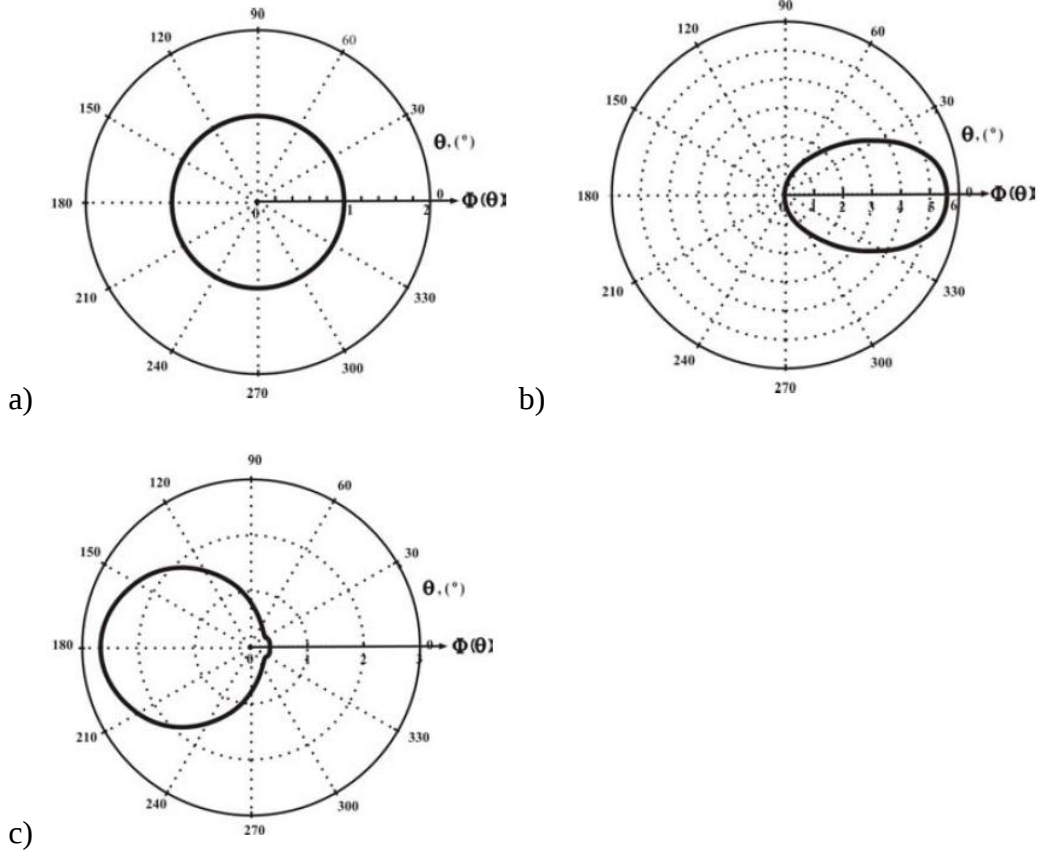
3.3.2 Faz fonksiyonları

Işın izleme yöntemindeki en önemli konulardan bir tanesi ışının liflere çarptıktan sonraki hareketini doğru modelleyebilmektir. Geometrik bölgede bu ayna gibi yansıma şeklinde olurken, Mie bölgesinde bunun saçılma şeklinde olduğu daha önce belirtilmişti. İşte bu saçılmanın yöne bağlılığının bulunması MC yönteminde kullanılacak kümülatif dağılım fonksiyonunu bulmak için şarttır. Dolayısıyla öncelikle bu dağılım bulunarak kümülatif dağılım fonksiyonu bulunacak ve MCII yöntemi uygulanacaktır. Şekil 3.7 Mie saçılması bölgesinde gelen bir ışının bir parçacığa çarptıktan sonraki saçılmasını ve MCII yöntemine göre seçilen eşdeğer ışın demetini şematize etmektedir.



Şekil 3.7 : Mie bölgesinde eşdeğer ışın seçiminin gösterimi.

Üç çeşit saçılma türünden bahsedilebilir; izotropik, ileri yönlü ve geri yönlü. İzotropik saçılımda gelen ışın, parçacığa çarptıktan sonra her yöne eşit olarak saçılır. İleri ve geri yönlü saçılımlar ise gelen ışının nispeten ileri ya da geri yöne doğru daha fazla saçıldığını belirten terimlerdir. Bu saçılma tipleri faz fonksiyonları ile matematiksel ifadesini bulurlar. Şekil 3.7’de bu saçılma tiplerini gösteren faz fonksiyonları örneklenmiştir [9].



Şekil 3.8 : Saçılma tiplerinin faz fonksiyonu grafiğinde örnek gösterimleri [9].: a) İzotropik b) İleri yönlü c) Geri yönlü

Lif esaslı yalıtım malzemelerinin çözümlenmesinde araştırmacılar zaman zaman izotropik saçılım kabulünü kullansalar da ileri yönlü bir saçılım olduğu deneylerle kanıtlanmış, Mie denklemleri ile de çözümlenmiştir.

Mie denklemleri çözümünün oldukça uzun ve karmaşık oluşu her bir farklı durum için (değişen lif malzemesi, lif çapı ve sıcaklık) bu denklemleri çözmeyi oldukça zorlaştırır. Bu durum araştırmacıları daha kolay yöntemler bulmaya itmiştir. Bu konuda en fazla kullanılan yöntem Legendre denklemleridir.

Legendre denklemleri -1, +1 aralığında tanımlı, ± 1 noktalarında kaldırılabilir tekilliğe sahip denklemlerdir ve Denklem 3.10'da verilmiştir.

$$\Phi(\hat{s}', \hat{s}) = \Phi(\cos\theta) = \sum_{j=0}^N C_j P_j(\cos\theta) \quad (3.10)$$

P_j değerlerine Legendre polinomları denir ve aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

$$P_j = \frac{2 \cdot j - 1}{j} \cdot \cos \theta \cdot P_{j-1}(\cos \theta) - \frac{j-1}{j} \cdot P_{j-2}(\cos \theta) \quad (3.11)$$

C_j değerleri ise Legendre katsayılarıdır ve bu çalışma dâhilinde literatürden alınan Legendre katsayıları ile üç adet ileri yönlü Legendre Denklemi ışın saçılımının modellenmesinde denenmiştir. Kullanılan katsayılar aşağıda tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Legendre Katsayıları [6] [9][17].

	C_j		
j	F1	F2	F3
0	1	1	1
1	1	2,00917	2,53602
2		1,56339	3,56549
3		0,67407	3,97976
4		0,22215	4,00292
5		0,04725	3,66401
6		0,00671	3,01601
7		0,00068	2,23304
8		0,00005	1,30251
9			0,52463
10			0,20136
11			0,0548
12			0,01099

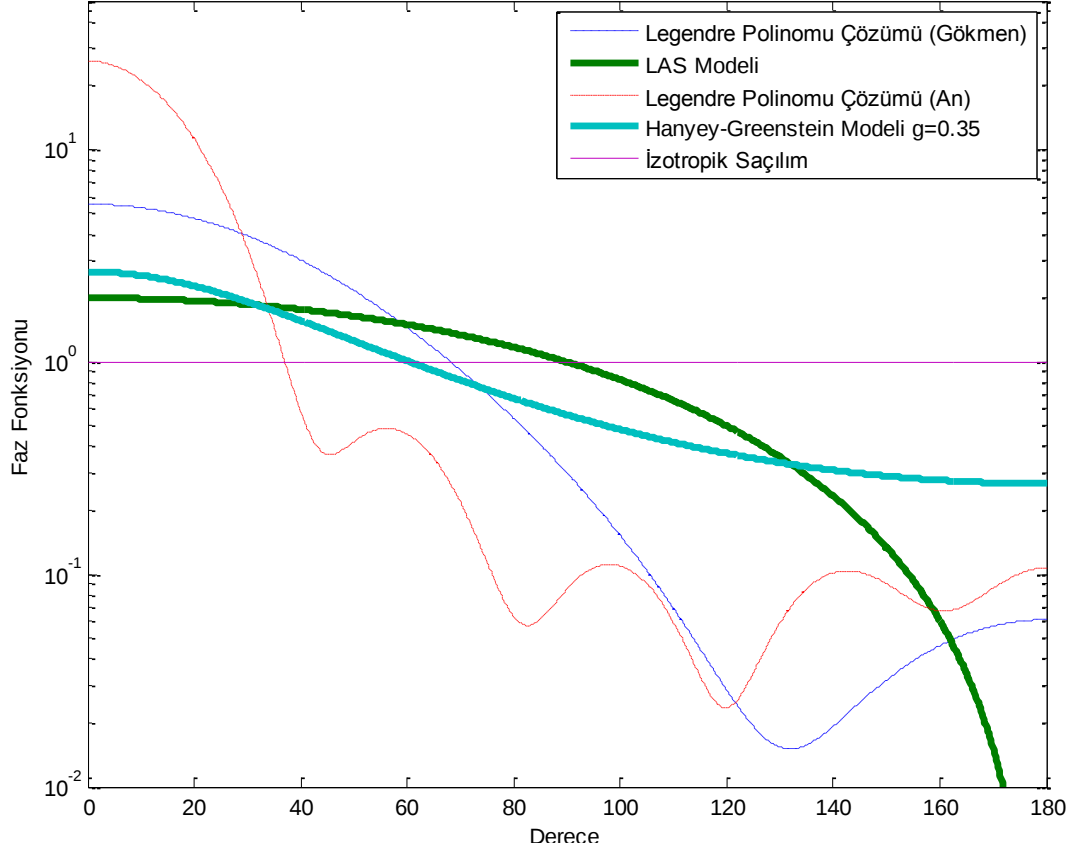
Legendre Denklemleri ile oluşturulan bir diğer yöntem ise Hanyey-Greenstein (HG) denklemleridir. Bu denklemle de faz fonksiyonu modellenabilmektedir.

$$\Phi(\hat{s}', \hat{s}) = \frac{(1 - g^2) \sin \theta}{2(1 + g^2 - 2g \cos \theta)^{3/2}} \quad (3.10)$$

Burada g , HG katsayısı, -1 ile 1 arasında değişmekte ve -1 tamamen geri saçılımı 0 izotropik saçılımı 1 ise tamamen ileri saçılımı göstermektedir. Bu çalışmada g katsayısı olarak, Çizelge 3.3'te F1 katsayıları ile tanımlanan Lineer Anizotropik Saçılım (LAS) modeli faz fonksiyonuna yakın bir faz fonksiyonu verdiği için $g=0.35$ değeri çalışma boyunca kullanılmış, uygunluğu test edilmiştir.

Yukarıda anlatılan saçılım türlerine ait faz fonksiyonları Denklem 2.25 ve 2.26 yardımıyla çözülür.

Şekil 3.9’da elde edilen faz fonksiyonları gösterilmiştir.



Bu faz fonksiyonları kullanılarak yapılan çözümlemeler, Bölüm 5’ te Uygulamalar ve Karşılaştırma kısmında verilmiştir.

4. DİĞER ISI GEÇİŞİ MEKANİZMALARI

Daha önce de bahsedildiği üzere, lif esaslı yalıtım malzemelerinden ısı geçişi, ışıınım, katı iletimi ve gaz iletimi ile olmaktadır. Bu çalışmanın özgünlüğü ışıınımla ısı geçişinin MC yöntemi ile bulunması olsa da konunun bir bütün olarak anlaşılabilmesi için diğer ısı geçişi mekanizmalarını da incelemek gerekir. Dahası, bu mekanizmaları incelemek ve sağlıklı sonuçlar almak, bulunan çözümlerin yapılan kimi deneylerle karşılaştırılabilmesi için şarttır.

Bu yüzden bu bölümde, gaz iletimi ile ısı geçişi ve katı iletimi ile ısı geçişi terimleri incelenecektir.

4.1 Lif Esaslı Yalıtım Malzemelerinde Gaz İletimi ile Isı Geçişi

Lif esaslı yalıtım malzemelerinde gaz iletimi ile ısı geçişi ampirik formüller kullanılarak bulunmaktadır. Bunun için en fazla kabul gören bağıntı, gaz ısıl iletim katsayısını (k_g), ortam basıncı ve sıcaklığını gözeterek efektif gaz ısıl iletimi olarak tekrar tanımlayan, Denklem 4.1 bağıntısıdır [4].

$$k_g = \frac{k_g^*}{\beta + 2\Psi \frac{2-\tau}{\tau} \frac{2\gamma}{\gamma+1} \frac{1}{Pr} Kn} \quad (4.1)$$

Burada, β ve Ψ boyutsuz katsayıları Knudsen sayısına göre değişmektedir. Knudsen sayısı 0.01 den küçük olduğu durumlarda (sürekli rejim) $\beta=1$ ve $\Psi=0$ alınabilir. Knudsen Sayısı 0.01 ile 10 arasında olan durumlarda (geçiş rejimi) $\beta=1$ ve $\Psi=1$ değerini alır. Knudsen Sayısı 10'dan büyük ise (serbest moleküler rejim) $\beta=0$ ve $\Psi=1$ olarak kabul edilir.

Denklemde, τ ve γ terimleri ısıl etkiyi gösteren katsayılarıdır. Bu değerler lifli yalıtım malzemeleri için sırasıyla 1 ve 1.4 olarak alınabilir [4]. k_g^* ise atmosfer basıncındaki gaz ısıl iletkenlik katsayısıdır.

Knudsen sayısı ise aşağıdaki şekilde tanımlanır;

$$Kn = \frac{\xi}{L_c} \quad (4.2)$$

Gaz moleküler ortalama serbest yolu, ξ ;

$$\xi = \frac{K_B T}{\sqrt{2} \pi d_g^2 P} \quad (4.3)$$

Karakteristik uzunluk, L_k ;

$$L_k = \frac{\pi D_f}{4 f} \quad (4.4)$$

Burada f , yalıtım malzemesi yoğunluğunun, lif malzemesi yoğunluğuna oranı, K_B Boltzmann sabiti (1.3806×10^{-23} J/K), T ortam sıcaklığı (K), d_g gaz çarpışma çapı (gas collision diameter, (m)), P ortam basıncı (Pa) ve D_f yalıtım malzemesi ortalama lif çapıdır (m).

4.2 Lif Esaslı Yalıtım Malzemelerinde Katı İletimi ile Isı Geçişi

Gaz ısıl iletim katsayısında olduğu gibi katı ısı iletimi katsayısını (k_s) hesaplarında da ampirik formüllerden faydalanılır. Denklem 4.5'te çalışmada kullanılan formül belirtilmiştir [4].

$$k_s = f^{1.47} k_s^{**} \quad (4.5)$$

Burada k_s^{**} lif ana malzemesinin ısı iletim katsayısını belirtmektedir.

4.3 Gaz İletimi ve Katı İletimi ile Isı Geçişi Katsayılarının Toplanması

İletimle ısı geçişi terimlerinin toplanmasında kullanılmak üzere araştırmacılar pek çok ampirik ifade önermişlerdir. Bu çalışmada aşağıdaki bağıntıdan faydalanılmıştır [4].

$$k = f \cdot k_s + (1-f) k_g \quad (4.6)$$

Lif esaslı yalıtım malzemelerinde f oranının çok küçük olduğu hatırlanırsa, baskın ısı

iletimi mekanizmasının gaz iletimi olduğu kolaylıkla görülebilir.

5. UYGULAMALAR VE KARŞILAŞTIRMA

Şu ana kadar lif esaslı yalıtım malzemelerinde ısı geçişi mekanizmaları incelenmiş, baskın terim olduğu bilinen ışınlama ısı geçişi üzerine yoğunlaşmış ve bu mekanizmanın MC yöntemiyle çözümlenmesi anlatılmıştır. Bu bölümde ise yapılan bu çözümlerinin doğruluğunun test edilmesi için literatürde ilgili çalışmalar incelenmiş ve sonuçları aşağıdaki bölümlerde karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

5.1 Geometrik Yansıma Bölgesinde Yapılan Çözümleme ve Sonuçlar

Çalışma ile Bölüm 3.2’de anlatılan çözüm metodu kullanılarak geometrik yansıma bölgesinde, yalıtım malzemelerinde, değişik yoğunlukların, lif çaplarının, lif absorbtivite değerlerinin ve malzeme kalınlıklarının, ışınlama ısı geçişine etkisi incelenmiştir.

Bölüm 1.2’de anlatıldığı üzere, geometrik yansıma bölgesinde araştırma yapan araştırmacılardan Arambakam, benzer bir çalışmada, malzeme iç yapısını lifler ısı kaynağına paralel ve eşit aralıklı dizili olduğunu kabul ederek çözümleme yapmıştır [7]. Bu çalışmada ise bahsedilen çalışma temel alınmış, fakat içyapı kabulünde ve kullanılan ışın izleme yönteminde bazı değişikliklere gidilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Burada içyapı kabulünde yapılan değişiklik, lif yönünün ısı kaynağına paralelliği korunurken, liflerin düzgün sıralı yerine rasgele sıralı yerleştirilmesidir. Bunun daha gerçekçi bir sonuç vereceği tahmin edilmiştir. Işın izleme yöntemi ise bahsedilen çalışmada, lif sıcaklıklarının bulunmasını müteakip, her bir liften sıcaklığının 4. kuvveti ile orantılı ışın gönderilip bunların izlenmesine dayanmaktadır. Ayrıca liflerin, gelen ışının enerjisini absorbtivite değeri oranında yuttuğu kabulünü yapmıştır. Bu çalışmada ise daha kısa ve az hataya neden olacağı düşünülen ve Bölüm 3.2’de detaylı olarak anlatılan yöntem kullanılmıştır.

5.1.1 Çalışma düzeneği ve kabuller

Çalışmada Şekil 3.2’de görüldüğü üzere ısı kaynağı ile ısı kuyusu arasında bir yalıtım malzemesi düşünülmüştür. Isı kaynağı sıcaklığı 1200 K, ısı kuyusu sıcaklığı ise 300 K dir.

Isı kaynağı ve ısı kuyusu siyah cisim olarak kabul edilmiştir. Lifler ise gri cisim özelliğindedir.

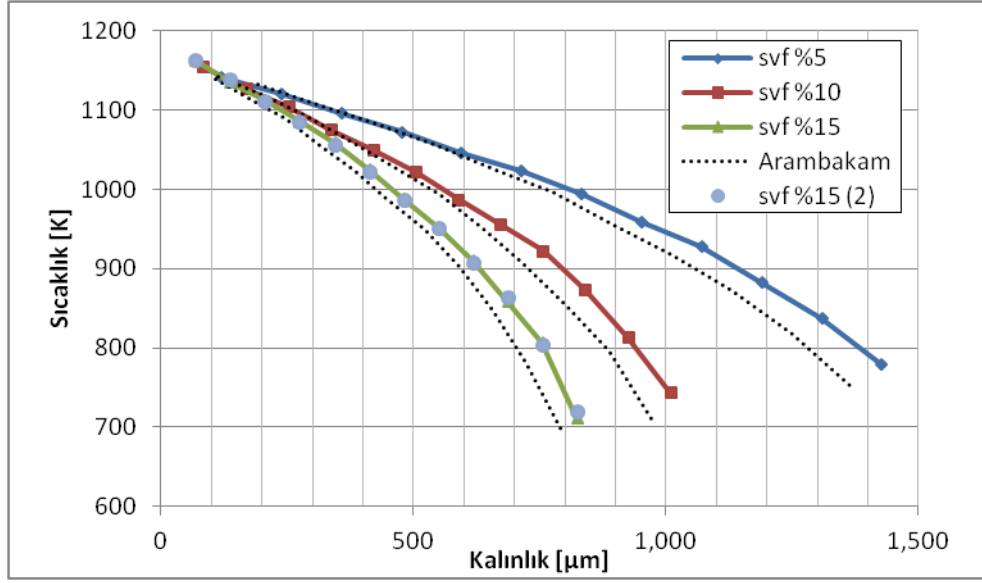
Daha önce bahsedilen sanal sınırların ışını ayna gibi yansıttığı ve bu sınırlarda ışının yutulmasının söz konusu olmadığı kabul edilmiştir.

Çalışmada 30,40 ve 50 μm çaplarındaki liflerden oluşan yalıtım malzemelerinde ve de farklı katı bileşen oranlarında (SVF) ısı geçişi incelenmiştir. Katı bileşen oranı yalıtım malzemesi yoğunluğunun lif malzemesi yoğunluğuna oranı olarak adlandırılabilir.

5.1.2 Sonuçlar

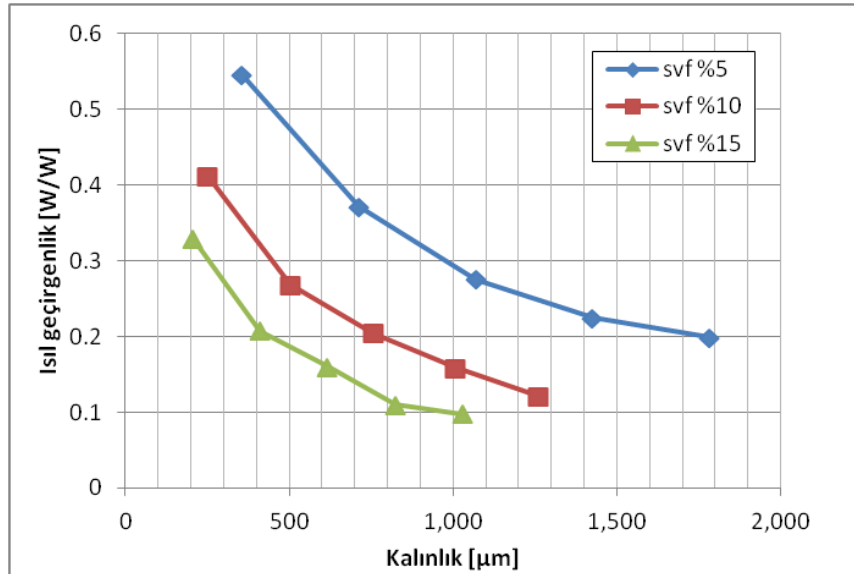
Şekil 5.1’de 30 μm çapındaki liflerden oluşan değişik SVF değerlerine sahip yalıtım malzemeleri için kalınlık boyunca sıcaklık değişimi görülmektedir. Yalıtım malzemesi boyunca sıcaklık dağılımının bulunmak istenmesinin sebebinin ışının malzeme boyunca geometrik yansıma bölgesinde kalıp kalmadığını kontrol etmek olduğu daha önce belirtilmişti. Çizelge 3.2’den de kontrol edilebileceği gibi 800 K sıcaklığında gönderilen ışınların yaklaşık % 82’ si geometrik yansıma göre hareket etmektedir. Bu değer geometrik yansıma bölgesi çözümlemesinin alt sınırı olarak kabul edilirse, bu bölgede, bu sıcaklık değerlerinde, incelenebilecek malzemelerin kalınlıklarının artan SVF ile düşmekle birlikte 0.75 mm ile 1.4 mm arasında olacağı görülmüştür.

Grafikte SVF %15 değerinde 2 ayrı sonuç alınarak –yani 2 farklı lif dizilimi için– değişen iç yapının sonuca etkisi incelenmiş ve liflerin rasgele diziliminin değişimine bağlı olarak sıcaklık değerlerinin değişmediği görülmüştür. Bu durum da göz önüne alınırsa, sonuçlar, Arambakam’ın aldığı sonuçların yaklaşık %5 daha düşük olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.1 : Yalıtım malzemesi boyunca sıcaklık değişimi.

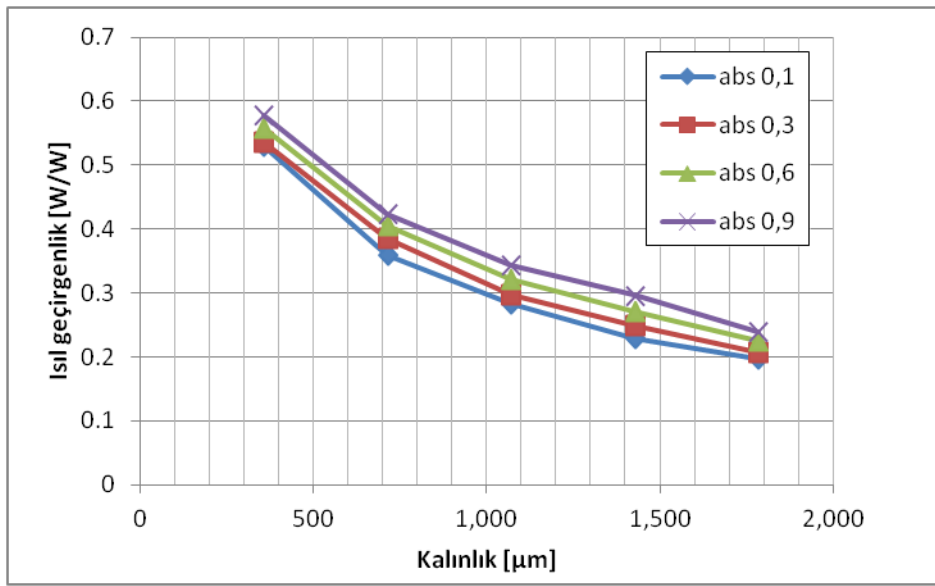
Şekil 5.2 sürekli halde, değişik SVF oranlarına sahip malzemelerin ısı enerjisi geçirgenliğini göstermektedir. Görüldüğü gibi katı oranı arttıkça ısı iletimi azalmaktadır. Burada ısı geçirgenlik terimi, ısı kuyusuna ulaşan ısı akısının ısı kaynağından gelen toplam ısı akısına oranı olarak tanımlanır.



Şekil 5.2 : Değişik SVF oranlarına sahip malzemelerin ısı enerjisi geçirgenliğinin malzeme kalınlığı ile değişimi.

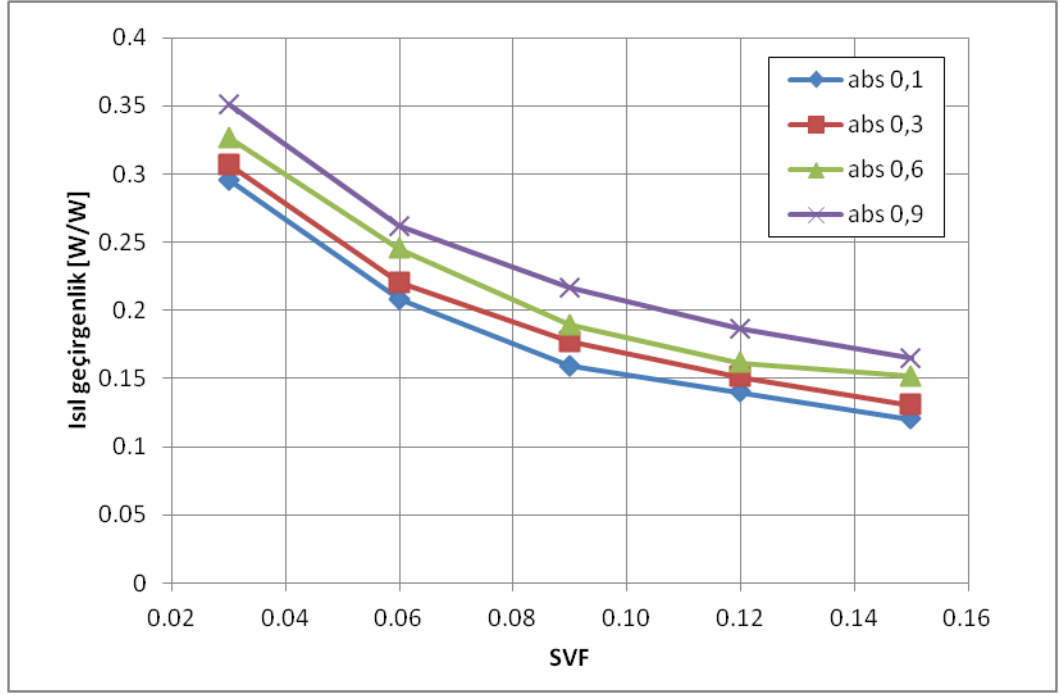
Şekil 5.3 sürekli halde yalıtım malzemesini oluşturan liflerin farklı absorbtivite değerlerinde ısı geçirgenliğini göstermektedir. Sonuçlar absorbtivite artarken ısı geçirgenliğinin arttığını göstermektedir. Bunun sebebi çarpan ışını geri yansıtan liflerin, yuttukları ışını anizotropik şekilde tekrar neşretmeleridir. Bu daha fazla ışının ısı

kuyusuna yönlenmesine neden olmaktadır. Burada ilginç nokta Arambakam'ın çalışmasında bunun zıttı bir sonuç bulmasıdır. Bu farklılığın sebebinin kullanılan ışın izleme yönteminden kaynaklandığı düşünülebilir. Bu bölgede yapılmış herhangi bir deneysel çalışma bulunmadığından sonuçları kontrol etmek oldukça zor olmakla beraber literatürde yapılan birçok çalışma ve bu tez çalışmasındaki deneylerle kontrol edilen Mie bölgesi çalışmaları ileri yönlü saçılımın yüksek olduğu malzemelerde ısı geçişinin daha fazla olduğunu göstermektedir. Yükselen fiber absorbtivite değeri ileri yönlü saçılmayla aynı işlevi göreceğinden, bu çalışmada bulunan sonuçlar doğrulanmaktadır.



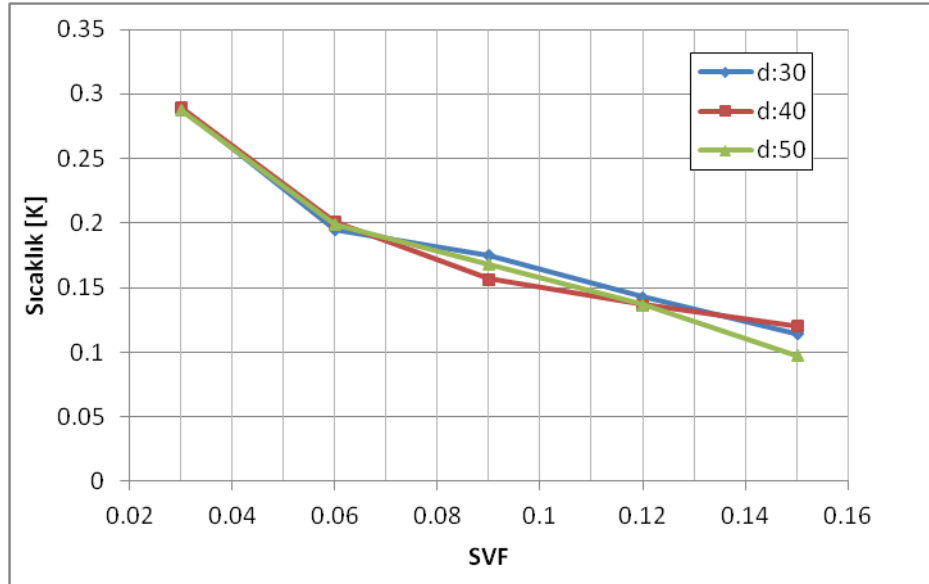
Şekil 5.3 : Farklı lif absorbtivite değerlerinde ısı geçirgenlik.

Şekil 5.4 farklı absorbtiviteli aynı kalınlıktaki yalıtım malzemelerinin katı oranı değişiminden nasıl etkilendiğini göstermektedir. Isıl olarak en iyi sonucu düşük absorbtiviteli ve yüksek katı oranına sahip malzeme vermiştir.



Şekil 5.4 : Absorbtivite ve katı oranı terimlerinin ısı ile ısı geçişine etkisi.

Şekil 5.5 değişen ortalama lif çaplarının ısı geçişine etkisini göstermektedir. Görüldüğü üzere lif çapının ısı geçişine etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.



Şekil 5.5 : Yalıtım malzemesi lif çapının ısı geçişine etkisi.

5.2 Mie Saçılması Bölgesinde Yapılan Çözümleme ve Sonuçlar

Çalışma ile Bölüm 3.3'te verilen çözüm yöntemi kullanılarak lif esaslı yalıtım malzemelerinin ısı özellikleri, farklı sıcaklıklarda, farklı basınçlarda değişik

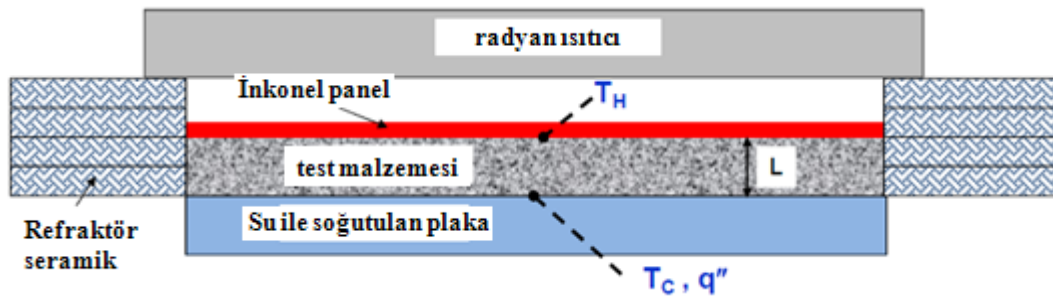
yoğunluklu malzemeler için incelenmiş ve alınan sonuçlar grafikler halinde verilmiştir. Çalışmada kullanılan yöntemle literatürdeki deneysel çalışmalar karşılaştırılmış ve doğrulanmaya çalışılmıştır. Burada çalışma, tek bir deneysel çalışmayla değil birden fazla çalışmayla karşılaştırılarak kullanılan yöntemin güvenilirliğinin test edilmesi amaçlanmıştır.

Bölüm 1.2’de anlatıldığı üzere, Mie saçılması bölgesinde yalıtım malzemeleri için yapılmış pek çok deneysel çalışma vardır. Bu çalışmalardan Daryabeigi ve Tong’un deneysel sonuçları alınarak, uygulanan MCII yöntemi test edilmiştir [4] [6].

5.2.1 Çalışma düzeneği ve kabuller

Yapılan deneysel çalışmalarda deney düzenekleri arasında kimi farklılıklar olsa da malzeme ısı iletim katsayılarının bulunmasında kullanılan 2 temel test yöntemi vardır. Bunlar kılavuz levhalı yöntem (guarded hot plate method) ve ısı akısı ölçme (heat flow meter) yöntemlerdir. Her iki yöntemde de düzenek elektrikli bir ısı kaynağı ve su ile soğutulan bir ısı kuyusu arasına konmuş bir yalıtım malzemesinden oluşur. Isı akısının belirlenmesi ise bahsedilen ilk yöntemde yalıtım malzemesinin arka kısmını belli bir sıcaklıkta tutmak için kullanılan elektrik enerjisinden bulunarak ikinci yöntemde ise ısı akısını ölçen ısı akış ölçerleri yardımıyla yapılır.

İncelenen çalışmalardan, Daryabeigi yaptığı deneylerde ısı akısı ölçme yöntemini kullanmıştır. Deney düzeneği Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Deneylerinde, şekildeki inkonel panel 400 K den 1200 K e kadar farklı sıcaklıklarda, ısı kuyusu panel ise su ile soğutularak 300 K de tutularak ısı geçişi incelenmiştir. Ayrıca deney vakum ortamında da yapılarak ışıının ısı geçişine etkisi gözlemlenmiştir.



Şekil 5.6 : Daryabeigi deney düzeneği şeması.

Daryabeigi deneylerini 13.3 mm, 26.6 mm ve 39.9 mm kalınlığındaki, 24, 48 ve 72 kg/m³ yoğunluğuna sahip yalıtım malzemeleri ile test ederek, yalıtım malzemesi kalınlığının ve yoğunluğunun ısı geçişi üzerine etkilerini gözlemlemiştir.

Lif albedosu ve malzeme kaybolma katsayısı, Monte Carlo metodunun çözümlenmesinde kullanılan önemli iki parametredir ve bahsedilen çalışmada bu değerler aşağıdaki gibi verilmiştir.

- Lif albedosu $\omega=0.97435$
- Kaybolma katsayısı $K_e=e_0+e_1*T$
 $e_0=53.01689$
 $e_1=0.03879$

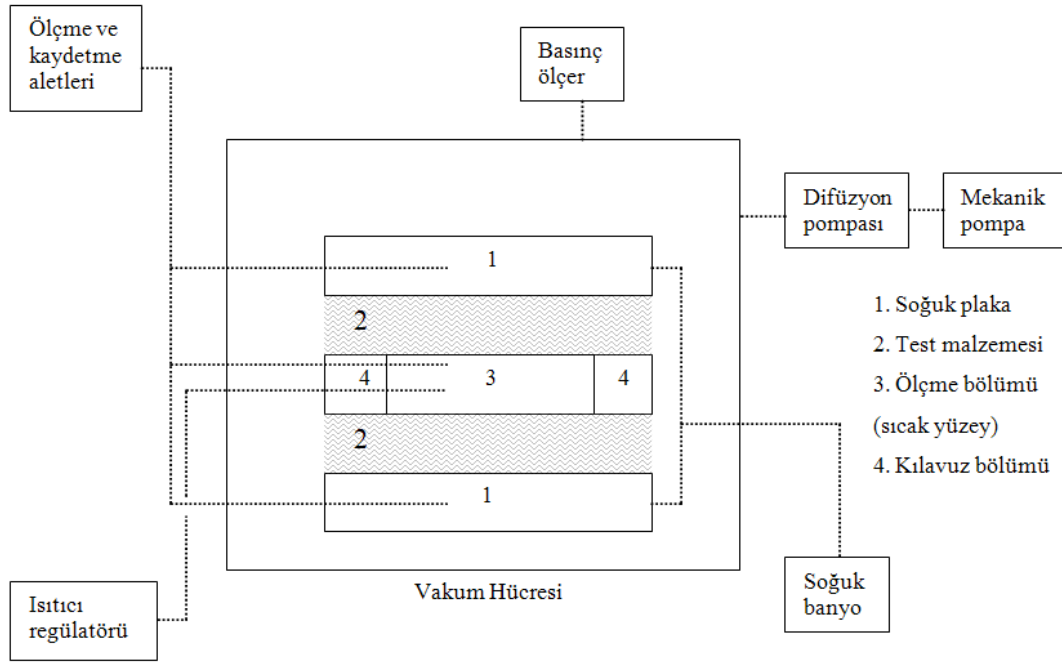
Bu çalışmada, her sıcaklık için ayrı kaybolma katsayısı tanımlamak bilgisayar işlem süresini oldukça uzatmakta olduğundan, bu değer ısı kuyusu ve ısı kaynağının ortalama sıcaklığı olarak alınmıştır. Böyle bir kabulün önemli bir hataya sebep olmadığı ama işlem süresini çok kısalttığı görülmüştür.

$$K_e = e_0 + e_1 \left(\frac{T_h + T_c}{2} \right) \quad (5.1)$$

İncelenen bir diğer çalışma olan Tong'un çalışması ise konu ile ilgili yapılmış en temel çalışmalardan birisidir. Daryabeigi'nin tersine çalışmasında kılavuz levhali yöntem ile sonuçlarını almıştır. Şekil 5.7'de çalışma düzeneği görülmektedir. Deneylerinde, şekildeki ısıtıcı paneli 363 K den 423 K e kadar farklı sıcaklıklarda, ısı kuyusu panel ise 308 K de tutarak ısı geçişini incelemiştir.

Deneyde kullanılan lif albedo değeri $\omega=0.604$ olarak verilmiştir. Kaybolma katsayısı ise Daryabeigi'nin önerdiği değerler ile benzerlik göstermekte olduğundan aynı denklem kullanılmıştır.

Yaptığı deneylerde minimum 2.54 cm, maksimum 4.06 cm kalınlığında 8.41 kg/m^3 yoğunluğunda lif esaslı yalıtım malzemesi kullanmıştır.



Şekil 5.7 : Tong deney düzeneği şeması.

5.2.1 Sonuçlar

Şekil 5.8’de 24 kg/m^3 yoğunluğundaki ve 13.3 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesinin artan sıcaklıkla değişen toplam ısı iletim katsayısı değeri, Daryabeigi’nin deneysel çalışmasının sonuçları ve bu çalışmada anlatılan MC metodu çözümü sonuçları ile birlikte gösterilmiştir.

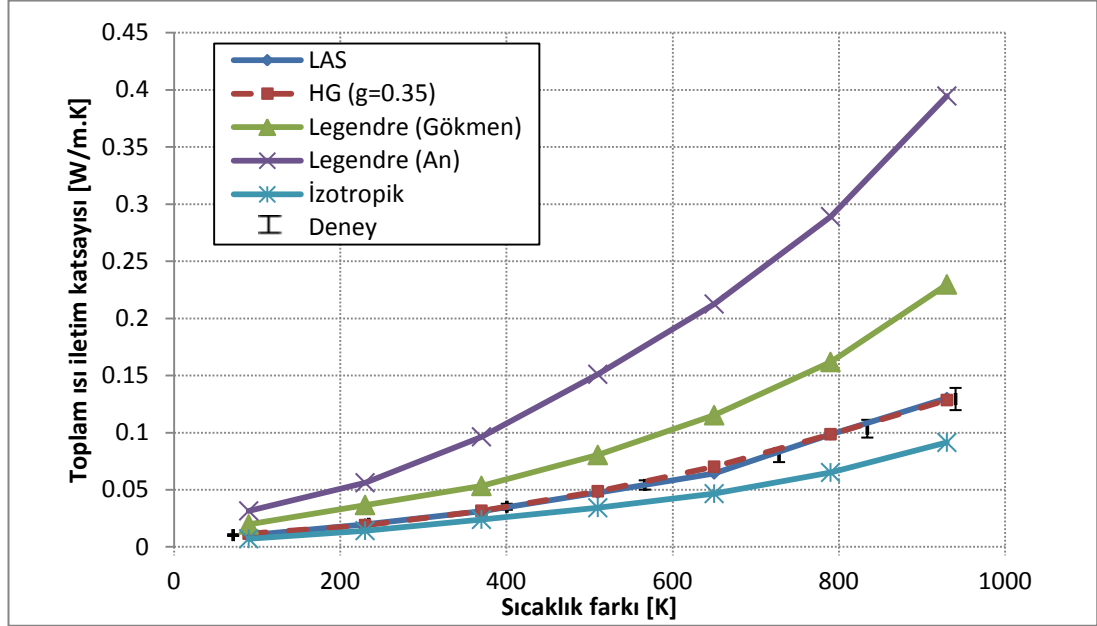
Burada öncelikle belirtilmesi gereken nokta, deneyin vakum ortamında gerçekleştirildiği, dolayısıyla var olan tek ısı geçişi mekanizmasının ışınlama ısı geçişi olduğudur. Bu deney yardımıyla, bu çalışmada yapılan ışınlama çözümlemesi incelenebilecektir.

Bölüm 3.3’te anlatıldığı gibi, Mie bölgesinde dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri faz fonksiyonlarıdır. Bu yüzden öncelikle hangi faz fonksiyonunun lif esaslı yalıtım malzemelerinde kullanılması gerektiği bulunmalıdır.

Grafik göstermektedir ki, An ve Gökmen tarafında önerilen ileri yönlü saçılım faz fonksiyonları lif esaslı yalıtım malzemeleri için gerektiğinden daha fazla ileri yönlüdür. Bu yüzden iletim katsayısı bu faz fonksiyonları için gerçek değerinin oldukça üstünde çıkmıştır. İzotropik model ise yalıtım malzemelerindeki ileri yönlü saçılmayı ihmal ettiği için değerler düşük çıkmıştır. Bunların aksine lineer anizotropik saçılım (LAS) modeli deney sonuçlarıyla tam bir uyum göstermiştir.

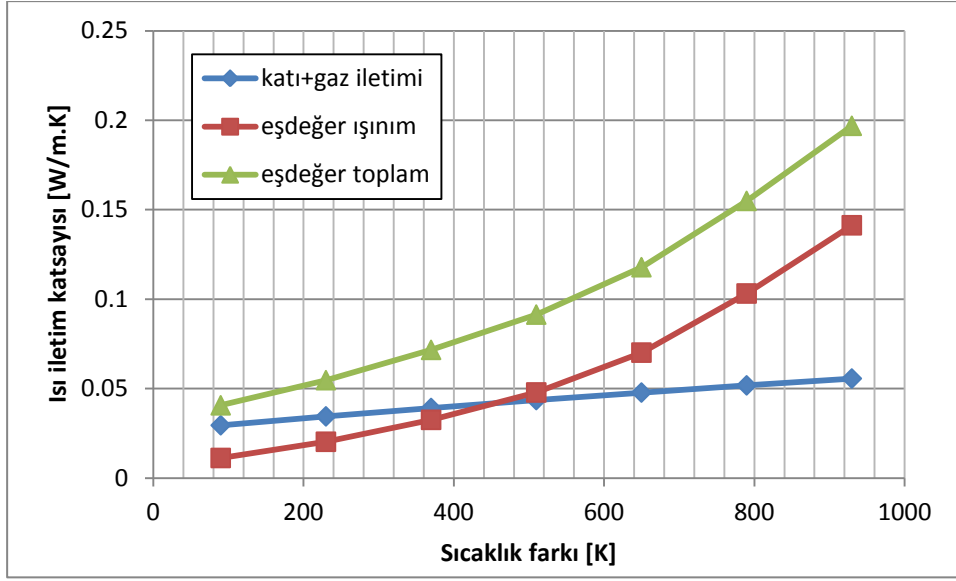
Öte yandan $g=0.35$ değerinde HG bağıntısı lineer anizotropik modelle benzer faz

fonksiyonuna sahip olduğu için doğru sonuçlar vermektedir. Bu yöntemle, bilgisayar işlem süresinin önemli ölçüde kısaldığı Şekil 5.13'te gösterilecektir.



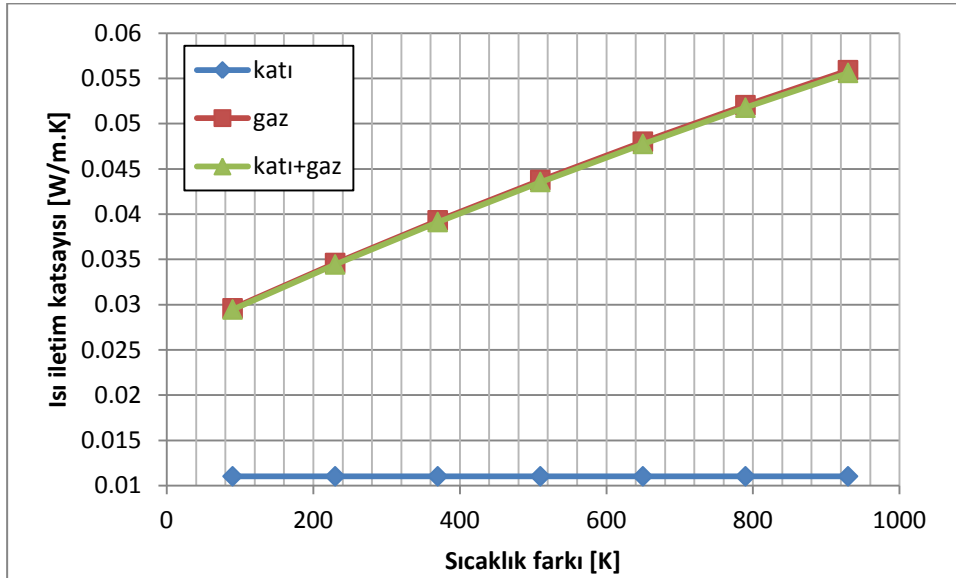
Şekil 5.8 : Farklı faz fonksiyonları için ısı geçişinin incelenmesi.

Şekil 5.9'da 1 atm basınç altında 24 kg/m^3 yoğunluğundaki ve 39.3 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesinin toplam ısı iletim katsayısının sıcaklıkla değişimi verilmiş ve ayrıca ısınım ve iletim terimlerinin toplam ısı geçişine etkisi gösterilmiştir. Çalışmanın başında da tahmin edildiği gibi, düşük sıcaklıklarda ısı iletiminin etkisi ısınıma göre çok daha fazla iken, yüksek sıcaklıklarda ısınım çok daha etkili olmaktadır. Bunun nedeni iletim terimlerinin artan sıcaklıklarda neredeyse sabit kalırken, ısınımla ısı geçişinin sıcaklığın 4. kuvvetiyle artmasıdır.



Şekil 5.9 : Isı geçişi terimlerinin toplam ısı geçişine etkisi.

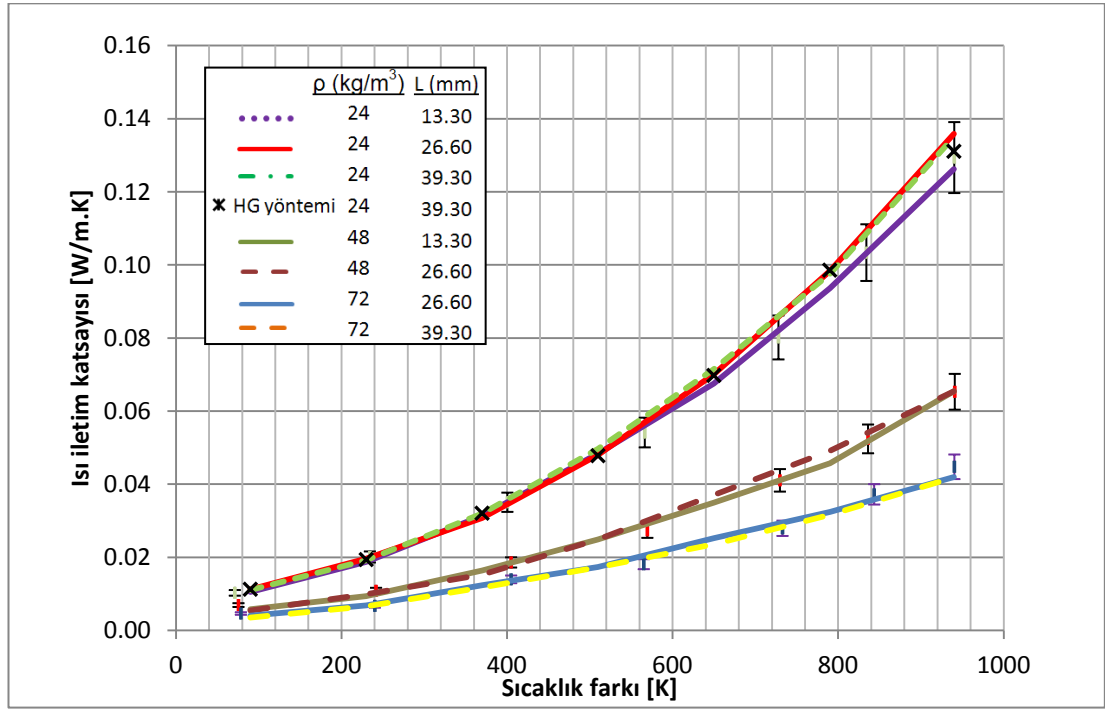
Şekil 5.10 katı iletimi ile gaz iletiminin toplam iletime etkisini göstermektedir. Görüldüğü gibi katı iletiminin ısı geçişine etkisi yok kabul edilebilir.



Şekil 5.10 : Katı iletimi ile gaz iletiminin toplam iletime etkisi.

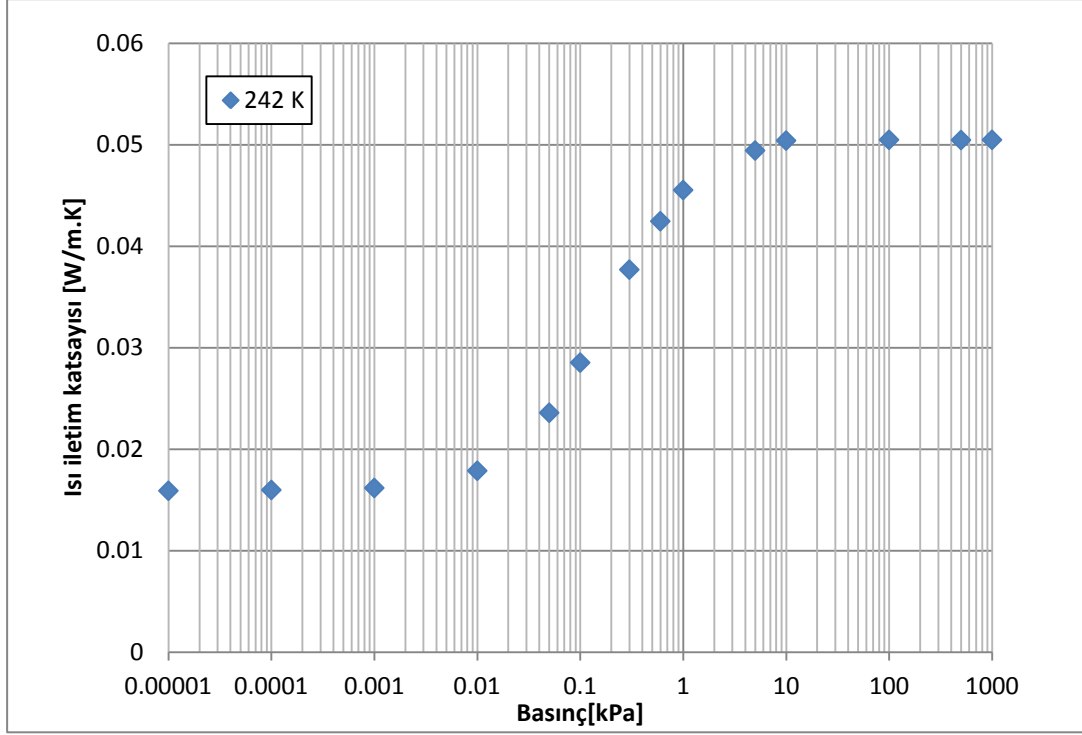
Şekil 5.11'de değişik yoğunluklardaki ve kalınlıktaki lif esaslı yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısıtım ile ısı iletim katsayısı (vakum ortamında olduğundan bu değer toplam ısı iletim katsayısına eşittir) değişimini göstermektedir. Sonuçlar yine lineer anizotropik modelle alınmış ve deney sonuçlarıyla uyumluluk göstermiştir. Ayrıca HG bağıntısının da doğru sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar artan yalıtım malzemesi yoğunluğunun ısıtım ile ısı geçişi katsayısını

azalttığını, yalıtım kalınlığının ise bu değer üstünde etkisi olmadığını göstermektedir.



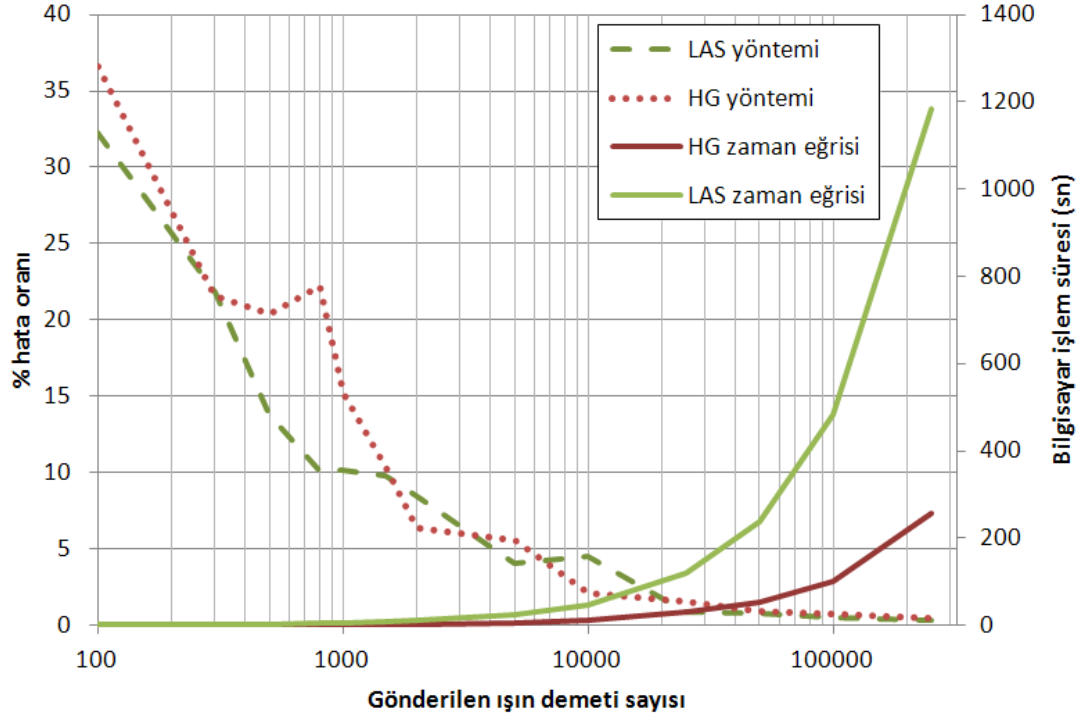
Şekil 5.11 : Değişik yoğunluklardaki ve kalınlıktaki lif esaslı yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı eşdeğer ışınlı ısı iletimi katsayısı.

Şekil 5.12, 242 K sıcaklık farkında, ortam basıncının toplam ısı geçiş katsayısına etkisini göstermektedir. Görüldüğü üzere basınç arttıkça ısı geçişi, gaz iletiminin artması nedeniyle artmakta ve daha sonra sabit kalmaktadır.



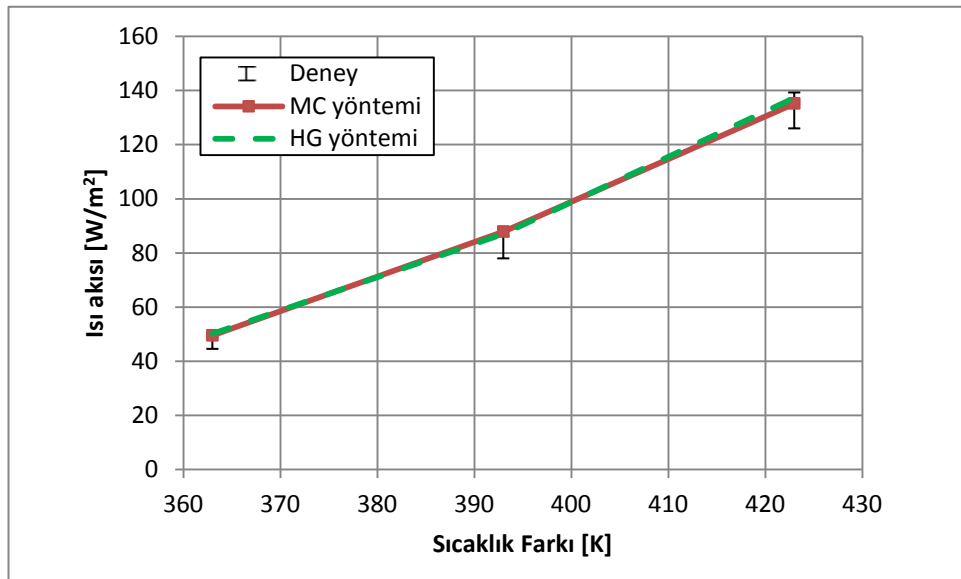
Şekil 5.12 : Ortam basıncının ısı geçiş katsayısına etkisi.

Bölüm 2’de MC metodunda bir istatistiksel bir hata olduğuna ve bu hatanın örnekleme sayısı artırılarak azaltılabileceğine fakat bu durumun da bilgisayar işlem süresini uzatacağına değinilmişti. Şekil 5.13’te 24 kg/m³ yoğunluğundaki ve 13.3 mm kalınlığındaki yalıtım malzemesinin ısı iletim katsayısının bulunuşu için yapılan örnekleme sayısı-hata oranı&süre grafiği lineer anizotropik model ve HG bağıntısı için verilmiştir. Görüldüğü üzere HG bağıntısı daha basit bir denklemle çözüldüğünden sonuca daha hızlı ulaşmaktadır. Diğer yandan, tahmin edildiği gibi örnekleme sayısı arttıkça hata oranı azalmış ve süre artmıştır. Örnekleme sayısına oranla hata oranının azalan bir ivmeyle azaldığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden yaklaşık %2 lik hata mertebesinde bulunan 20000 örnek gönderimi ilgili grafiğinin oluşturulması için kullanılmıştır. Öte yandan malzeme geometrisi karmaşılaştıkça, yani yalıtım malzemesi düşünüldüğünde, yalıtım kalınlığı arttıkça ya da malzeme yoğunluğu arttıkça, örnekleme sayısının artırılması gerektiği unutulmamalıdır.

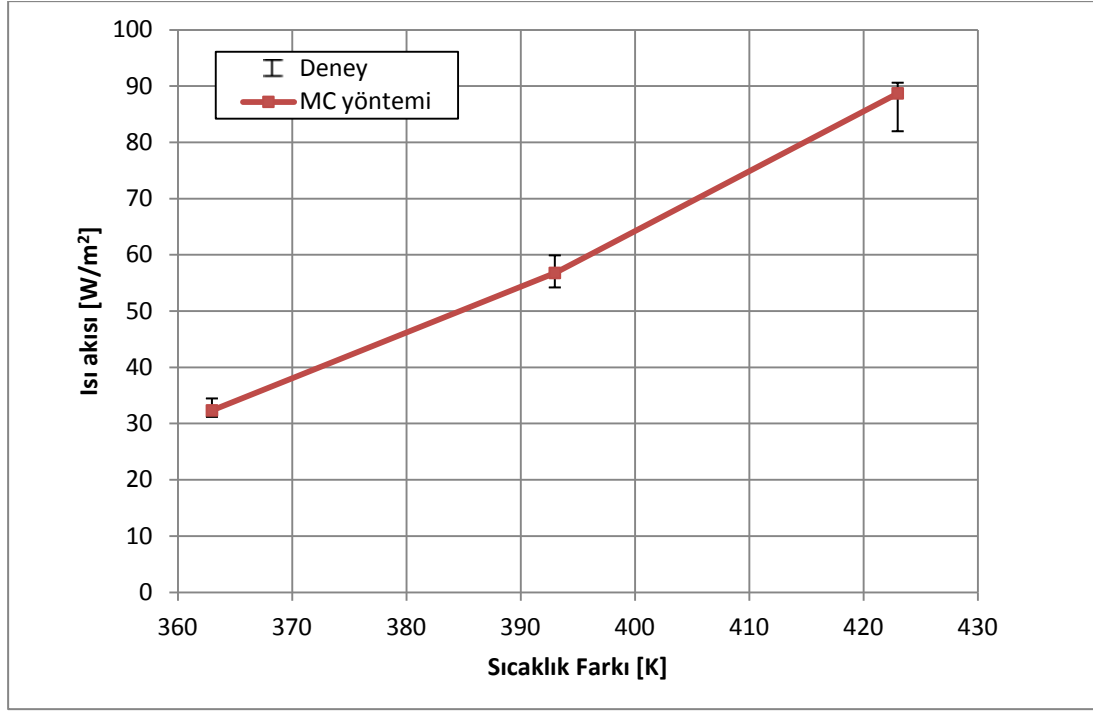


Şekil 5.13 : Örnekleme sayısı-hata oranı- süre grafiği.

Şekil 5.14 ve 5.15'te Tong'un sırasıyla 2.54 cm ve 4.06 lik örneklerle vakum ortamında yaptığı deney sonuçları görülmektedir. MC yönteminde kullanılan lineer anizotropik modelin Tong'un deneyleriyle de uyum gösterdiği görülmüştür. Şekil 5.14'te $g=0.35$ değerinde HG çözümünün de doğru sonuçları verdiği tekrar gözlemlenmiştir.

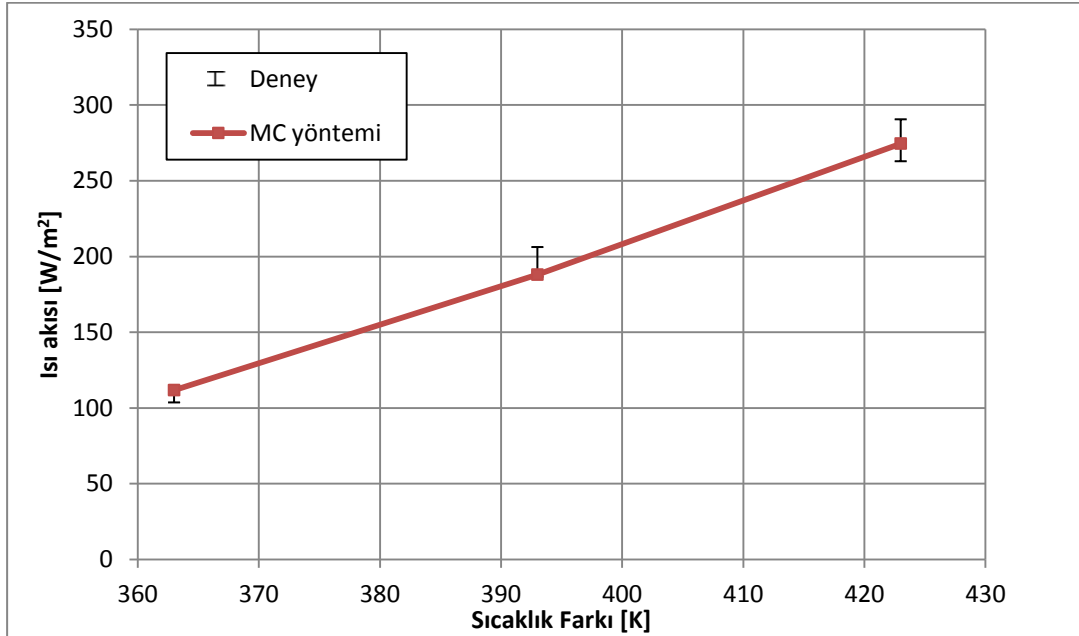


Şekil 5.14 : 2.54 cm'lik örnek için vakum ortamında gözlenen ısı akısı.

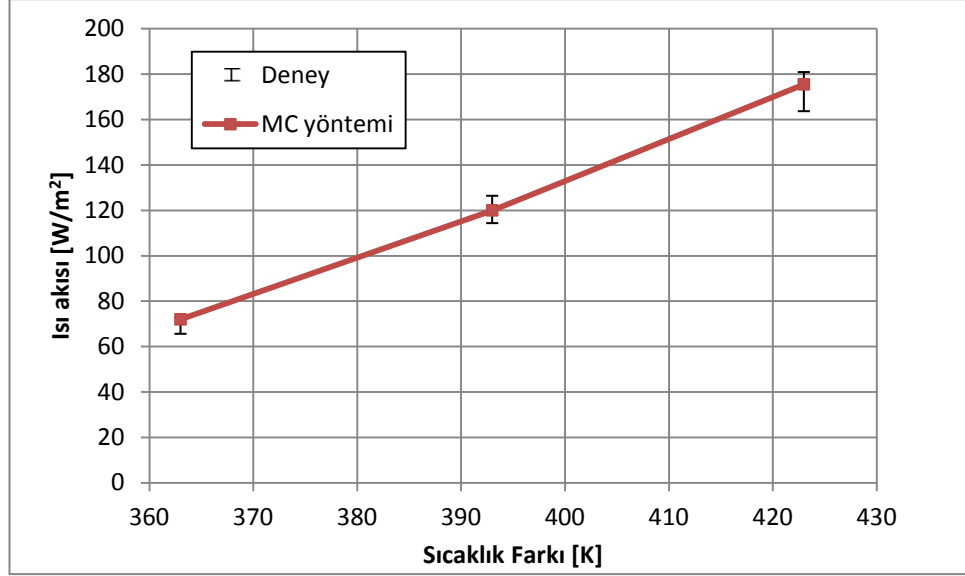


Şekil 5.15 : 4.06 cm’lik örnek için vakum ortamında gözlenen ısı akısı.

Şekil 5.16 ve 5.17’de ise Tong aynı deneyleri normal atmosfer basıncında yapmıştır. Alınan sonuçlar bu çalışmada kullanılan iletimle ısı geçişi terimlerinin uygunluğunu göstermektedir.

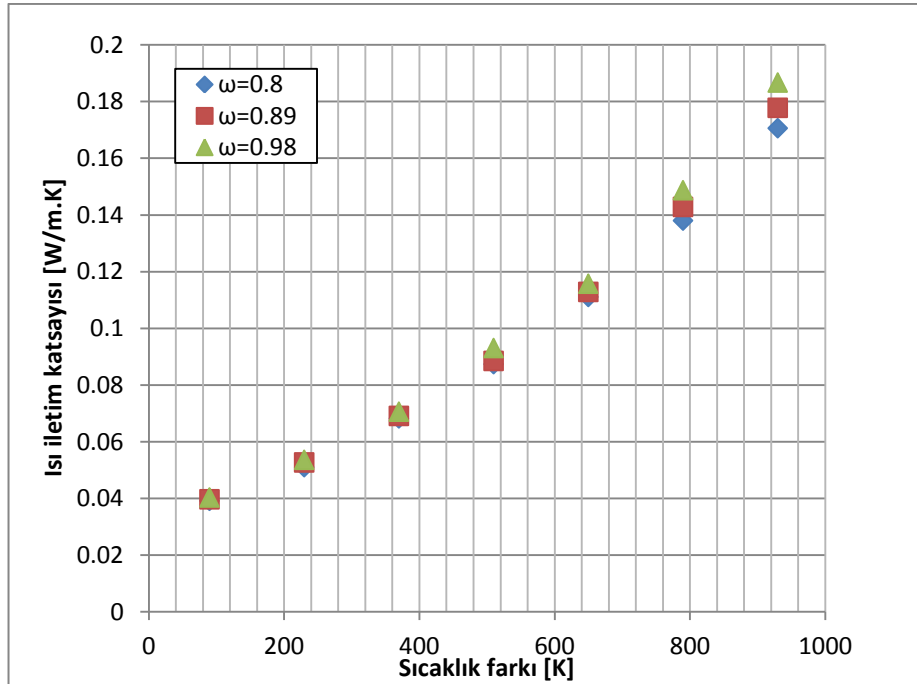


Şekil 5.16 : 2.54 cm’lik örnek için 1 atm basınçta gözlenen ısı akısı.



Şekil 5.17 : 4.06 cm'lik örnek için 1 atm basınçta gözlenen ısı akısı.

Şekil 5.18'de farklı albedo değerleri için 13.3 mm kalınlığında 24 kg/m^3 yoğunluğundaki yalıtım malzemesinde ısı iletim katsayısı değişimi verilmiştir. Görüldüğü üzere geometrik yansıma bölgesinin aksine artan albedo (yani düşen absorbtivite) değeri daha fazla ısı geçişine neden olmuştur. Bunun sebebi gelen ışın lif tarafından saçıldığı takdirde saçılım ileri yönlü olurken, yutulduğu takdirde saçılımın yönden bağımsız olmasıdır.



Şekil 5.18 : Farklı albedo değerleri için yalıtım malzemesinde ısı iletim katsayısı değişimi.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada geniş bir sıcaklık aralığında lif esaslı yalıtım malzemelerinde ısı geçişi incelenmiştir. Bu doğrultuda, literatürde de üzerinde en fazla çalışılan, ışınlımla ısı geçişi mekanizması üzerine yoğunlaşmış ve bu terim Monte Carlo yöntemiyle çözümlenmiştir. Diğer terimler ise ampirik denklemlerle ifade edilmiştir.

6.1 Öneriler

Çalışmanın ortaya koyduğu en önemli sonuç MC yönteminin lif esaslı yalıtım malzemelerinde ışınlımla ısı geçişinin modellenmesinde çok etkili bir şekilde kullanılabileceğidir.

Çalışma yalıtım malzemelerinde artan lif absorbtivite değerinin, yalıtım malzemesi geometrik yansıma bölgesindeyken ısı geçişini artırdığını, Mie saçılımı bölgesinde ise azalttığını ortaya koymuştur. Yani kabaca, daha iyi yalıtım sağlayabilmek için çapı 30 μm 'un altındaki lifler için yüksek absorbtiviteli, üstündeki lifler içinse düşük absorbtiviteli malzemeler kullanılması önerilmektedir.

Çalışmada literatüre sunulan bir diğer hipotez ise lif esaslı yalıtım malzemelerinde ışınlı saçılımının modellenmesinde Hanyey-Greenstein denkleminin $g=0.35$ değeri için kullanılabilir olduğudur. Bunun sebebi denklemin bu değerinde oluşturduğu faz fonksiyonunun Şekil 3.5'te görüldüğü üzere lineer anizotropik modelle benzer oluşudur. HG denkleminin kullanılması bilgisayar işlem süresini ciddi miktarda kısaltmaktadır.

6.2 İleri Çalışmalar

Monte Carlo metodu ile yalıtım malzemelerinin çözümlenmesinde, yalıtım malzemesine ait iki bilgi gerekmektedir: lif albedosu (ya da absorbtivitesi) ve yalıtım malzemesi kaybolma katsayısı (K_e).

Çalışmada yazılan MATLAB programına malzemelerin albedo değerleri tanımlanarak değişik malzemeler için sonuçlar karşılaştırılabilir. K_e değeri ise bu

Çalışmada Daryabeigi'nin çalışmasında önerdiği denklem basitleştirilerek tanımlanmıştır. (Denkleml 3.5) Bu tanımlamanın doğruluğu bu çalışmada test edilmiş olsa da daha fazla deneyle test edilmesi yararlı olacaktır. Bu yolla, bu ifade için malzeme yoğunluğuna ve malzeme lif çapına bağlı güvenilir bir ampirik ifade elde edilebilir.

Çalışmada lifler gri yüzey olarak kabul edilmiş ve işlemler buna göre yapılmıştır. Oysa literatürde kimi çalışmalar bazı liflerin gri yüzey özelliği göstermediğini göstermektedir [18]. Bu durumlar için, dalga boyu kümülatif olasılık dağılımları tanımlanarak MCII yöntemi uygulanabilir ve çalışma zenginleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Karamanos, A., Papadopoulos, A., Dimitros, A.** (2004). Heat transfer phenomena in fibrous insulating materials, Proceedings of WSEAS/IASME International Conference on HEAT and MASS TRANSFER, Corfu, Greece, August 17-19/2004, 1-12
- [2] **Verschoor, J. D., Greebler, P., Manville, N. J.** (1952) Heat Transfer by Gas Conduction and Radiation in Fibrous Insulation, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 74, No. 8, August 1952, pp. 961-968.
- [3] **Hass, D. D., Prasad, P. D., Glass, D. E., Wiedemann, K. E.** (1997) Reflective Coating on Fibrous Insulation for Reduced Heat Transfer, *NASA CR-201733*, pp. 24, August 1997
- [4] **Daryabeigi, K.** (2002) Heat Transfer in High – Temperature Fibrous Insulation, 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, St. Louis, MO, June 24-26
- [5] **Veisoh, S., Hakkaki-Fard A.** (2008) Numerical Modeling of Combined Radiation and Conduction Heat Transfer in Mineral Wool Insulations, *Heat Transfer Engineering*, 30:6, 477-486
- [6] **Tong, T. W., and Tien, C. L.** (1983) Radiative Heat Transfer in Fibrous Insulations, Part I: Analytical Study, *Journal of Heat Transfer*, vol. 105, pp. 70–75,. Part II: Experimental Study, *Journal of Heat Transfer*, vol. 105, pp. 76–81
- [7] **Arambakam, R., Hosseini, S.A., Tafreshi, H. V., Pourdeyhimi, B.** (2011) Monte Carlo simulation of radiative heat through fibrous media: Effects of boundary conditions and microstructural parameters, *International Journal of Thermal Sciences* 50, 935-941
- [8] **Modest, M. F.** (1993) Radiative heat transfer , syf. 645, San Diego, California, USA
- [9] **Demirkaya, G.** (2003) Monte Carlo Solution Of A Radiative Heat Transfer Problem In A 3-D Rectangular Enclosure Containing Absorbing, Emitting and Anisotropically Scattering Medium, Yüksek Lisans Tezi,

- [10] **Howell J. R., Siegel, R.** (1981) Thermal Radiation Heat Transfer, 2. Basım, syf. 17, New York, ABD
- [11] **Url-1** <http://en.wikipedia.org/wiki/Lambert's_cosine_law>, alındığı tarih: 28.03.2012
- [12] **Howell J. R.** A Catalog Of Radiation Heat Transfer Configuration Factors, alındığı tarih: 21.01.2012, adres: <http://www.engr.uky.edu/rtl/Catalog/tablecon.html>
- [13] **Argento, C., Bouvard, D.** (1996) A ray tracing method for evaluating the radiative heat transfer in porous media, International Journal of Heat and Mass Transfer 39 (15)
- [14] **Incropera, G., DeWitt D. P.** (2003) Fundamentals of Heat and Mass Transfer – 6. Basım, 739-741, New Jersey, USA
- [15] **Brewster, M. Q.,** (1991) Thermal Radiative Transfer and Properties, 2. Basım, syf. 480, ABD
- [16] **Modest, M. F.** (1993) Radiative heat transfer , syf. 669-700, San Diago, California, ABD
- [17] **An, W. , Ruan, L.M., Qi, H., Liu. L.H.,** (2004) Finite element method for radiative heat transfer in absorbing and anisotropic scattering media , Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 96 (2005) 409–422
- [18] **Yuen, W., W., Takara, E., Cunnington G.** (2003) Combined Conductive - Radiative Heat Transfer In High Porosity Fibrous Insulation Materials: Theory And Experiment, The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference March 16-20, 2003

EKLER

EK A : MATLAB Programlama Kodları (CD içerisinde)

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ali Can GÜÇLÜ

Doğum Yeri ve Tarihi: Malatya, 22.08.1985

E-Posta: guclual@itu.edu.tr

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi Isı-Akışkan Programı