

Hüsamettin
TAN

Yüksek Lisans
Tezi

KÜ 2017

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI NEM VE GÖZENEKLİLİK DEĞERLERİYLE
EPS YALITIM MALZEMESİNİN ISIL İLETKENLİĞİNİN
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

HÜSAMETTİN TAN

HAZİRAN 2017

Makine Anabilim Dalında Hüsamettin TAN tarafından hazırlanan Farklı Nem ve Gözeneklilik Değerleriyle EPS Yalıtım Malzemesinin Isıl İletkenliğinin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Ali ERİŞEN

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Battal DOĞAN

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. İbrahim UZUN _____

Üye (Danışman) : Dr. Battal DOĞAN _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şeniz R. KUŞHAN AKIN _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

FARKLI NEM VE GÖZENEKLİLİK DEĞERLERİYLE EPS YALITIM MALZEMESİNİN ISIL İLETKENLİĞİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

TAN, Hüsamettin

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Battal DOĞAN

Haziran 2017, 94 sayfa

Enerji tasarrufu son yıllarda enerji kaynaklarının tükenmesi ile oldukça önemli bir hale gelmiştir. Enerji kayıplarının azaltılması ve enerjinin verimli kullanılması amacıyla yalıtım malzemelerinin performanslarının artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada son yıllarda oldukça çok tercih edilen EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenlik değeri deneysel ve sayısal olarak belirlenip, ayrıca ısı iletkenliğe nemin etkisi araştırılmıştır. Sayısal çözümler için sonlu hacim metoduna göre çözüm yapan bilgisayar programı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için kararlı rejimde ısı akış metro metoduna göre ölçüm yapan ısı iletkenlik cihazı kullanılmıştır. Isı iletkenliğinin nem içeriği ile ilişkisi TS EN 12087 standardına göre belirlenmiştir. Isı iletkenlik ölçümleri farklı nem içeriklerinde deneysel ölçümler ile belirlenmiştir.

Sayısal çalışmalar gerçekleştirilirken öncelikli olarak iç yapısındaki faz yapısını belirlemek için elektron mikroskop görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri kullanılarak iç yapı geometrisi sonlu eleman esaslı bilgisayar programına aktarıldıktan sonra malzeme özellikleri ve sınır şartları tanımlanarak tek boyutta iki farklı doğrultuda sayısal çözümler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar yapılırken kuru duruma getirilmiş farklı yoğunluktaki EPS malzemesi uygun ölçülerde kesilerek ölçüme hazır

hale getirilmiştir. Isıl iletkenlik ölçümleri deneysel ve sayısal çalışmalar için ortalama 10°C, 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan hesaplama ve ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. EPS'nin ısı iletkenliğinin nem içeriği ile ilişkisi 14 gün boyunca tamamen daldırma sonucunda belirlenen doymuş nem içeriğinin farklı yoğunluktaki numunelerin kontrollü bir şekilde kurutması yapılarak deneysel olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak EPS malzemesinin ısı iletkenliğinin hangi parametrelere bağılı olarak değıştiğı, farklı yoğunluk ve nem içeriklerinin ısı iletkenliğe etkisi belirlenmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmış olup 1-4% değerler arasında hata oranı ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde farklı yoğunlukta yalıtım malzemesi kullanmanın enerji kayıplarını azalttığı, yüksek yoğunluktaki EPS malzemesinin neme dayanıklı olduğu, sayısal yöntemlerin ısı iletkenliğinin tahmin edilmesinde kullanılabilirdiğı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: EPS, Isıl iletkenlik, Gözeneklilik, Nem içeriğı, Mikro yapı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THERMAL CONDUCTIVITY OF EPS INSULATION MATERIALS AS EXPERIMENTAL AND NUMERICAL IN DIFFERENT MOISTURE CONTENT AND POROSITY

TAN, Hüsamettin

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, Thesis

Supervisor: Dr. Battal DOĞAN

June 2017, 94 pages

The energy saving in recent years has become very important with depletion of energy resources. It is necessary to increase of performance of insulation materials in order to reduce energy consumption and use energy efficiently. In this study, the thermal conductivity value of EPS insulation materials, which is preferred in recent years, have been determined as experimentally and numerically, also the effect of moisture content on the thermal conductivity has been investigated. Computer program, which is solve according to finite element method, was used for numerical solution. The thermal conductivity instrument that measures according to heat flow meter in steady condition was used for experimental studies. Relation of the thermal conductivity with moisture content was determined in accordance with TS EN 12087.

While numerical studies were carried out, electron microscope images were taken in order to determine phase structure in the internal structure. After transferring the internal structure geometry by using SEM images to computer programme that is based on finite element, numerical solution were made by defining the necessary boundary condition and material properties. EPS material in different density, which is made dry, was prepared by cutting at appropriate dimensions for measurement in

experimental studies. Thermal conductivity measurements were carried out at average temperature that is 10°C, 20°C, 30°C and 40°C for experimental and numerical studies. The results obtained from calculation and measurements have been given comparatively. When the relation of the thermal conductivity of EPS with moisture content was determined, the saturated moisture content was determined for different density samples as a result of total immersion during 14 days and the thermal conductivity measurements were made experimentally by drying in a controlled manner.

As a result, thermal conductivity of EPS material change as depending on which parameter and the effect on thermal conductivity of different density and moisture content has been determined. Experimental and numerical results were compared and error rates were found between 1-4% values. As a result of the studies, it has been seen that using insulating material in different density decreases energy losses and high density EPS material is resistant to moisture, numerical methods can be used to determine thermal conductivity.

Key Words: EPS, Thermal conductivity, Porosity, Moisture content, Micro structure

TEŐEKKÖR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımcı esirgemeyen bilimsel deney imkanlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, Sayın Prof. Dr. İbrahim UZUN'a, deneylerin yapılması konusunda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Türker AKKOYUNLU'ya tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda ve tezin yürütülmesinde daima yardımını gördüğüm Sayın hocam Dr. Battal DOĞAN'a büyük fedakarlıklarla bana destek olan eşim Yasemin TAN'a, teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
1.1. Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük (EPS).....	4
2.KURAMSAL TEMELLER	9
2.1. Isı Transfer Mekanizmaları	9
2.1.1. İletim	9
2.1.2. Taşınım.....	10
2.1.3. Işınım	11
2.2. Isıl İletkenlik	11
3.MATERYAL VE METOT	15
3.1. Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi.....	15
3.1.1. Isıl İletkenlik Değerinin Analitik Olarak Belirlenmesi	15
3.1.2. Isıl İletkenlik Değerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi	23
3.1.3. Isıl İletkenlik Değerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi.....	29
3.2. Deneysel Çalışma.....	31
3.2.1. Numunelerin Hazırlanması	31
3.2.2. Kurutma İşlemi.....	31
3.2.3. Ölçüm Standartları ve Kullanılan Cihazlar	32
3.3. Sayısal Çalışma	33
3.3.1. SEM Görüntüsünün Alınması	34
3.3.2. SEM Görüntülerinin Analizi	35
3.3.3. Modelleme, Ağ Yapısı ve Sınır Şartları	36
4.ARAŞTIRMA BULGULARI	42

4.1.	Analitik Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	42
4.2.	Deneyisel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	43
4.3.	Sayısal Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular	48
4.3.1.	SEM Görüntüsünden Elde Edilen Bulgular	48
4.3.2.	Sayısal Çözümünden Elde Edilen Bulgular	54
4.4.	Farklı Nem Oranının Isıl İletkenliğe Etkisinden Elde Edilen Bulgular	63
5.	SONUÇLAR	66
	KAYNAKLAR	72
	EKLER	78



ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

Sayfa

1.1. EPS üretim aşamalarının şematik gösterimi[37].....	6
1.2. Farklı yoğunlukta hacimce su emme oranı [40].....	7
2.1. Oda sıcaklığında çeşitli malzemelerin ısı iletkenlik aralıkları[42]	12
2.2. Bazı katı, sıvı ve gazların ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi[42]	13
2.3. Bazı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliğinin sıcaklık ile değişimi.....	14
3.1. Mahfazalı Sıcak levha metodu a) Çift deney parçalı b) Tek deney parçalı	24
3.2. Sıcak kutu metodu a) Mahfazalı sıcak kutu b) Kalibre edilmiş sıcak kutu.....	25
3.3. Şematik ısı akısı ölçüm test düzeneği	26
3.4. Kızgın tel metodu şematik resmi.....	27
3.5. Lazer flash metodunun şematik gösterimi [58].....	28
3.6. Tasarımdan üretime kadar olan işlemler	29
3.7. Sonlu elemanlar metodu akış şeması[59].....	30
3.8. Lasercomp Fox 314 Cihazı	33
3.9. Sayısal çözüm için akış şeması	34
3.10. Altın Kaplama Cihazı.....	35
3.11. 21 kg/m ³ yoğunluktaki numunenin geometrisi	37
3.12. 21 kg/m ³ yoğunluktaki numunenin ağ yapısı.....	38
3.13. Sayısal çözüm için Sınır Şartları	39
3.14. Sayısal çözüm İçin Sınır Şartları.....	40
4.1. 16 kg/m ³ yoğunluğa sahip numunenin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.....	44
4.2. 21 kg/m ³ yoğunluğa sahip numunenin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.....	45
4.3. 25 kg/m ³ yoğunluğa sahip numunenin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi.....	45
4.4. Farklı yoğunluktaki numuneler için ısı iletkenliğin değişimi	48
4.5. 25 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS'nin X35 mikro yapı görüntüsü.....	49
4.6. 16 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS'nin X250 mikro yapı görüntüsü	50
4.7. 16 kg/m ³ (a) ve 21(b) kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS'nin X500 mikro yapı görüntüsü.....	50

4.8. 16 kg/m ³ (a), 21 kg/m ³ (b), ve 25 kg/m ³ (c) yoğunluk değerine sahip EPS'nin X250 mikro yapı görüntüsü	52
4.9. 16 kg/m ³ (a), 21 kg/m ³ (b) ve 25 kg/m ³ (c) yoğunluk değerine sahip numunelerin görüntü analizinden elde edilen resimleri.....	53
4.10. 16 kg/m ³ (a) ve 21 kg/m ³ (b) yoğunluktaki numunelerin sıcaklık dağılımı.....	56
4.11. 16 kg/m ³ yoğunluktaki numune için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırması	58
4.12. 21 kg/m ³ yoğunluktaki numune için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırması	60
4.13. 25 kg/m ³ yoğunluktaki numune için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	61
4.14. Farklı nem içeriklerinde ısı iletkenliğin değişimi	65
5.1. Isı iletkenliğin yoğunluğa göre değişiminin literatür çalışmaları ile karşılaştırılması	68
5.2. 16 kg/m ³ yoğunluğa sahip EPS malzemesinin ısı iletkenliğinin farklı nem içeriklerinde karşılaştırılması	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Farklı yoğunluk değerleri için mekanik özellikler[37]	8
3.1. Hava için malzeme özellikleri (1 atm) [61]	41
3.2. Polistiren için malzeme özellikleri [62]	41
4.1. Karma malzeme içerisindeki bileşenlerin özellikleri	42
4.2. Analitik modeller için efektif ısı iletkenlik değeri (W/m.K)	43
4.3. Kuru yoğunluk değerleri	44
4.4. Doğrusal denklem kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırması (16 kg/m ³).....	46
4.5. Doğrusal denklem kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırması (21 kg/m ³).....	47
4.6. Doğrusal denklem kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerinin	47
4.7. 16 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları.....	57
4.8. 16 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları.....	58
4.9. 21 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları.....	59
4.10. 21 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları	59
4.11. 25 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları.....	60
4.12. 25 kg/m ³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları.....	61
4.13. Gerçek ve sayısal gözenek oranları	62
4.14. Düzeltme faktörü kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerleri	62
4.15. Düzeltme faktörü kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerleri	63
4.16. 10 saniye sonrasında numune kütleleri	64

SİMGELER DİZİNİ

k	Isıl İletkenlik (W/m.K)
k_f	Gözenek Malzemesini Isıl İletkenliği (W/m.K)
k_m	Dolgu Malzemesinin Isıl İletkenliği (W/m.K)
k_e	Efektif Isıl İletkenlik (W/m.K)
ϕ_f	Gözenek Malzemesini Hacimsel Oranı
ϕ_m	Dolgu Malzemesinin Hacimsel Oranı
g_i	Elips Yarı Asal Eksen
k_{e1}	Paralel Yöndeki Isıl İletkenlik
k_{e2}	Dikey Yöndeki Isıl İletkenlik
μ_1, μ_2	Lif Malzemesine Bağlı Katsayı
V_f	Lifin Hacim Oranı
d_f	Lifin Yarıçapı
δ	k_m ve k_f 'ye Bağlı İfade
A	Geometrik Şekle Bağlı Katsayı
W	Küreler için Düzenlemiş Faktör
B, C	Hacim Oranına Bağlı Katsayılar
F	Ortalama Sıcaklık Gradyeni
V	Voltaj (Volt)
I	Akım (Amper)
r	Yarıçap
$t_{1/2}$	Isı Transferi Yarı Süresi
\dot{Q}	Isı Transfer Miktarı (kW)

x, y, z	Kartezyen Koordinatlar
T	Sıcaklık (K, °C)
T_y	Yüzey Sıcaklığı (K, °C)
T_∞	Akışkan Sıcaklığı (K, °C)
h	Isı Taşınım Katsayısı (W/m ² K)
ε	Yayma Oranı
σ	Stefan-Boltzmann Sabiti
A, A_s	Alan (m ²)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
ρ_w	Suyun Yoğunluğu (kg/m ³)
c_p	Özgül Isı (J/kg.K)
μ	Su Buharı Difüzyon Direnci
α	Isıl Yayılım Katsayısı (m ² /s)
\ddot{q}	Isı Akısı (W/m ²)
L	Uzunluk (m)
ΔT	Sıcaklık Farkı (K)
m_k, m_0	Kuru Durumdaki Kütle (kg)
V_k	Kuru Durumdaki Hacim (m ³)
m_1	10 saniye içinde kütlesi (kg)
m_{14}	14 gün boyunca daldırma sonrası kütlesi (kg)
A_p	Daldırma İşleminde Su ile Temas Eden Yüzey Alanı (m ²)
W_{2B}	Hacimce Su Emme Oranı (%)

KISALTMALAR DİZİNİ

SEM	Elektron Mikroskop Görüntüsü
EPS	Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük
EMT	Efektif Ortam Teori Modeli
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü



1. GİRİŞ

Dünyadaki nüfus artışı ve sanayinin gelişmesi enerjiye olan ihtiyacı arttırmaktadır. Bu artış enerji kaynaklarının tükenmesine ve ağır çevresel hasarlara yol açmaktadır. Kaynakların kısıtlı olması ve çevresel etkilerin azaltılması için enerjinin verimli kullanılması gerekmektedir. Enerji sanayi, ulaşım, tarım, konut ve diğer sektörler olmak üzere farklı alanlarda tüketilmektedir. Konutlarda meydana gelen enerji tüketimi bütün ülkelerde yaklaşık %30 civarındadır[1-3]. Bu yüzden binalardaki enerji tüketiminin azaltılması hem ekonomi hem de çevre açısından önemlidir. Binalarda tüketilen enerjinin büyük bir kısmı ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Isıtma sistemlerinde enerji sağlamak için kullandığımız yakıtların yanması sonucu zehirli gazlar ortaya çıkmakta ve çevresel hasarlara sebebiyet vermektedir. Son yıllarda konutlarda enerjiyi verimli kullanmak için ısı kayıplarını en aza indirmek amacıyla yapılan ısı yalıtımı önem kazanmaktadır.

Binalarda ısı, ses, elektrik, su ve yangın gibi birçok amaç için yalıtım kullanılabilir. Isıtma sistemlerinde elde edilen enerjinin mahallerden dış ortama transferini engellemek için duvarlara ısı yalıtımı yapılmaktadır. Isı yalıtımı enerji kaybının azaltılması ve ısı konfor şartlarının uygun şekilde sağlanması için gereklidir. Isı yalıtımı sayesinde ısıtma ve soğutma giderlerinde büyük kazançlar sağlanarak enerjinin verimli kullanılması mümkün olmaktadır.

Isı yalıtımı yapılacak binanın bulunduğu iklim şartları dikkate alınarak malzeme seçimi yapılmaktadır. Yalıtım malzemelerinin ısıl iletkenliği, kalınlığı, gözeneklilik durumu, mukavemeti, ses geçirgenliği ve yangın dayanımı gibi birçok özelliği günümüzde değerlendirme kriteri olarak kullanılmaktadır. Yalıtım malzemelerinde en önemli husus ısıl iletkenliğin düşük olmasıdır. ısıl iletkenlik azaldıkça kaybedilen ısı miktarı düşük olacaktır. Son yıllarda özellikle köpük yalıtım malzemeleri düşük ısıl iletkenlikleri nedeniyle popüler hale gelmiştir. Köpük malzemelerinden EPS kapalı gözenekleri, su geçirmeme özelliği ve içerisindeki hava miktarından dolayı düşük ısıl iletkenliğe sahip olması yalıtım malzemeleri arasında tercih edilmesinin başlıca nedenleridir.

Isı yalıtımı binalarda genellikle dış duvarlara ve çatılara uygulanmaktadır. Yalıtım kalınlığı arttıkça enerji tüketimi azalacaktır. Ancak yalıtım kalınlığının artması bina kullanım alanını azaltmakta, maliyeti arttırmaktadır. Bu nedenle optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesi gerekir. Literatürde ısınma ve soğutma yüklerinin belirlenerek statik koşullarda optimum yalıtım kalınlığını farklı konseptlere göre belirlemeye yönelik birçok çalışma olmuştur[4-11]. Optimum yalıtım kalınlığı kullanılan yakıt çeşidi, bölgeden bölgeye ve yapı elemanlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Optimum yalıtım kalınlığının aynı yakıt türü için bölgeden bölgeye farklı yalıtım malzemeleri için 2-23 cm arasında değiştiğini ve buna bağlı olarak %22-%79 değerleri arasında enerji kazancı sağlandığı belirlenmiştir[7, 8, 10]. Kullanılan yakıt türüne göre (kömür, doğalgaz, LPG, elektrik ve fuel oil) optimum yalıtım kalınlığının farklı bölgeler dikkate alınarak sırasıyla 2-10cm, 2-8cm, 6-19cm, 6-26cm, 5-14cm arasında değiştiği belirlenmiştir. [6, 9, 12]. Optimum yalıtım kalınlığı Elazığın bulunduğu bölge dikkate alınarak farklı yapı elemanlarına göre doğalgaz için 3-8.5cm değerleri arasında değişim göstermektedir[13]. Optimum yalıtım kalınlığını belirlerken sonlu hacimler, sonlu farklar metodu[13-15] ve analitik yöntemler kullanılabilir[16, 17]. Yapılan çalışmalarda genellikle gözenekli malzemelerdeki ısı transferi hesaplamalarında nemin depolanması ve transferi ihmal edilmektedir. Ancak nemin transferi ve depolanmasının ısı yalıtım direncine iletilen ısı yükleri bakımından önemli ölçüde etki ettiği belirlenmiştir[18-20]. Nemin ısı yüklerine olan etkisi dikkate alınarak optimum yalıtım kalınlığı 3 farklı bölge için sırasıyla 10.5, 9.7, 8.1cm olduğu, nemin etkisi dikkate alınmadan yalıtım kalınlığının 10, 9.1, 7.8cm olduğu belirlenmiştir. [21].

Isıl iletkenlik mikroskobik ve makroskobik ölçüde belli parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Mikroskobik boyutlarda bir malzemenin ısı iletkenliği hücre büyüklüğü, çapı, hücrelerin dizilişine, ısı ışınım özelliğine ve yapıştırıcı malzemenin özelliğine bağlı olarak değişmektedir[22]. Yalıtım malzemelerinde bu parametreler üzerinde değişiklikler yapılarak ısı iletkenlikleri azaltılabilir. Isı transferine ve ısı iletkenliğe büyük ölçüde etki eden ısı ışınımını incelenmiştir[23]. Ayrıca ısı iletkenliğe sıcaklığında etkisi olmaktadır. EPS yalıtım malzemesi için içerisindeki havanın yanında katı fazdaki stiren monomerinde sıcaklığa karşı davranışı ısı iletkenliği önemli ölçüde etkiler[24]. Yoğunluğa ve üretim parametrelerine göre malzemelerin mekanik özelliklerinin ve ısı iletkenliğinin değişimi belirlenmiştir[25].

Yoğunluğun[26] artmasıyla ısı iletkenliğin azaldığı, malzeme kalınlığının değişmesiyle kritik kalınlığa göre ısı iletkenlik arttığı veya azaldığı deneysel olarak belirlenmiştir[27].

Isı iletkenliği etkileyen parametrelerden biri de nemdir. Nem transferi ve nemin malzemelerde depolanması sonucunda ısı iletkenlik değişmektedir. Malzemelerdeki nem içeriği belirlenerek ısı iletkenliğin değişimine bakmak enerji verimliliği açısından oldukça önemlidir. Malzemenin içerisindeki nem miktarı kuru ve ıslak iken ölçülen ağırlığından bulunabildiği gibi son zamanlarda uygulanan MRI tekniği, γ zayıflatma tekniği, direnç tekniği, X-ray yansıtım tekniği, TDR tekniği gibi birçok teknik bulunmaktadır[28]. Kuru ve ıslak haldeki farklı yalıtım malzemelerin ısı iletkenliğinin ne kadar değiştii belirlenmiştir[29, 30]. Bazı yalıtım malzemelerinde su emme, nem kapasitesi, gözeneklilik, yoğunluk, özgül ısı, su tutma özelliği ve ısı iletkenlik gibi özellikler çeşitli yöntemler kullanılarak belirlenmiştir[31]. EPS malzemesinin nem ile birlikte farklı yoğunlukta ısı iletkenliği ve su emme özelliği incelenmiştir[32]. Yapılan çalışmalarda su emme özelliği genellikle serbest daldırma yöntemiyle belirlenmiştir[33]. Yapılan bu çalışmalarda nemin de önemli bir parametre olduğu görülmektedir.

Isı iletkenlik sayısal olarak bilgisayar ortamında belirlenirken malzemenin iğyapısının düzgün olarak tasarlanması gerekir. Ancak içyapı tasarımında malzeme yapısına bağlı olarak zorluklar meydana gelmektedir. EPS malzemesinin birçok SEM görüntüsü incelenerek ortalama çap ve uzunluklar belirlenip, bu doğrultuda basit geometride içyapı çizimleri yapılmıştır[34-36].

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı iklim şartları ve yakıt türleri için EPS yalıtım malzemesinin optimum yalıtım kalınlığı incelenmiştir. EPS malzemesinin ısı iletkenliği, nem ve gözenekliliği ile ilgili deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak genleştiriilmiş polistiren köpük(EPS) malzemesinin ısı iletkenliği elektron mikroskop görüntüleri(SEM) kullanılarak sayısal olarak belirlenmiştir. Sayısal çalışma EPS içerisinde yer alan hava ve polistiren malzemesinin sıcaklığa bağlı değişimi dikkate alınarak sonlu eleman esaslı ANSYS programı ile yapılmıştır. Sayısal olarak incelediğimiz farklı yoğunlukta numunelerin ısı iletkenliği deneysel olarak bulunarak birbirleriyle

karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı yoğunlukta malzemelerin ısı iletkenliğine nemin etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

1.1.Genleştirilmiş Polistiren Sert Köpük (EPS)

Yalıtım malzemeleri genel olarak organik, inorganik, kompozit ve diğer malzemeler olmak üzere 4'e ayrılır[29]. Genleştirilmiş polistiren sert köpük, yapay organik bir yalıtım malzemesi olup ilk kez BASF firması tarafından üretilerek inşaatlarda kullanılmıştır. Ülkemizde başlangıçta farklı amaçlar için kullanılsa da zamanla düşük ısı iletkenlik özelliği sayesinde inşaatlarda ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Genleştirilmiş polistiren sert köpük stiren monomerinin polimerizasyonu sonucunda pentan gazının şişirici ve yapıştırıcı özelliği sayesinde kalıplanarak elde edilen köpük halde genellikle beyaz renkli olan termoplastik bir malzemedir. EPS'nin üretimi sırasında pentan gazının hava ile yer değiştirmesi sonucun oldukça yüksek gözenekliliğe sahip bir yapı elde edilmektedir. Bu yüksek gözenekliliğe sahip olmasından dolayı mükemmel bir ısı yalıtım özelliğine sahiptir.

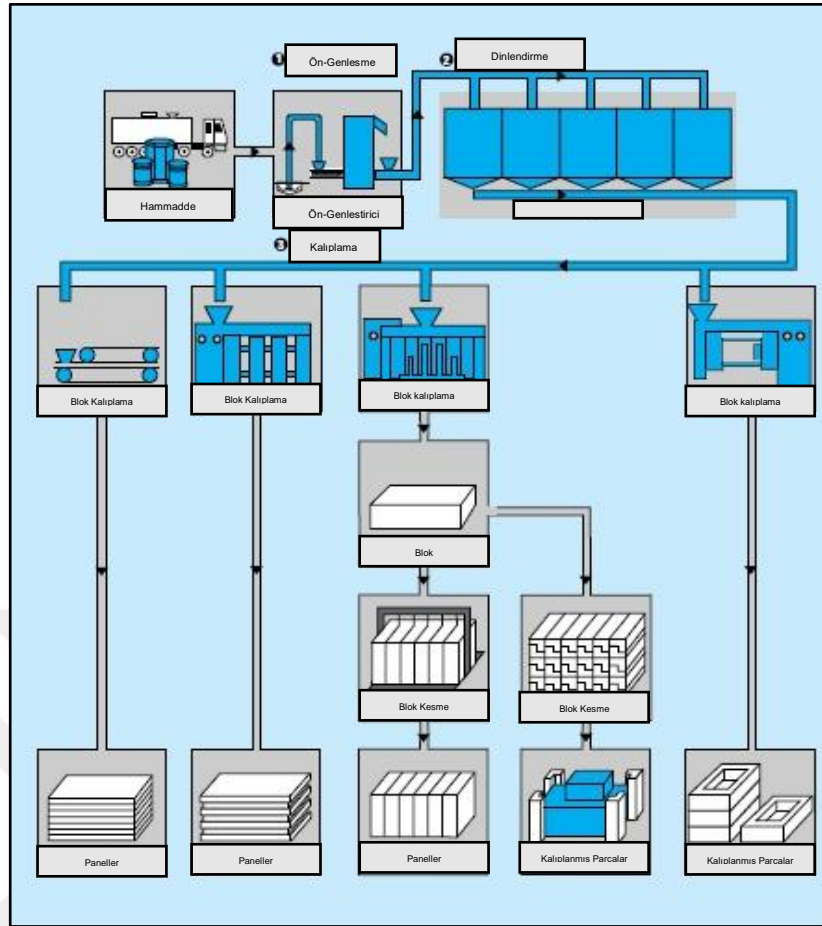
EPS öncelikli olarak yalıtım için kullanılmaktadır. Bunun yanında çatılarda, zeminlerde ve birçok mühendislik uygulamalarında tercih edilir. EPS'nin son yıllarda tercih edilme nedenlerini sıralayacak olursak;

- İçerisindeki yüksek hava miktarı sayesinde yüksek ısı yalıtımı sağlar.
- Maliyeti oldukça düşüktür.
- Basınca olan dayanımı yüksektir.
- Kalınlığı zamanla incelmez.
- Hafif olması ve uygulanışı kolaydır.
- Ozon tabakasına zarar veren bir madde açığa çıkarmaz.
- Sonsuz ömürlüdür ve geri dönüşümü olan bir malzemedir.
- Hiçbir kimyasal maddeyle tepkimeye girmez.
- Düşük buhar geçirgenliğine ve su tutmama özelliğine sahiptir.

EPS yalıtım malzemesinin üretim aşaması 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar ön-genleşme, dinlendirme ve kalıplama işlemleridir[37].

- **Ön-genleşme:** Hammadde olarak kullanılan kuru polistren tanecikleri daha büyük tanecikler oluşturmak için kuru bir buhara maruz bırakılır. İlk hacimlerinin yaklaşık 30 katına kadar genişletilmektedirler.
- **Dinlendirme:** Genleşme işleminden sonra tanecikler içerisinde buhar ve pentan gazı oluşur. Tanecikler oda sıcaklığında soğumaya bırakılarak havanın pentan gazı ve buharın yerine geçmesi sağlanır. Bu dinlendirme süresinin taneciklerin dış basıncı karşılayabilecek seviyeye ulaşana kadar devam etmesi gerekir[38].
- **Kalıplama:** Taneciklerin kullanım amaçlarına göre aralarında boşluk kalmayacak şekilde birleşerek şekil alması sağlanır. Kalıplama sırasında buhar uygulanarak kolayca şekil alması ve taneciklerin kalıp içerisinde genişlemesi sağlanarak arada boşluk bırakması zorlaştırılır.

Kalıplanan parçalar yeterli kurumaya bırakıldıktan sonra sıcak tel ile istenilen ölçülerde kesilir. Kesme işlemine gerek kalmadan uygun kalıplarda da üretim gerçekleştirilmektedir. Şekil 1.1'de EPS'nin üretim aşaması şematik olarak gösterilmiştir.

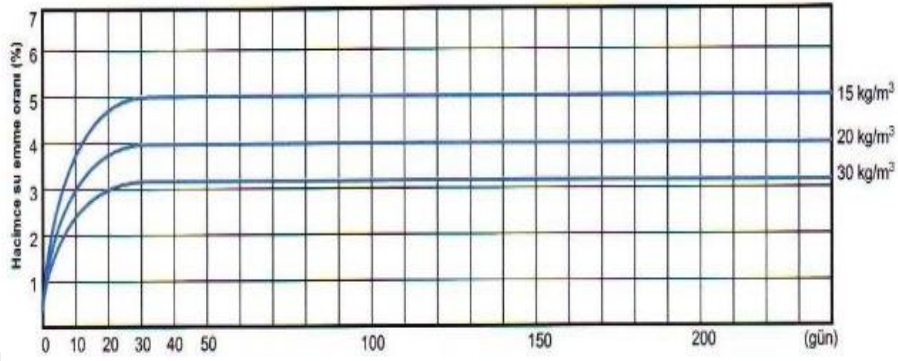


Şekil 1.1. EPS üretim aşamalarının şematik gösterimi[37]

EPS'nin kullanım amaçlarına göre pek çok çeşidi bulunmaktadır. Bunlar kullanılan tane büyüklüğü, işlenme özellikleri ve kullanım amacına göre değişiklik gösterir[39]. Styropor P: Standart köpük maddesi için, Styropor F: Zor alev alan köpük maddesi için, Styropor H: Doymuş karbonhidratlara dayanıklı köpük maddesi için, Styropor G: Renkli köpük maddesi elde etmek için farklı çeşitlerdeki köpüklerdir.

EPS yalıtım malzemesi $10-30 \text{ kg/m}^3$ yoğunluk değerleri arasında üretilir. Daha yüksek yoğunluklarda üretim sağlanabilmesine rağmen maliyetleri arttırdığı için tercih edilmemektedir. Yoğunluğun artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri azalmakta ve basınç dayanımı artmaktadır. EPS yalıtım malzemesinin düşük ısı iletkenlik değerine sahip olmasının en önemli nedeni pentan gazının hızlı bir şekilde hava ile yer değiştirme özelliğidir.

EPS yalıtım malzemesi kapalı gözeneklere sahip olduğu için suyu emme oranı oldukça düşüktür. Şekil 1.2’de 1 yıl süreyle suya batırılmış EPS’nin hacimsel su emme oranı görülmektedir. Ancak doğru bir şekilde üretim yapılmadığında su emme oranı artabilmektedir.



Şekil 1.2. Farklı yoğunlukta hacimce su emme oranı [40]

EPS yanıcı bir malzemedir. Yanma özelliği bileşenlerindeki malzeme özelliğine bağlı olarak değişir. Styropor F diye adlandırılan çeşidinde alevlendirmeyi geciktiren kimyasallar kullanılarak tutuşma ve alevlenme özellikleri diğer çeşitlerine göre iyi duruma getirilmektedir. Tüm EPS yalıtım malzemelerinde yanma sırasında herhangi bir zehirli gaz çıkışı olmamakla beraber ahşap gibi malzemelerin içinde bulunduğu yanma sınıfına göre çıkan gazlardan daha az gaz çıkışı olmaktadır. Kullanım sıcaklık aralığı olarak -180°C - 75°C değerleri tavsiye edilmektedir[41].

EPS yalıtım malzemesinin mekanik özellikleri kullanım alanı binalar olacaksa her türlü mekanik etkilere karşı dayanabilecek şartlardadır. Yüksek basınç dayanımının istenildiği durumlarda yüksek yoğunlukta malzeme kullanılarak istenilen dayanım sağlanabilir. Yalıtım malzemelerinde kalınlığın kritik bir değerden az olması ısıl özellikleri büyük ölçüde etkilemektedir. Bu yüzden standartlarda EPS yalıtım malzemesinin %10 deformasyondaki basınç dayanımı verilmiştir. Çizelge 1.1’de EPS yalıtım malzemesinin farklı yoğunluk değerleri için mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.1. Farklı yoğunluk değerleri için mekanik özellikler[37]

Özellikler	Test standardı	Test sonuçları		
Yoğunluk(kg/m ³)	EN ISO 845	15	20	30
Basınç dayanımı(kPa) (%10 deformasyonda)	EN 826	65-100	110-140	200-250
Basınç dayanımı(kPa) (<%2 deformasyonda)	ISO 785	20-30	35-50	70-90
Eğilme dayanımı(kPa)	EN 12089	150-230	250-310	430-490
Kesme dayanımı(kPa)	DIN 53427	80-130	120-170	210-260
Çekme dayanımı(kPa)	DIN 53430	160-260	230-330	380-480
Elastisite modülü(MPa)	EN 826	1-4	3.5-4.5	7.5-11

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Isı Transfer Mekanizmaları

Enerji transferi daima yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğru olmaktadır. İki ortam arasında sıcaklık farkı sıfır oluncaya kadar devam etmektedir. Sıcaklık farkı sonucunda bir sistemden diğerine transfer edilen enerji ısı olarak tanımlanır. Fakat bu ısı enerjisinin geçişi farklı hızlarda ve şekillerde meydana gelmektedir. Isı üç farklı yolla transfer edilebilir.

Bunlar;

- İletim(Kondüksiyon)
- Taşınım(Konveksiyon)
- Işınım(Radyasyon) olarak adlandırılır.

2.1.1. İletim

Parçacıkların etkileşimi sonucunda yüksek enerjideki parçacıkların enerjilerini düşük enerjideki parçacıklara aktarması sonucu meydana gelir. Bu enerji transferi gazlarda, sıvılarda ve katılarda meydana gelmektedir. Sıvı ve gazlarda ısı iletkenlik moleküler etkileşim ve moleküler yayılım ile meydana gelirken, katıların ısı iletkenliği moleküllerin titreşim hareketlerinin sebep olduğu kafes titreşim dalgaları ve katı içerisindeki serbest elektron akışı ile olur.

Yüksek enerjili ortamdan düşük enerjideki ortama transfer edilen ısının hızı bazı parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bunlar iki enerji seviyesi arasındaki sıcaklık farkına, transfer edilen doğrultudaki geometriye, malzeme ve kalınlığa bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrelere bağlı olarak Fourier eşitlik 2.1'de verilen formülü ısı iletim kanunu olarak ifade etmiştir.

$$Q_n = -kA \frac{dT}{dn} \quad n=x,y,z \quad (2.1)$$

Burada k orantı sabiti olup, ısı iletkenlik değeri olarak bilinmektedir[42]. Malzemenin fiziksel bir özelliği olup her malzeme için farklı bir değeri almaktadır. Hangi doğrultuda ısı transferi gerçekleşiyorsa Fourier ifadesi ona göre düzenlenebilir. Bir boyutlu x doğrultusunda Fourier ısı iletim denklemi eşitlik 2.2'deki gibi ifade edilir.

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

2.1.2. Taşınım

Bir katı yüzey ile temas halinde olan akışkan arasında meydana gelen ısı transfer şeklidir. Burada akışkanın hareketli olması gerekmektedir. Akışkan hareketinin olmaması halinde ısı iletim ile aktarılır.

Taşınım ile ısı geçişi gerçekleşirken akışkan fan, pompa vb. şekilde akmaya zorlanıyorsa zorlanmış taşınım, herhangi bir etki olmada sadece sıcaklık farkından dolayı ortaya çıkan yoğunluk farkından dolayı meydana geliyorsa doğal taşınım olarak ifade edilir.

Taşınım ile ısı transferi karmaşık bir olay olarak düşünülmektedir. Fakat taşınım hızını veren Newton'un soğutma kanunu olarak ifade edilen eşitlik 2.3'de verilen basit bir formül ile tanımlanmıştır.

$$\dot{Q} = hA_s(T_y - T_\infty) \quad (2.3)$$

Burada A_s taşınımın gerçekleştiği doğrultudaki yüzey alanı, T_y katı yüzey sıcaklığı, T_∞ akışkanın sıcaklığı, h taşınım ısı transfer katsayısı olarak tanımlanmıştır. Taşınım ısı transfer katsayısı deneysel olarak değişen, yüzey geometrisi, akışın doğallığına, akışkan özellikleri ve hızına bağlı olarak değişen bir sabittir.

2.1.3. Işınım

Herhangi bir ortama ihtiyaç duymadan moleküllerin elektronik düzenlerindeki değişimler sonucunda enerjiyi elektromanyetik dalgalar ile transfer eden ısı transfer mekanizmasıdır. Cisimlerin sıcaklıklarından dolayı yaydığı dalgalar ısı ışıınımıyla ilgilidir. Mutlak sıfır derecenin üstündeki sıcaklıklarda her cisim ısı ışıınım yaymaktadır[42].

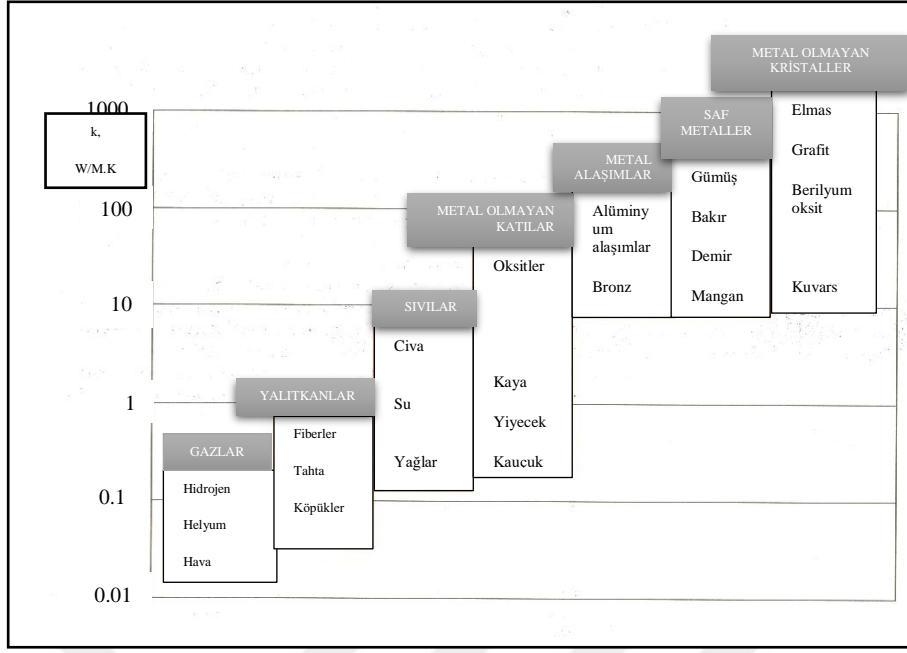
Bir yüzeyin yaydığı ışıınım hızı Stefan-Boltzmann kanunu ile eşitlik 2.4'deki gibi ifade edilmiştir.

$$\dot{Q} = \epsilon\sigma AT^4 \quad (2.4)$$

Burada σ stefan-Boltzmann sabiti, ϵ yüzeyin yayma özelliğine göre 0-1 arasında değişen bir sabit, T ışıınım yayan yüzeyin sıcaklığıdır. Işınım olayı genellikle iletim veya doğal taşınım varsa önemlidir. Zorlanmış taşınım uygulamalarında yüzeyin yayma özelliği ve sıcaklığına göre ihmal edilmektedir.

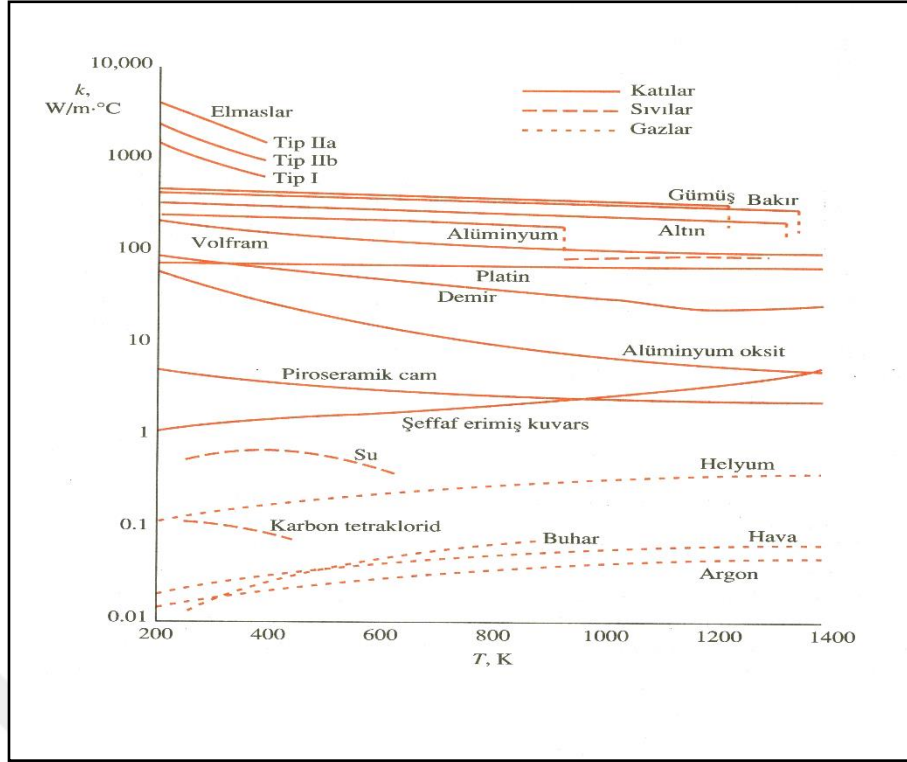
2.2. Isıl İletkenlik

Isıl iletkenlik malzemenin ısıyı iletme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Malzemenin birim kalınlığından, birim alan ve bir sıcaklık farkı başına olan ısı transfer hızıdır. Isıl iletkenlik malzemenin ortalama sıcaklık ve nem içeriğinin fonksiyonudur[43]. Bir malzemenin ısı iletkenliği katı fazdayken en yüksek, gaz fazındayken en düşük olur. Sıvı fazındayken ise katı ve gaz arasında yer alır. Şekil 2.1'de farklı hal durumları için çeşitli malzemelerin ısı iletkenlikleri görülmektedir.



Şekil 2.1. Oda sıcaklığında çeşitli malzemelerin ısı iletkenlik aralıkları[42]

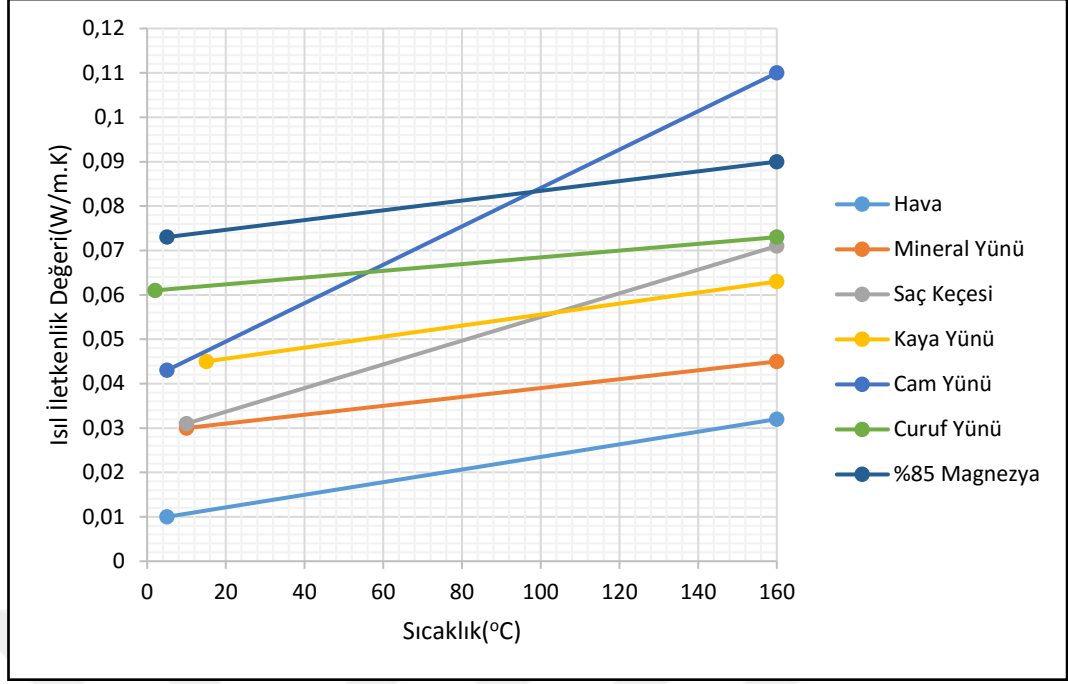
Malzemelerin ısı iletkenlikleri sıcaklığa bağlı olarak değişmekte olup, uygulamalarda bazı zorluklara neden olmaktadır. Bu nedenle ısı iletkenlik genellikle uygulamalarda ortalama sıcaklıkta belirlenerek sabit bir değer olarak kullanılır. Çeşitli katı, sıvı ve gazların ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 2.2’de verilmiştir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi gazların ısı iletkenliği sıcaklık arttıkça artmaktadır. Bazı istisnalar dışında sıvıların ısı iletkenliği ise tam tersi şekilde sıcaklık arttıkça azalmaktadır.



Şekil 2.2. Bazı katı, sıvı ve gazların ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi[42]

Malzemenin ısı iletkenliğinin değeri kullanım amaçları için önemlidir. Isı geçişinin önemli olduğu uygulamalarda yüksek ısı iletkenlik, yalıtım durumunda düşük ısı iletkenlik değerine sahip malzemeler seçilmelidir.

Isı iletkenlik değeri 0.2 W/m.K' den düşük olan malzemeler yalıtım amacıyla tercih edilmektedir[41]. Yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliği şekil 2.3'de verildiği gibi sıcaklık arttıkça yükselmektedir.



Şekil 2.3. Bazı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliğinin sıcaklık ile değişimi

Malzemelerin ısı iletkenliği sıcaklık, içyapı, gözenek ve nem miktarına bağlı olarak değişmektedir. Malzemelerin içyapısındaki hava veya boşluk miktarı gözeneklilik oranını göstermektedir. Gözenek oranı arttıkça genellikle ısı iletkenliği düşük olan hava veya boşluk miktarı malzemenin ısı iletkenliğini azaltır. Gözeneklilik oranı malzemenin yoğunluk değeri ile değiştirdiğinden dolayı, ısı iletkenlik değeri yoğunluk arttıkça azalmaktadır. Malzeme içerisindeki içyapı da ısı iletkenliği etkiler. Bir malzemenin içyapı dizilimi değiştikçe ısı iletkenliği de değişmektedir. ısı iletkenliği etkileyen diğer bir faktör nemdir. Nemli bir malzemenin ısı iletkenliği, kuru haldeki malzeme ve suyun ayrı ayrı ısı iletkenlik değerinden büyük olabilir[44]. Bir malzemenin ısı davranışı incelerken bütün etkileri değerlendirmek gerekir.

3. MATERYAL VE METOT

Isıl iletkenlik sıcaklık, malzeme bileşimi, malzemenin gözenek yapısı, içerisindeki nem miktarına, ısı geçiş yönüne ve malzemenin özel yapısına bağlı olarak değişmektedir. Bir malzemenin ısı iletkenliği arttıkça ısı geçişinin arttığı, azaldıkça ise ısı geçişinin azaldığı bilinmektedir. Bu yüzden yalıtım uygulamalarında ısı geçişini azaltmak amacıyla düşük ısı iletkenliğe sahip malzemeler seçilmektedir.

Çalışmada EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği hesaplanırken sayısal ve deneysel yöntemler kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar ısı akısının ölçülerek ısı iletkenlik değerinin belirlenmesi şeklindedir. Sayısal çalışmalarda SEM görüntüleri kullanılarak çizimler yapılmış ve ısı iletkenlik değeri çözümler sonucunda elde edilmiştir.

3.1. Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi

Birbirlerinin zayıf yönlerini gidererek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş en az iki faz veya malzemedan oluşan sisteme karma malzeme denir. Isıl iletkenlik değeri fiziksel bir özellik olup, her malzeme için farklı değerler alabildiği gibi, aynı malzeme içinde sıcaklık, nem, geometri, gözeneklilik ve malzeme içyapısına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Isıl iletkenlik değeri belirlenirken analitik, sayısal ve deneysel metotlar kullanılmaktadır.

3.1.1. Isıl İletkenlik Değerinin Analitik Olarak Belirlenmesi

İki fazlı karma malzemelerin ısı iletkenliğinin belirlenmesinde birçok model geliştirilmektedir. Malzeme yapısı, gözenekteki fazlar, gözenek büyüklüğü, açık veya kapalı gözeneğe sahip olması gibi parametreler farklı modellerin ortaya çıkmasını gerektirmektedir. Karma malzemelerde efektif ısı iletkenlik içerisindeki malzemelerin hacimsel oranlarına ve geometrik şekillerine bağlı olarak değişmektedir.

Gözenekli malzemelerin ısı iletkenliğinin belirlenmesinde birçok yöntem kullanılmıştır[44-47]. Bu yöntemler basit geometri ve hacim oranlarında kullanılmaktadır.

- **Paralel Model:** Isı akış yönüne göre paralel olarak yerleştirilmiş iki bileşenli malzemelerin ısı iletkenliğini hesaplamak için kullanılmaktadır. Karma malzeme için maksimum efektif ısı iletkenlik değerini verir. Paralel model için efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.1’de verilmiştir.

$$k_e = [k_f \phi_f + (1 - \phi_f) k_m] \quad (3.1)$$

- **Seri Model:** Isı akış yönüne göre seri olarak yerleştirilmiş iki bileşenli karma malzemelerin ısı iletkenliğini hesaplamak için kullanılmaktadır. Karma malzeme için minimum efektif ısı iletkenlik değerini verir. Seri model için efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.2’de verilmiştir.

$$k_e = \left[\frac{\phi_m}{k_f} + \frac{(1 - \phi_f)}{k_m} \right]^{-1} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki verilen eşitliklerde k_e karma malzemenin efektif ısı iletkenliğini, k_m malzemenin ısı iletkenliğini, k_f gözenek malzemenin ısı iletkenliğini ve ϕ_f gözenek malzemesinin hacimsel oranını göstermektedir.

Paralel ve seri modelde malzemenin içerisindeki bileşenlerin hacimsel karışım oranları ve ısı iletkenlikleri bilinmektedir. İki bileşenli basit içyapıdaki karma malzemelerin ısı iletkenlik değerleri düşük sıcaklık farkında paralel ve seri modeldeki değerlerinin arasında değişir[47].

- **Geometrik Model:** İki bileşenli karma bir malzemede efektif ısı iletkenlik bileşenlerin ısı iletkenliği ve hacimsel oranlarına göre ağırlıklı geometrik ortalama alınarak hesaplanır[48, 49]. Geometrik model ile efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.3’de verilen bağıntı ile bulunabilir.

$$k_e = [k_f^{\phi} \cdot k_m^{(1-\phi)}] \quad (3.3)$$

Geometrik model kullanılırken daha fazla bileşenin olması durumunda efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.4 ile hesaplanır[50].

$$k_e = \prod_{i=k,s,v,g} k_i^{V_i} \quad (3.4)$$

- **Maxwell Modeli:** Karma ya da gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliği potansiyel teori kullanılarak eşitlik 3.5 ile bulunmaktadır. Bu model karma malzemenin ara ve ana fazın homojen bir ortamda rastgele dağılımlı ve birbiriyle etkileşimsiz kürelerden oluştuğu malzemeler de kullanılmaktadır[50, 51].

$$k_e = k_m \frac{[2k_m + k_f - 2\phi_f(k_m - k_f)]}{[2k_m + k_f + \phi_f(k_m - k_f)]} \quad (3.5)$$

Burada k_m sürekli fazın ısı iletkenliğini, k_f süreksiz fazın ısı iletkenliğini ve ϕ_f ise süreksiz fazın hacim oranını göstermektedir. Bu model düşük hacim oranlarında fazların birbiri ile temasının az olması durumunda daha iyi sonuçlar vermektedir. Yüksek hacim oranlarında fazların birbiri ile olan temasının artması sonucunda maxwell modelinde yapılan kabullerden dolayı hata oranı artmaktadır[51].

- **Fricke ve Burgers Modeli:** Maxwell'in yaklaşımını kullanıp gözenek yapısını elips olarak kabul ederek efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.6 kullanılarak bulunmuştur.

$$k_e = \frac{k_m \phi_m + k_f (1 - \phi_m) \cdot F}{\phi_m + (1 - \phi_m) \cdot F} \quad (3.6)$$

Burada;

$$F = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 [1 + ((\frac{k_f}{k_m}) - 1)g_i]^{-1} \quad \sum_{i=1}^3 g_i = 1 \quad (3.7)$$

- **Halpin-Tsai Modeli:** Tek yönlü faza sahip olan lifli yapıdaki karma malzemelerin ısı iletkenliği için geliştirilmiştir. Efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.8 ve eşitlik 3.9 ile bulunmaktadır[52]. Bu eşitlikte k_{e_1} paralel yöndeki ısı iletkenliği, k_{e_2} dikey yöndeki ısı iletkenliği vermektedir.

$$k_{e_1} = \frac{1+2\alpha\mu_1 V_f}{1-\mu_1 V_f} k_m \quad (3.8)$$

$$k_{e_2} = \frac{1+2\mu_2 V_f}{1-\mu_2 V_f} k_m \quad (3.9)$$

Eşitliklerde verilen $\alpha = L/d_f$, d_f lifin yarıçapı, V_f lifin hacim oranını, k_m ana fazın ısı iletkenliğini μ_1 ve μ_2 lif malzemesinin ısı iletkenliğine bağlı katsayıdır.

- **Nielsen Modeli:** İki fazlı karma malzemeler için efektif ısı iletkenlik faz malzemelerinin geometrik şekilleri ve ısı iletkenlikleri dikkate alınarak eşitlik 3.10'dan hesaplanabilir.

$$k_e = k_m \left[\frac{1 + A \cdot \phi \cdot B}{1 - \phi \cdot \psi \cdot B} \right] \quad (3.10)$$

$$B = \frac{k_f / k_m - 1}{k_f / k_m + A} \quad (3.11)$$

$$\psi = 1 + \left[\frac{1 - \phi_m}{\phi_m^2} \phi \right] \quad (3.12)$$

Eşitliklerde verilen A değeri Einstein katsayısı ile ilgili olup, dolgu malzemesinin geometrik şekline bağlı olarak değişen şekil faktörüdür. ϕ_m dolgu fazının maksimum yığın hacmi ve ϕ_m 'nin değeri parçacık şekline bağlı olarak değişmektedir[47]. A ve ϕ_m değerleri farklı geometrik şekiller ve durumlar için değişmektedir.

- **Lichtenecker Modeli:** Malzemelerin hacim oranları ve ısı iletkenlikleri dikkate alınarak logaritmik toplam ile efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.13 ile bulunur.

$$\log(k_e) = \phi_f \cdot \log(k_f) + \phi_m \cdot \log(k_m) \quad (3.13)$$

Burada ϕ_m, ϕ_f hacim oranlarını, k_f, k_m malzemelerin ısı iletkenliklerini göstermektedir. Yukarıdaki denklem sadece iki yönlü rastgele yerleştirmeye uygun olan parçacıklar için doğru sonuçlar vermektedir.

- **Rayleigh Modeli:** Karma malzemenin gözeneklerinin küresel olarak kabul edildiği ve kübik bir düzende malzeme içerisine yerleştiği kabul edilir. Bu modelde efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.14 ile bulunur.

$$k_e = \frac{k_m [1 - 2\phi n - 1,65(\phi)^{10/3} An]}{[1 - \phi n - 1,65(\phi)^{10/3} An]} \quad (3.14)$$

Burada;

$$n = \frac{k_m - k_f}{2k_m + k_f}, \quad A = \frac{3k_m - 3k_f}{4k_m + 3k_f} \quad (3.15)$$

Rayleigh modeli basit ve gerçekten uzak bir model olduğu için genellikle k_e değerini belirleyemez.

- **Efektif Ortam Teori Modeli:** Heterojen karma malzemelerde, bileşenlerin bağıl miktarlarına bağlı olarak bileşenlerden birinin sürekli ısı iletim yolları

oluşturduğu ve sürekli fazı temsil ettiği kabul edilir[51]. Bu model birçok bileşene sahip malzemeler için genel olarak eşitlik 3.16 ile tanımlanır.

$$\sum_{i=1} V_i \frac{k_i - k_e}{k_i + 2k_e} = 0 \quad (3.16)$$

Genel denklem kullanılarak iki bileşen için efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.17'de verilmiştir.

$$k_e = \frac{1}{(3\varepsilon - 1)k_m + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_f + \sqrt{[(3\varepsilon - 1)k_m + (3(1 - \varepsilon) - 1)k_f]^2 + 8k_mk_f}} \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemde k_m, k_f faz malzemelerinin ısı iletkenliklerini ε ise gözeneklilik oranını göstermektedir.

- **Bruggeman Modeli:** İki faza sahip karma malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin hesaplanmasında efektif ortam teoremini kullanarak bir denklem önerilmiştir. Bruggeman denkleminin çözümü için birçok araştırmacı tarafından pratik çözümler yapılmıştır. Bu yaklaşıma göre efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.18'de verilmiştir.

$$k_e = \frac{k_m [1 - (1 - \frac{k_f}{k_m}) \frac{2}{3} \phi_f \delta]}{[1 + (\delta - 1) \phi_f]} \quad (3.18)$$

Burada δ ; k_m ve k_f 'ye bağlı bir ifadedir. Farklı faz formları için aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\text{Küresel: } \frac{3k_m}{2k_m + k_f}, \text{ Silindirik: } \frac{5k_m + k_f}{3(k_m + k_f)} \quad (3.19)$$

- **Meredith ve Tobias Modeli:** Bu model bruggeman modelindeki efektif ısı iletkenlik ifadesinin geliştirilmesi ile eşitlik 3.20’de verilmiştir.

$$k_e = k_m \left[\frac{2 - \phi}{2 + (W - 1)\phi} \right] \cdot \left[\frac{2(1 - \phi)}{2(1 - \phi) + W\phi} \right] \quad (3.20)$$

$$W = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2F} + \frac{2}{1 - F} \right) \quad (3.21)$$

Burada W gelişigüzel küreler için düzenlenmiş bir faktördür. Bu model gözenek oranı 0.6’dan küçük karma malzemeler için uygun sonuçlar vermektedir[49].

- **Russel Modeli:** Modelde malzeme içinde aynı boyutlu dağılı küpler halinde fazlar bulunmaktadır[47]. Efektif ısı iletkenlik sürekli ve süreksiz fazın akışkan veya katı olması halinde farklı şekilde tanımlanmaktadır. Efektif ısı iletkenlik dağınık faz akışkan sürekli faz katı ise eşitlik 3.22’de, dağınık faz katı sürekli faz akışkan ise eşitlik 2.23’de verilmiştir.

$$k_e = \frac{k_f \left[\phi_m^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{k_f}{k_m} \right) (1 - \phi_m^{\frac{2}{3}}) \right]}{\left[\phi_m^{\frac{2}{3}} - \phi_m + \left(\frac{k_f}{k_m} \right) (1 + \phi_m - \phi_m^{\frac{2}{3}}) \right]} \quad (3.22)$$

$$k_e = \frac{k_m \left[\phi_f^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{k_m}{k_f} \right) (1 - \phi_f^{\frac{2}{3}}) \right]}{\left[\phi_f^{\frac{2}{3}} - \phi_f + \left(\frac{k_m}{k_f} \right) (1 + \phi_f - \phi_f^{\frac{2}{3}}) \right]} \quad (3.23)$$

Burada k_m katı fazın ısı iletkenliği, k_f akışkan fazının ısı iletkenliğini ϕ_f, ϕ_m hacim oranlarını göstermektedir.

- **Krischer Modeli:** Bu modeldeki yaklaşım yapıyı oluşturan elemanların daha basit olarak ele alınmasıyla, etken ısı iletkenlik eşitlik 3.24’de verildiği gibi seri ve paralel iletkenliklerin ağırlıklı harmonik ortalaması olarak bulunur[53].

$$k_e = \left[\left(\frac{1-F}{k_{paralel}} \right) + \left(\frac{F}{k_{seri}} \right) \right]^{-1} \quad (3.24)$$

Burada F ağırlık oranı dağıtım faktörü olarak 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Bu modelin doğru sonuçlar verebilmesi için F dağıtım faktörünün uygun bir şekilde tahmin edilmesi gerekir.

- **Cheng ve Vachon Modeli:** Bu modelde süreksiz fazın parabolik bir dağılım gösterdiği varsayılmıştır[48]. Karışımdaki fazların hacimsel oranlarına göre iki farklı efektif ısı iletkenlik ifadesi eşitlik 3.25 ve 3.26'da verilmiştir.

$k_m > k_f$,

$$\frac{1}{k_e} = \frac{1}{\sqrt{C(k_f - k_m)(k_m + B(k_f - k_m))}} \tan^{-1} \left[\frac{B}{2} \sqrt{\frac{C(k_f - k_m)}{(k_m + B(k_f - k_m))}} \right] + \left(\frac{1-B}{k_m} \right) \quad (3.25)$$

$k_f > k_m$,

$$\frac{1}{k_e} = \left[\frac{1}{\sqrt{C(k_f - k_m)(k_m + B(k_f - k_m))}} \ln \left[\frac{\sqrt{(k_m + B(k_f - k_m))} + \frac{B}{2} \sqrt{C(k_f - k_m)}}{\sqrt{(k_m + B(k_f - k_m))} - \frac{B}{2} \sqrt{C(k_f - k_m)}} \right] + \left(\frac{1-B}{k_m} \right) \right] \quad (3.26)$$

Burada;

$$B = \sqrt{\frac{3 \cdot \phi_f}{2}}, \quad C = -4 \sqrt{\frac{2}{3 \cdot \phi_f}} \text{ şeklinde tanımlanmaktadır.}$$

Isıl iletkenliğin analitik çözümleri genellikle düzgün içyapıdaki malzemelerde doğru sonuçlar vermektedir. İçyapısı düzgün olmayan malzemelerde çeşitli kabuller yapılması gerektiğinden çok doğru sonuçlar elde edilemeyecektir. Bu içyapısı düzgün olmayan karma malzemelerde ısı iletkenliğin belirlenmesinde sayısal ve deneysel yöntemlerin kullanılması gerekir.

3.1.2. Isıl İletkenlik Değerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

Isıl iletkenliğin deneysel olarak belirlenmesinde birçok farklı deney metotları kullanılmaktadır. Kullanılan deney metotlarını sıcaklık dağılımının zamanla değişmesine bağlı olarak sürekli rejim ve geçici rejim olmak üzere iki farklı gruba ayırabiliriz. Bu metotlardan hangisinin kullanılacağı malzeme türü, boyutu, içyapısı ve ölçüm sıcaklık aralığına göre belirlenmektedir.

Sürekli Rejim Metodu

Sürekli rejim ölçüm yönteminde eşitlik 3.27'deki Fourier'in tek boyutlu ısı iletim yasası kullanılmaktadır. Bu yöntemde sıcaklık dağılımı ve transfer edilen ısı miktarı efektif ısı iletkenliğin bulunmasında kullanılmaktadır.

$$\ddot{q}_n = -k_n \frac{dT}{dn} \quad (3.27)$$

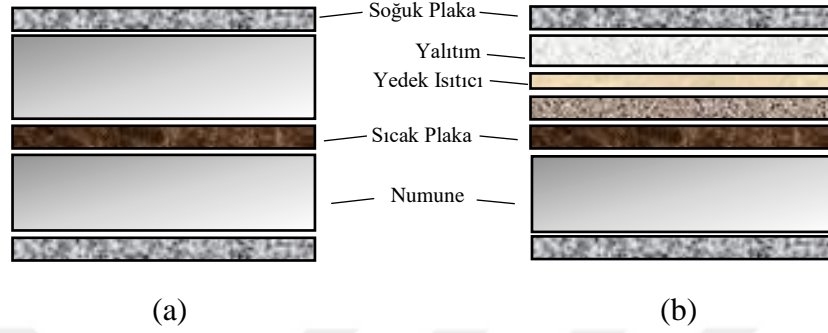
Burada \ddot{q}_n ısı transferinin gerçekleştiği doğrultuya dik olarak geçen ısı akısını, k_n ısı transferinin gerçekleştiği doğrultudaki ısı iletkenlik değerini göstermektedir.

Sürekli rejimde ısı iletkenlik ölçümleri için genellikle kullanılan deney metotları; sıcak plaka metodu, ısı akış metre metodu, kalibre edilmiş ve mahfazalı sıcak kutu metodudur. Bu metotlar kullanılacak katı malzeme türlerine göre geliştirilmiş yöntemlerdir.

- **Mahfazalı Sıcak Plaka Metodu:** Bu metot yapı elemanlarının ve yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliklerinin bulunmasında kullanılır. Isıl iletkenlik ölçümleri için sıcaklık aralığı genellikle -180°C - 600°C arasında olup, bazı durumlarda 1700°C 'ye kadar çıkmaktadır.

Bu metotta deney parçası mahfazalı sıcak plakalar arasında yerleştirilir. Mahfazalı sıcak plakalar arasına yerleştirilmesiyle iki düz yüzey arasında tek yönlü ısı akış hızı yoğunluğunu kararlı şartlarda tayin edilir[44]. Sıcak plaka metoduna göre cihazlar çift ve tek deney parçalı olmak üzere iki farklı şekilde

tasarlanabilir. Genellikle tercih edilen şekil 3.1’de verilen çift deney parçalı sıcak plaka metodudur.

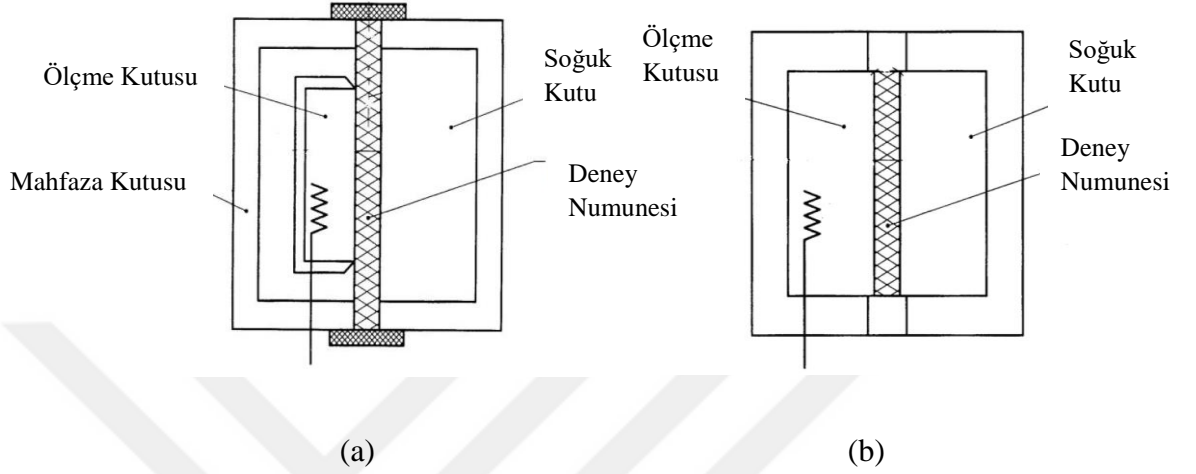


Şekil 3.1. Mahfazalı Sıcak levha metodu a) Çift deney parçalı b) Tek deney parçalı
[54]

Çift deney parçalı sıcak levha cihazında deney parçaları arasında ısıtıcı bulunur. Isı akışı deney parçalarının içinden soğuk plakalara doğru gerçekleşir. Tek deney parçalı sıcak levha cihazında diğer deney parçası yerine yalıtım ve koruma plakası yapılarak üst yüzey ile olan ısı transferi sıfır olmaktadır.

- **Kalibre Edilmiş ve Mahfazalı Sıcak Kutu Metodu:** Yalıtım malzemeleri, cam vb. malzemeler, mermer ve yapı kabuk elemanlarının ısı iletkenliği bu metotla bulunur. Ölçüm sıcaklık aralığı -20°C - 40°C arasında değişmektedir. Sıcak kutu metodu kalibre edilmiş sıcak kutu ve mahfazalı sıcak kutu olmak üzere iki metoda ayrılır. Bu metotta diğer yöntemlerden farklı olarak ısı transfer şekline bakılmaksızın aktarılan toplam ısı transfer miktarı belirlenir. Bu yüzden ısı iletkenlik özelliği deney numunesine, sınır şartlarına, numunenin boyutlarına, hava hızına ve ortamdaki bağıl neme bağlı olarak değişir[55]. Diğer yöntemlerde numune boyutları belli ölçülerde olması gerekirken, burada uygulamadaki ölçülere göre deney yapılabilir. Mahfazalı sıcak kutu tekniğinde şekil 3.2’de görüldüğü gibi yatay doğrultuda ısı akışı ve duvarlardaki ısı akışını minimize etmek için ortam mahfaza kutusu

ile çevrilmiştir. Kalibre edilmiş sıcak kutu metodunda ise ölçme odasından ısı kayıplarını önlemek için ısıl iletkenliği düşük bir yapı elemanı kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 3.2. Sıcak kutu metodu a) Mahfazalı sıcak kutu b) Kalibre edilmiş sıcak kutu
[55]

- **Isı Akış Ölçme Metodu:** Bu metotta genellikle yalıtım malzemeleri ve cam, seramik malzemelerinin ısıl iletkenlikleri bulunur. Ölçme sıcaklık aralığı -100°C - 200°C değerleri arasında değişir. Bu metottaki temel mantık sıcak ve soğuk yüzey arasındaki sıcaklık farkı sonucunda oluşan ısı akısının hesaplanmasıdır. Isı akısının ölçümleri test numunesi ile temas eden bir plakaya yerleştirilmiş olan ısı akısı sensörleri ile gerçekleştirilir. Şekil 3.3'de ısı akış ölçme deney düzeneğinin şematik resmi verilmiştir.

Sıcak levha
Deney numunesi
Isı akısı sensörü
Soğuk levha

Şekil 3.3. Şematik ısı akısı ölçüm test düzeneği

Geçici Rejim Metodu

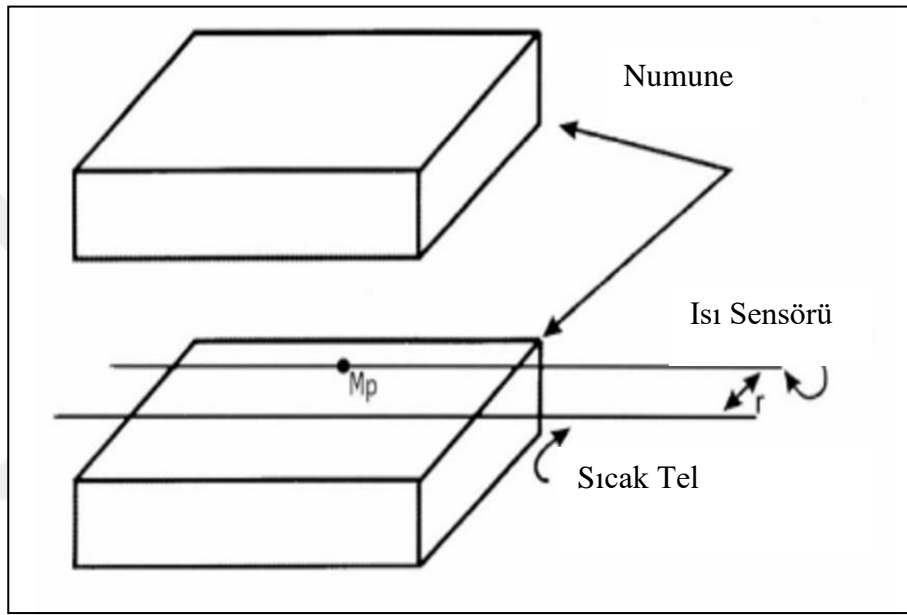
Geçici rejim metodunda eşitlik 3.28’de verilen bir boyutlu içerisinde ısı üretimi olmayan zamana bağlı ısı transfer denklemi kullanılır. Bu yöntemde kararlı bir sıcaklık dengesinin kurulmasına ve özel numune boyutlarına ihtiyaç duyulmamaktadır[56]. Geçici rejim metodunda düşük ısı iletkenliğe sahip malzemelerin ölçümlerinin yapılması tercih edilmemektedir. Diğer malzemelerin ısı iletkenliğinin ölçülmesinde geçici rejim metodunun kullanılmasının nedeni kararlı hal durumundaki ölçüme göre oldukça kısa sürede ısı iletkenlik değerinin bulunmasıdır. Geçici rejimde ısı iletkenlik ölçümlerinde genellikle kullanılan deney metotları; kızgın tel metodu, lazer flash metodudur. Bu yöntemler sıvı, gaz ve katıların ısı iletkenliklerinin ölçümünde kullanılmaktadır.

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{c_p \rho}{k} \frac{dT}{dt} \quad (3.28)$$

- **Kızgın Tel Metodu:** Numune üzerine yerleştirilen metal telin elektrik akımı ile ısıtılması sonucu, farklı zamanlarda teldeki sıcaklık değişimini takip ederek ölçüm yapan tipik temas dirençli geçici rejim metodudur. Efektif ısı iletkenlik eşitlik 3.29’de verilen basit formül ile bulunur[57].

$$k = \frac{VI}{4\pi\Delta T(t)} \ln \frac{(4t\alpha)}{r^2 C} \gamma \quad (3.29)$$

Burada I akım şiddeti, V birim uzunluk başına voltaj, $\Delta T(t)$ herhangi bir zamandaki sıcaklık farkı, $\ln(C) = \gamma = 0.5772$, α ısı genleşme katsayısıdır. Kızgın tel metodunun şematik resmi şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Kızgın tel metodu şematik resmi

- **Lazer Flash Metodu:** Bu yöntemde ısı sinyalleri lazer tarafından üretilerek ölçümü yapılacak numunenin ön yüzeyinden emilir. Daha sonra emilen ısı numunenin arka yüzeyine iletilir. Bunun sonucunda iki yüzey arasında sıcaklık farkı sensörler aracılığı ile zamana bağlı olarak tespit edilir. Lazer flash metodunun şematik resmi şekil 3.5'de verilmiştir. Arka yüzeydeki sıcaklık farkı zamana bağlı olarak sürekli analiz edilerek, standart eğriler ile karşılaştırmalar sonucunda ısı yayılım katsayısı bulunur. Isıl yayılım katsayısı eşitlik 3.30'da verilen basit bir formül ile bulunur[56].

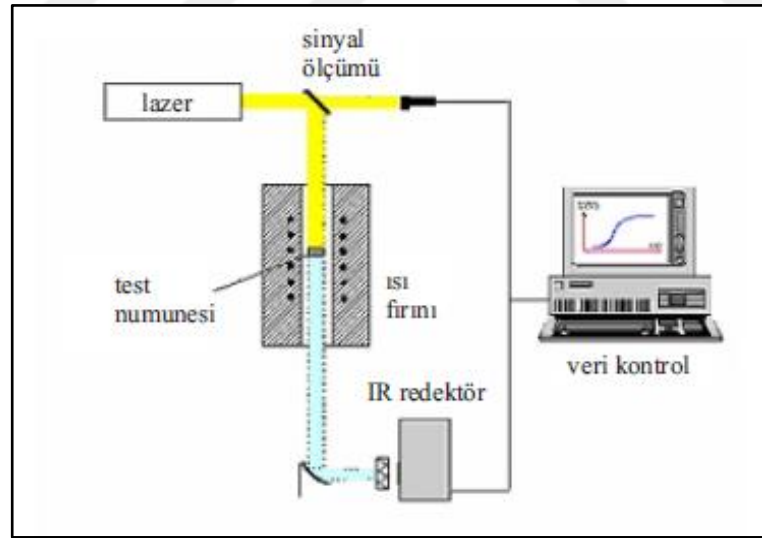
$$\alpha = \frac{1,37d^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (3.30)$$

Burada d numune kalınlığı, $t_{1/2}$ ısı transferi yarı süresidir. Bu metotta çok geniş sıcaklık aralığında ölçümler yapıldığı için katı malzemeler için oldukça kullanılan bir yöntemdir[44]. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken hususlar yüksek sıcaklıklarda malzemenin zarar görmesine engel olmak için önlemler alınmalıdır.

Ölçülen ısı yayılım katsayısı kullanılarak eşitlik 3.31 yardımıyla ısı iletkenlik değeri belirlenir.

$$k = \rho \alpha C \quad (3.31)$$

Burada ρ malzeme yoğunluğunu, kg/m^3 ; α malzemenin ısı yayılım katsayısını, m^2/s ; C malzemenin özgül ısısı, kJ/kg.K .



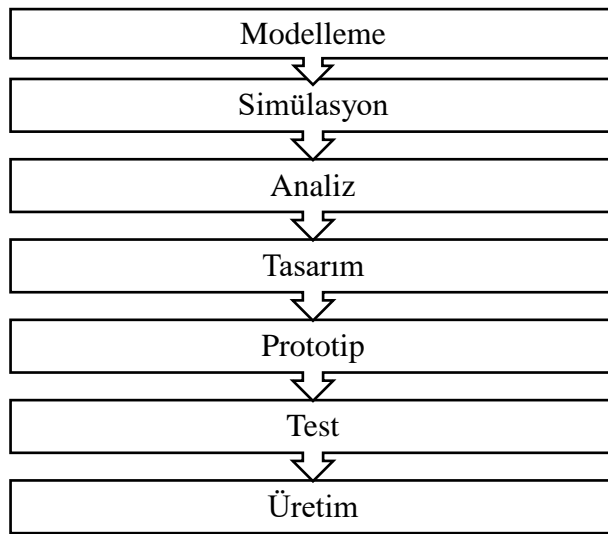
Şekil 3.5. Lazer flash metodunun şematik gösterimi [58]

Literatürde geçici rejim yönteminde ölçüm yapan birçok yöntem bulunmaktadır[58]. Ölçümü yapılacak malzemelerin özellikleri, boyutları ve ölçüm

aralıkları dikkate alınarak uygun yöntemin belirlenmesi gerekir. Yapılan araştırmalar neticesinde oda sıcaklığı ve daha düşük sıcaklıklarda lazer flash metodu yerine diğer geçici rejim yöntemlerini kullanmak, yüksek sıcaklık değerlerinde lazer flash metodunu kullanmak oldukça uygun bir yaklaşımdır.

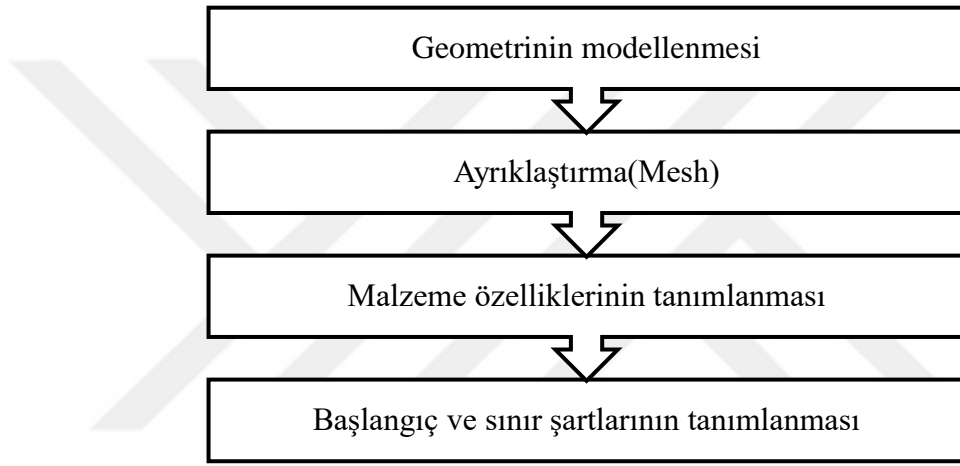
3.1.3. Isıl İletkenlik Değerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi

Isı transferinde karmaşık problemlerin çözümünde sayısal analiz yöntemleri oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Sayısal analiz yöntemlerinde yaygın olarak kullanılan metotların başında sonlu elemanlar metodu yer almaktadır. Sonlu elemanlar metodu birçok alanda problemin modellenmesi ve simülasyonunun yapılmasında vazgeçilmez bir teknolojidir. Sonlu elemanlar yöntemi sayesinde bir ürünün veya sistemin oluşturulmasındaki maliyeti en aza indirebiliriz. İleri bir mühendislik tasarımının üretimine kadar olan işlemler şekil 3.7’de görülmektedir. Burada görüldüğü gibi prototipin üretilmeden bilgisayar destekli modelleme ve simülasyon çalışmaları ile sistemin ne kadar etkili olduğu önceden belirlenerek bu yönde tasarım üzerinde iyileştirmeler yapılabilir. Bu iyileştirmeler hem zaman hem de ekonomik olarak fayda sağlamaktadır.



Şekil 3.6. Tasarımdan üretime kadar olan işlemler

Bir mühendislik probleminin çözümünde analitik yöntemler her zaman doğru sonuçlar vermektedir. Her zaman analitik yöntemlerin kullanılması mümkün olmamaktadır. Bazı mühendislik problemlerinde geometrinin, başlangıç ve sınır şartlarının karmaşık olması analitik yöntemler ile problemin çözümünü oldukça zorlaştırmaktadır. Pratikte bu karmaşık problemlerin çözümünde sonlu elemanlar metodu kullanılmaktadır. Bilgisayar destekli sonlu elemanlar metodunun işlem sırası 4 ana adımdan oluşmaktadır. Şekil 3.8’de sonlu elemanlar metodu için akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.7. Sonlu elemanlar metodu akış şeması[59]

Sayısal analiz metodunda kullanılan birçok program bulunmaktadır. ANSYS, NASTRAN, COSMOS, MARC sonlu elemanlar metodunu kullanan programlardan bazılarıdır. Bu programların kullanıldığı alana göre kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Bu programlar aracılığıyla sistemin modellenmesi, simülasyonu ve analizleri yapılabilmektedir. Ancak bazı durumlarda geometrinin karmaşık olması tasarım aşamasında zorluklar çıkarmaktadır. Bu durumlarda AUTOCAD, SOLIDWORKS gibi çizim programlarında geometriler elde edilerek simülasyon ve analizleri sonlu eleman esaslı programlarda yapılmaktadır.

3.2. Deneysel Çalışma

Yapılan araştırmalar sonucunda kullanacağımız yalıtım malzemesi için uygun olan yöntemin kararlı rejim metodu olan ısı akış ölçme metodu olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntem uygun standartlar, cihazlar ve numune boyutları belirlenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan numuneler piyasada bulunan farklı yoğunluklardaki (16 kg/m^3 , 21 kg/m^3 , 25 kg/m^3) beyaz EPS diye bilinen yalıtım malzemesidir.

3.2.1. Numunelerin Hazırlanması

EPS yalıtım malzemesinin üretiminden kaynaklı gözenekler malzemenin her bölgesine homojen olarak dağılmaz. Bu yüzden hazırlanacak numunenin seçiminde sonuçların doğruluğu açısından dikkatli davranılmalıdır. Çalışmada ısı iletkenliği ölçülecek numuneler 50x100cm boyutundaki plakaların orta bölgesinden kesilerek mümkün olduğu kadar farklı yoğunluklar için homojen bir yapı elde edilmeye çalışılmıştır. Buna göre ölçüm yapılacak numuneler $30 \times 30 \times 2 \text{ cm}^3$ kesilerek hazır hale getirilmiştir.

3.2.2. Kurutma İşlemi

EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğinin farklı yoğunluk, sıcaklık ve neme göre değişimini belirlemek için öncelikle numunelerin içerisindeki nemi tamamen atması için hava dolaşımlı etüv fırında tamamen kurutulmuştur. Kurutma işlemi sırasında 24 saat aralıklarla ölçümler yapılarak aradaki farkın %0.2'den küçük olması durumuna kadar kurutmaya devam edilmiştir. Kütledeki değişim oranı istenilen aralığa geldiğinde kurutma işlemi sonlandırılmıştır.

3.2.3. Ölçüm Standartları ve Kullanılan Cihazlar

Çalışmadaki malzemenin ısı iletkenliğinin belirlenmesinde en uygun yöntem olarak kararlı rejim metodunda ölçüm yapan ısı akış ölçme yöntemi prensibine göre çalışan bir cihaz kullanılmıştır.

Isı akış ölçüm metodunu dikkate alarak ölçüm yapacak cihazlar için TS ISO 8301-Isı Yalıtımı-kararlı haldeki ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini-ısı akış cihazı standardı bulunmaktadır. Bu standart kullanılarak ilgili hesaplamaların ve deneyin doğru bir şekilde uygulanması sağlanmıştır. TS ISO 8301 standardı düz, levha halindeki deney parçalarında kararlı hal ısı aktarımını ölçmek için ısı akış sayacının kullanılması gerektiğini ve deney parçalarının ısı aktarım özelliklerinin hesaplanmasını kapsamaktadır[60].

Bu standarda göre ölçüm yapan cihazların çalışma prensibi, ısıtma ve soğutma üniteleri arasında deney parçasının yerleştirilerek iki yüzey arasındaki ortalama sıcaklık farkının sabit olması sağlanarak kararlı rejim şartları oluşturulur. Isı akış sayacı deney parçasının merkezinden geçen tek yönlü akış hızını ölçmektedir. Akış hızının deney parçasının kalınlığıyla birlikte kullanılmasıyla ısı iletkenlik değeri belirlenir.

Isı iletkenliğin nem içeriğine bağlı olarak değişiminin belirlenmesinde öncelikli olarak 14 gün boyunca tamamen suya daldırılarak doymuş nem içeriği belirlenmiştir. Tamamen daldırma işlemi için uygulanan yöntem temel olarak TS EN 12087 Isı Yalıtım Malzemeleri-Binalar İçin-Daldırma Metoduyla Uzun Süreli Su Absorpsiyonunun Tayini standardıdır. Ayrıca kuru duruma göre doymuş nem içeriğinin bulunmasıyla ilgili yapılan çalışmalardaki yöntemler dikkate alınarak deneyler yapılmıştır[31, 32]. Bu yöntemde deney numuneleri tankın içerisindeki su seviyesi 50mm±2 mm aşacak şekilde 23±5 °C sıcaklıkta tutularak deneyler gerçekleştirilmiştir.

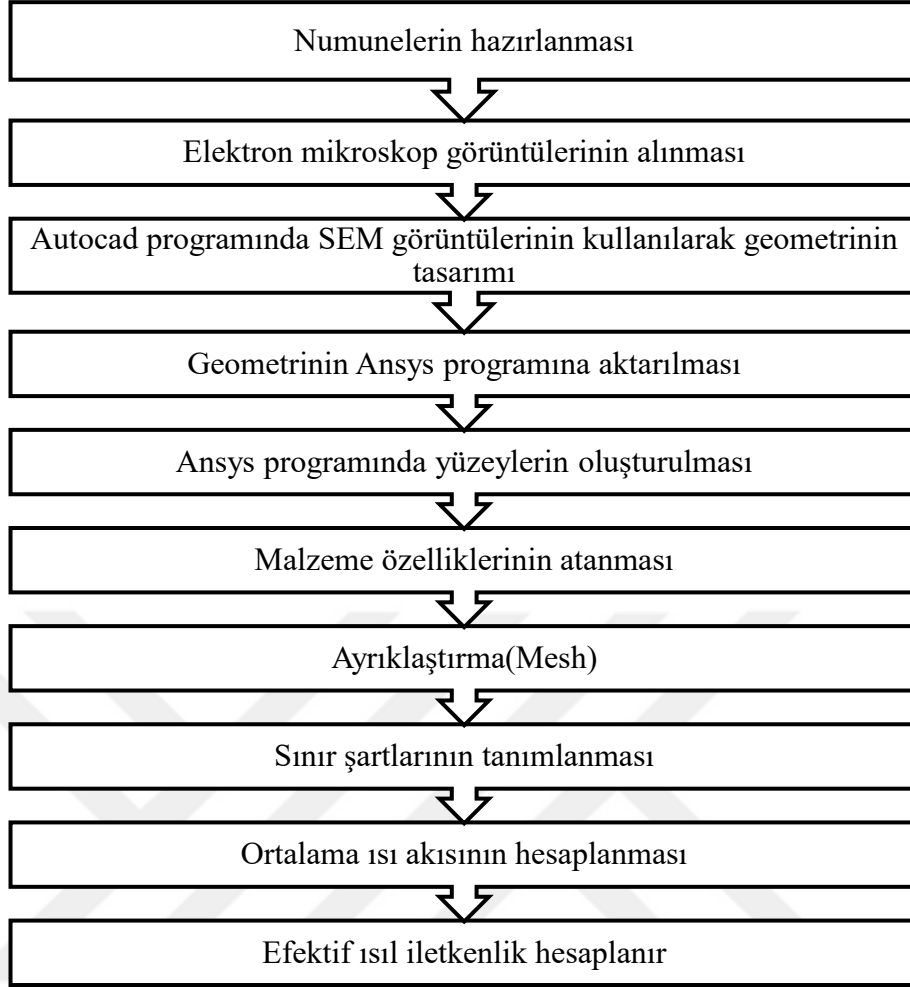
Bu çalışmada deneysel olarak ısı iletkenliğin bulunmasında TS ISO 8301 standardına göre ölçüm yapan Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Lasercomp Fox 314 ısı iletkenlik cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Lasercomp Fox 314 Cihazı

3.3. Sayısal Çalışma

Bu çalışmada 3 farklı yoğunluktaki EPS yalıtım malzemesinin efektif ısı iletkenlik değerinin sayısal olarak belirlenmesinde sonlu eleman esaslı ANSYS 16.1 programı kullanılmıştır. Geometrinin karmaşık olmasından dolayı AUTOCAD 2016 programı tasarımın yapılması için kullanılmıştır. Sayısal modelleme yapılırken geometrinin oluşturulmasında SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Daha sonra farklı sınır şartları kullanılarak farklı noktalarda sıcaklık ve ısı akısı değeri sayısal olarak belirlenerek ısı iletkenlik değeri hesaplanmıştır. Bu çalışmada şekil 3.9'da verilen akış şeması kullanılarak farklı yoğunluktaki EPS yalıtım malzemesinin efektif ısı iletkenliği tek boyutlu olarak farklı doğrultularda hesaplanmıştır.



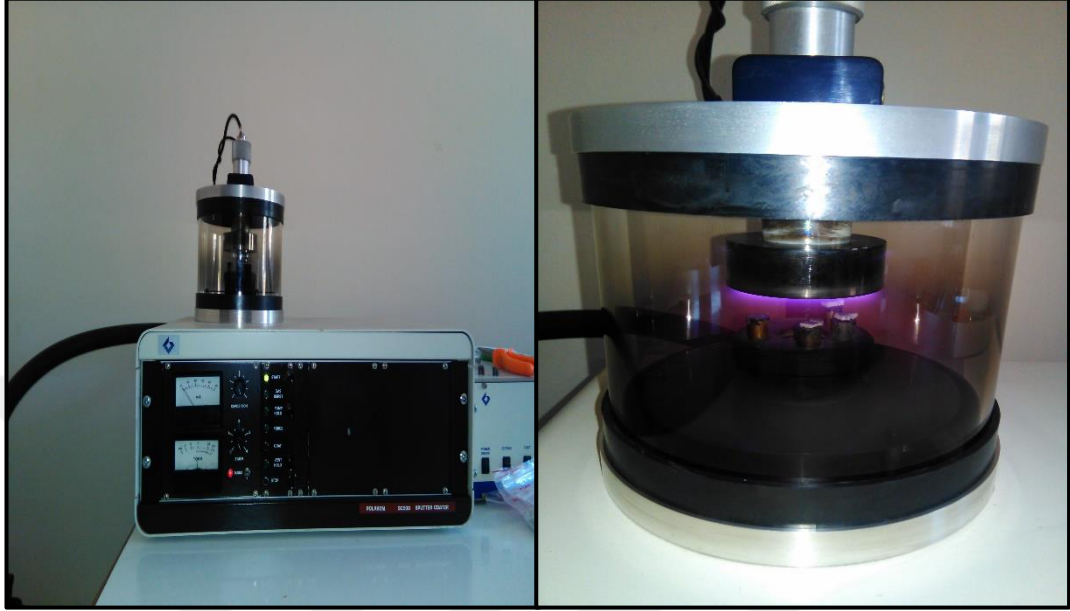
Şekil 3.9. Sayısal çözüm için akış şeması

3.3.1. SEM Görüntüsünün Alınması

Taramalı elektron mikroskop(SEM), bir yüzeye gönderilen elektron demetinin yüzeyi tarayarak görüntü elde ettiği bir cihazdır. SEM 'den elde edilen görüntüler kullanılarak içyapı tasarımı yapılmıştır. SEM görüntüleri Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan taramalı elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiştir.

SEM görüntüleri alınırken ilk işlem numunelerin çok ince bir plaka şeklinde kesilmesidir. Daha sonra kesilen ince plakalar çift yapıştırıcı bakır şerit üzerine yerleştirilerek şekil 3.10'da verilen altın kaplama cihazında ince bir tabaka ile

kaplanmaktadır. Kaplama işleminden sonra taramalı elektron mikroskopunda farklı yoğunluktaki numuneler için farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmıştır.



Şekil 3.10. Altın Kaplama Cihazı

3.3.2. SEM Görüntülerinin Analizi

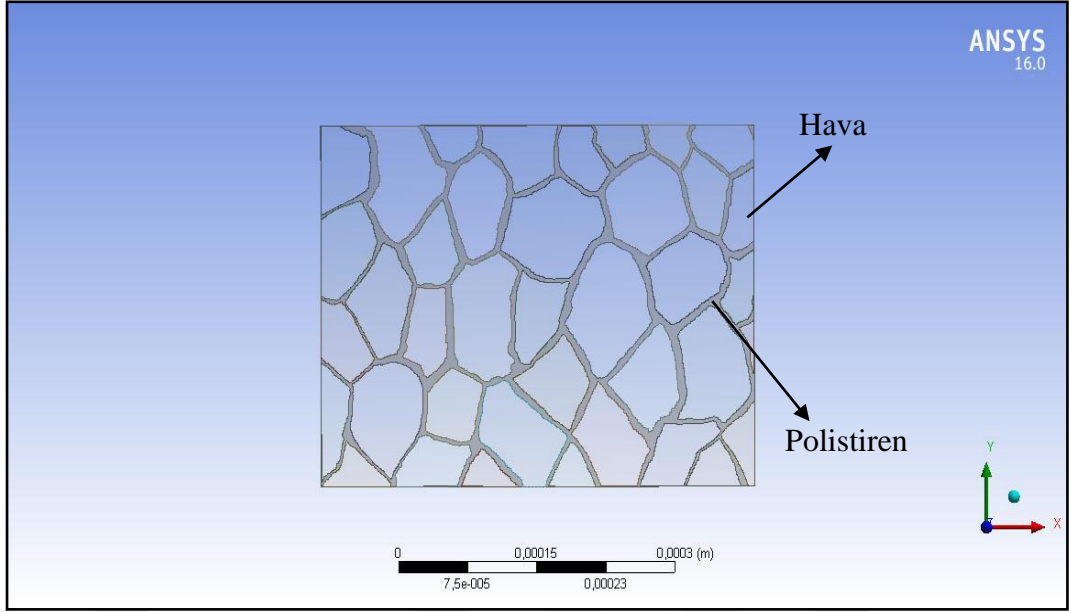
Görüntünün temel bileşeni piksellerdir. Bu nedenle bir görüntü piksellerden oluşan bir matris olarak düşünülebilir. Görüntü işlemede farklı görüntü türleri bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi gri seviye resimlerdir. Gri seviye resimler 8 bit ve gri ton değerleri 0-255 değerleri arasında değişir. Gri seviye resimlerde 256 tane grinin farklı ton değeri vardır. 0 gri değeri siyah renge, 255 gri değeri ise beyaza karşılık gelmektedir. Çalışmada kullanılmak üzere seçilen SEM görüntüleri geometri tasarımını kolaylaştırmak amacıyla MATLAB programında sayısal olarak işlenmiştir.

SEM görüntülerinin gri seviye resim formatına dönüştürülmesi, siyah ve beyaz bölgeler arasındaki ayrımın daha kolay yapılması amaçlanmıştır. Alınan SEM görüntüleri gri resim formatında olduğu için herhangi bir dönüştürmeye gerek yoktur. 0-255 arasında farklı tonlardaki rengin bir kısmı hava, diğer kısmı ise polistirendir. Bu

değerlerdeki ton renkleri incelenerek uygun bir değer belirlenip, sınır değer altındaki tonlar beyaz renge yani polistiren, üstündeki değerler ise siyah renge yani havaya dönüştürülerek fazlar arasındaki ayırım netleştirilir.

3.3.3. Modelleme, Ağ Yapısı ve Sınır Şartları

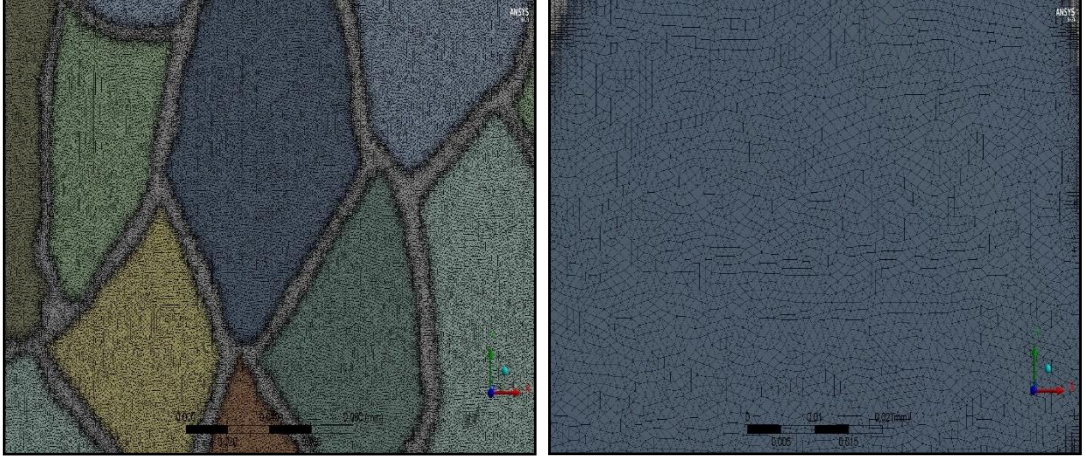
Görüntü analizi sonucu elde edilen veriler kullanılarak her bir numune için geometrinin modellenmesi yapılmıştır. Geometrinin modellenmesi yapılırken SEM görüntülerinden oluşacak hatayı minimize etmek için beyaz olarak görünen yerler her zaman katı polistiren olarak düşünülmeyp bazı kabuller yapılarak sınırlar değiştirilmiştir. Geometrinin boyutları alınan SEM görüntülerindeki ölçülere uygun olarak belirlenmiştir. Şekil 3.11'de 21 kg/m^3 yoğunluğa sahip numunenin geometrisinin modellenmiş resmi verilmiştir. Burada kapalı geometriler gözenekleri oluşturan hava, geriye kalan kısımlar ise EPS'nin hammaddesi polistirendir.



Şekil 3.11. 21 kg/m³ yoğunluktaki numunenin geometrisi

Sayısal analiz sonuçlarının doğruluğu oluşturulan ağ yapısının düzgün ve yeterli olmasıyla ilgilidir. Bazı durumlarda ağ yapısının gereksiz yere küçültülmesi yanlış sonuçlar alınmasına sebebiyet vermektedir. Tasarımı yapılan geometrilerin ANSYS programına aktararak ağ yapıları oluşturulmuştur. Oluşturulan geometrilere gözenekleri oluşturan hava ve gözenek dışında kalan polistirenin oluşturduğu bölgelerde üçgen elemanlar kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Şekil 3.12’de 21 kg/m³ yoğunluğa sahip numunenin ağ yapısı görülmektedir.

Her bir geometri için oluşturulan ağ yapısı farkı sayıda düğüm noktasında yapılarak sayısal sonuçların ağ yapısından bağımsız hale getirilmesi sağlanmıştır. Oluşturulan ağ yapısı mikro yapılar için 23,864-1,439,235 arasında değişen düğüm sayısı ve 29,105-2,624,171 hücre sayısı arasında çözümler gerçekleştirilmiştir. Tüm yoğunluk değerleri için aynı şekilde denemeler yapılarak optimum düğüm sayısının yaklaşık her yoğunluk değeri için 1,400,000 düğüm noktası sayısında olduğu belirlenmiştir.

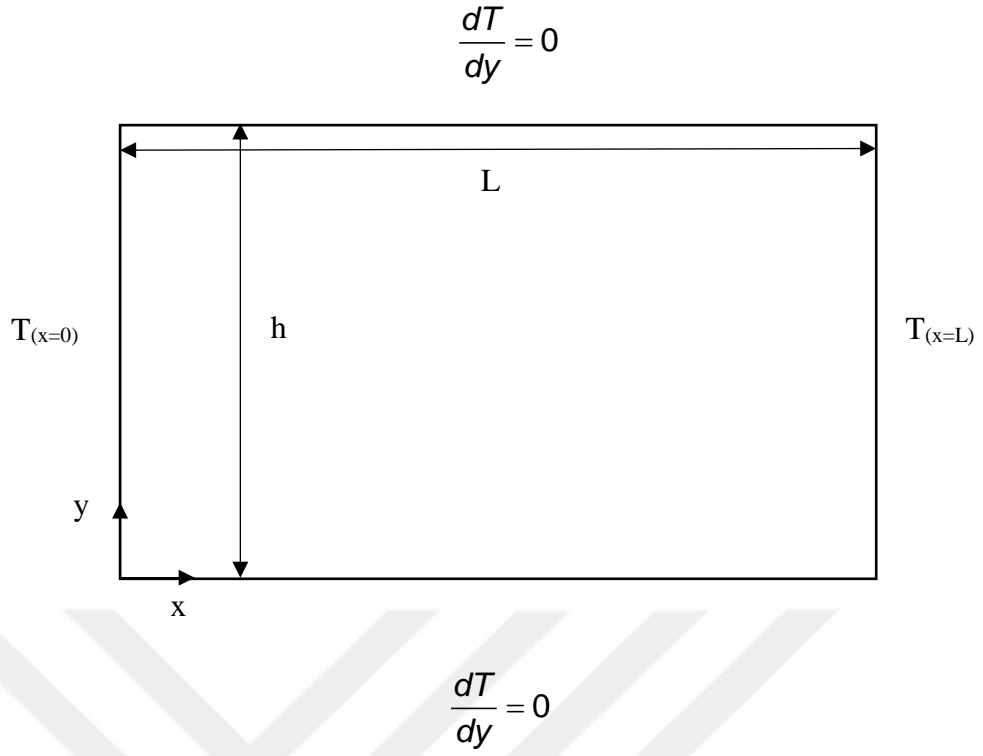


Şekil 3.12. 21 kg/m³ yoğunluktaki numunenin ağ yapısı

Ağ yapısının oluşturulmasından sonra sayısal çözümlerin yapılması için sınır koşullarının tanımlanması gerekir. Sınır şartları problemin çözülebilmesi için sınırlardaki çözüm noktaları için verilen cebirsel denklemlerdir. Sınır şartı verildiği forma göre 3'e ayrılır.

1. Dirichlet Sınır Şartı
2. Neumann Sınır Şartı
3. Karışık Sınır Şartı

Bu çalışmada dirichlet ve neumann sınır şartları verilmiştir. Tasarımı yapılan iki boyutlu geometrinin sol ve sağ duvar yüzeylerine sabit sıcaklık, alt ve üst duvar yüzeylerine yalıtım sınır şartı verilmiştir. Farklı doğrultuda gerçekleştirilen çalışma için üst ve alt duvarlara sabit sıcaklık, sağ ve sol duvarlara yalıtım sınır şartı verilmiştir. Ayrıca hava ve polistiren arasında kalan bölgeye duvar sınır şartı verilmiştir. Şekil 3.13 ve şekil 3.14'de sayısal çözüm için gerekli olan sınır şartları gösterilmiştir. Ortalama 283K, 293K, 303K ve 313K sıcaklık için efektif ısı iletkenliğinin sayısal olarak belirlenmesinde sol duvar sıcaklığı 318-288K arasında, sağ duvar sıcaklığı 308-278K arasında 10 K aralıklarla değişmektedir.



Şekil 3.13. Sayısal çözüm için Sınır Şartları

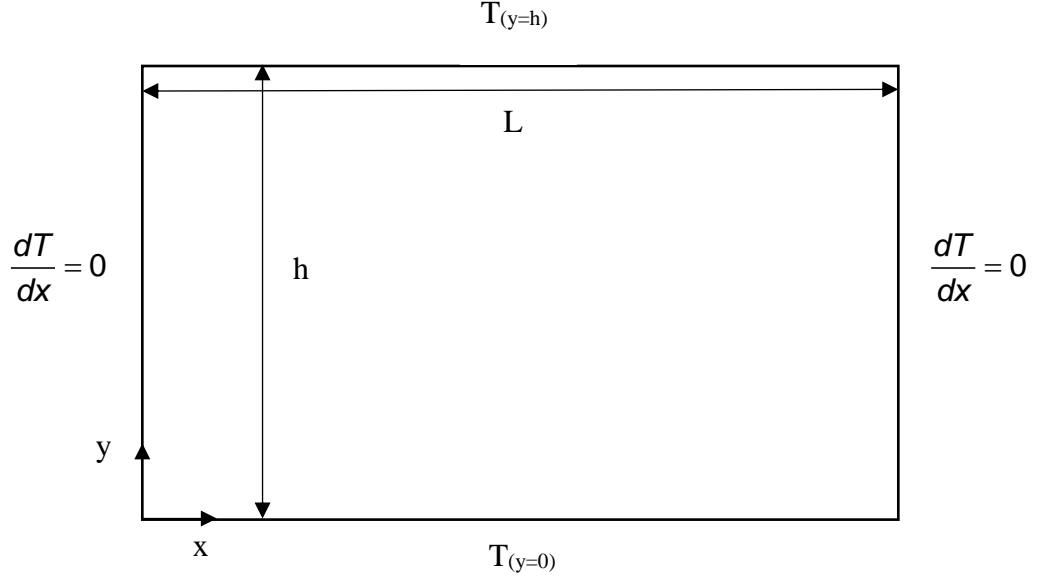
Sınır Koşulları;

1) $x = 0$, $0 \leq y \leq h$, $T_{(x=0)} = T_1 = 288K, 298K, 308K, 318K$

2) $x = L$, $0 \leq y \leq h$, $T_{(x=L)} = T_2 = 278K, 288K, 298K, 308K$

3) $y = 0$, $0 \leq x \leq L$, $\frac{dT}{dy}|_{y=0} = 0$

4) $y = h$, $0 \leq x \leq L$, $\frac{dT}{dy}|_{y=h} = 0$



Şekil 3.14. Sayısal çözüm için sınır şartları

Sınır Koşulları;

- 1) $y = h$, $0 \leq x \leq L$, $T_{(y=h)} = T_1 = 288K, 298K, 308K, 318K$
- 2) $y = 0$, $0 \leq x \leq L$, $T_{(y=0)} = T_2 = 278K, 288K, 298K, 308K$
- 3) $x = 0$, $0 \leq y \leq h$, $\frac{dT}{dx}|_{x=0} = 0$
- 4) $x = L$, $0 \leq y \leq h$, $\frac{dT}{dx}|_{x=L} = 0$

Karma malzemenin efektif ısı iletkenliğinin belirlenmesinde malzemeyi oluşturan polistiren ve havanın ısı iletkenlik değerinin ANSYS programında tanımlanması yapılmıştır. Hava ve polistiren için malzeme özellikleri kullanılırken sıcaklık ile değiştiği durumlar dikkate alınmıştır.

Hava için malzeme özelliklerinin sıcaklık ile değiştiği durumdaki değerleri çizelge 3.1'de verilmiştir[61]. Geriye kalan kısım olan polistiren için malzeme özelliklerinin sıcaklık ile değiştiği durumdaki değerleri çizelge 3.2'de verilmiştir[62].

Çizelge 3.1. Hava için malzeme özellikleri (1 atm) [61]

Sıcaklık (K)	Yoğunluk (kg/m³)	Özgül ısı (J/kg.K)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
278	1.269	1006	0.02401
283	1.246	1007	0.02439
288	1.225	1007	0.02476
293	1.204	1007	0.02514
298	1.184	1007	0.02551
303	1.164	1007	0.02588
308	1.145	1007	0.02625
313	1.127	1007	0.02662
318	1.109	1007	0.02699

Çizelge 3.2. Polistiren için malzeme özellikleri [62]

Sıcaklık (K)	Yoğunluk (kg/m³)	Özgül ısı (J/kg.K)	Isıl iletkenlik (W/m.K)
240	1071	998	0.1394
260	1060	1050	0.1453
280	1051	1140	0.1507
300	1041	1230	0.1558
320	1031	1310	0.1591
340	1021	1405	0.1616
360	1011	1500	0.1629

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Farklı yoğunluk değerine sahip (16 kg/m^3 , 21 kg/m^3 , 25 kg/m^3) EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği analitik, deneysel ve sayısal olarak belirlenmiştir. Ayrıca ısı iletkenliğe nemin etkisi de deneysel olarak incelenmiştir.

4.1. Analitik Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

Analitik olarak literatürdeki geliştirilen modellerin uygulanması için çalışmada kullanacağımız numunelerin içerisindeki bileşenlerinin karışım oranları ve ısı iletkenlikleri belirlenmiştir. Çizelge 4.1’de malzeme içerisindeki bileşenler için özellikler verilmiştir. Bileşenler için malzeme özellikleri ortalama 10°C sıcaklık için alınmıştır. Bileşen özelliklerinin belirlenmesinde sonra her bir model için çizelgedeki değerler kullanılarak teorik ısı iletkenlik değeri bulunur.

Çizelge 4.1. Karma malzeme içerisindeki bileşenlerin özellikleri

Yoğunluk (kg/m^3)	Gözenek malzemesinin ısı iletkenliği (W/m.K)	Gözenek malzemesinin hacim oranı	Ana malzemenin Isı iletkenliği (W/m.K)
16	0.02439	0.984	0.1507
21	0.02439	0.976	0.1507
25	0.02439	0.971	0.1507

Çizelge 4.2 incelendiğinde efektif ısı iletkenlik değerinin en çok paralel model ile uyum içinde olduğu görülmektedir. Bu modeller içinden maxwell ve diğer modellerde belli hata oranları dahilinde yakın bir değere sahip olduğu görüldüğü gibi

çok uyuşmayan değerlerinde elde edildiği görülmektedir. Ayrıca modellerde yoğunluğuna artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri de arttığı görülmektedir.

Çizelge 4.2. Analitik modeller için efektif ısı iletkenlik değeri (W/m.K)

Teorik Modeller	16 kg/m ³	21 kg/m ³	25 kg/m ³
Seri Model	0,02472	0,02489	0,02500
Paralel Model	0,02641	0,02742	0,02805
Geometrik Model	0,02511	0,02548	0,02571
Maxwell Modeli	0,02585	0,02659	0,02705
Lichtenecker Modeli	0,02511	0,02548	0,02571
Russel Modeli	0,02601	0,02671	0,02713
Rayleigh Modeli	0,14791	0,14653	0,14567
Efektif Ortam Teori Modeli	0,37463	0,37362	0,37301
Fricke ve Burgers Modeli	0,05118	0,06094	0,06618

4.2.Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğinin sıcaklığa ve yoğunluğa bağlı olarak değişimi deneysel olarak incelenmiştir.

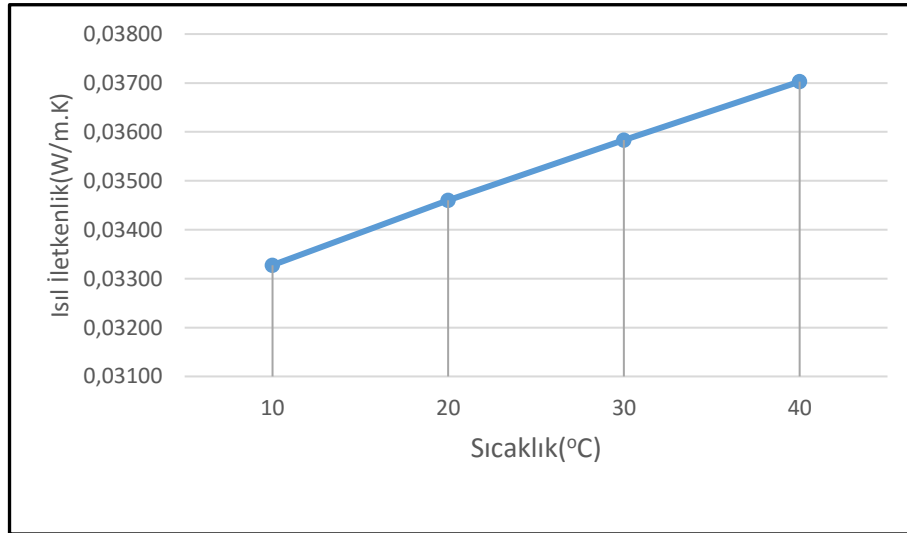
Kuru durumdaki ağırlık ölçümleri yapılarak yoğunluk değeri eşitlik 4.1 kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin kurutulduktan sonraki ağırlığına göre kuru yoğunluk değerleri çizelge 4.3’de verilmiştir. Burada, ρ_k kuru durumdaki numunenin yoğunluğunu(kg/m³), m_k kuru durumdaki numune kütlesini (kg), V_k kuru durumdaki numune hacmini (m³) göstermektedir.

$$\rho_k = \frac{m_k}{V_k} \quad (4.1)$$

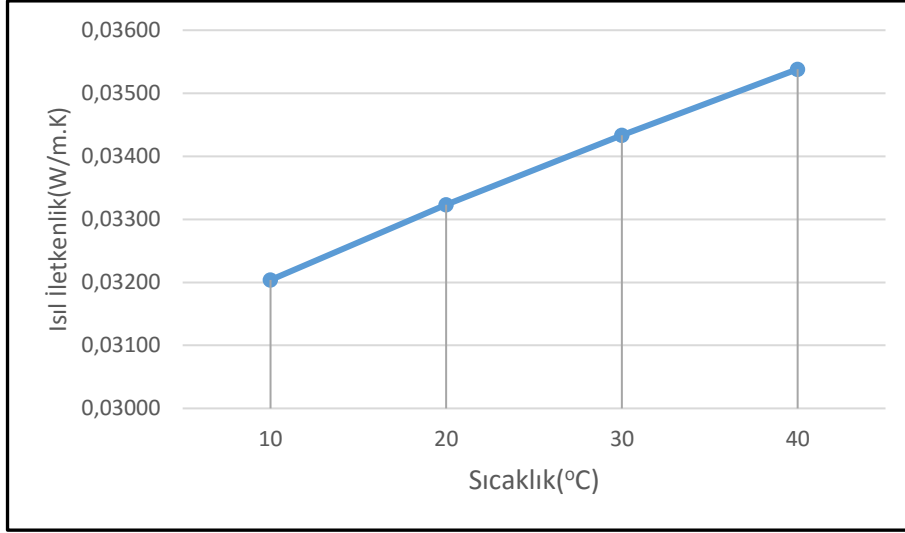
Çizelge 4.3. Kuru yoğunluk değerleri

Numuneler	Kuru yoğunluk(kg/m ³)
1	16,38
2	21,58
3	24,43

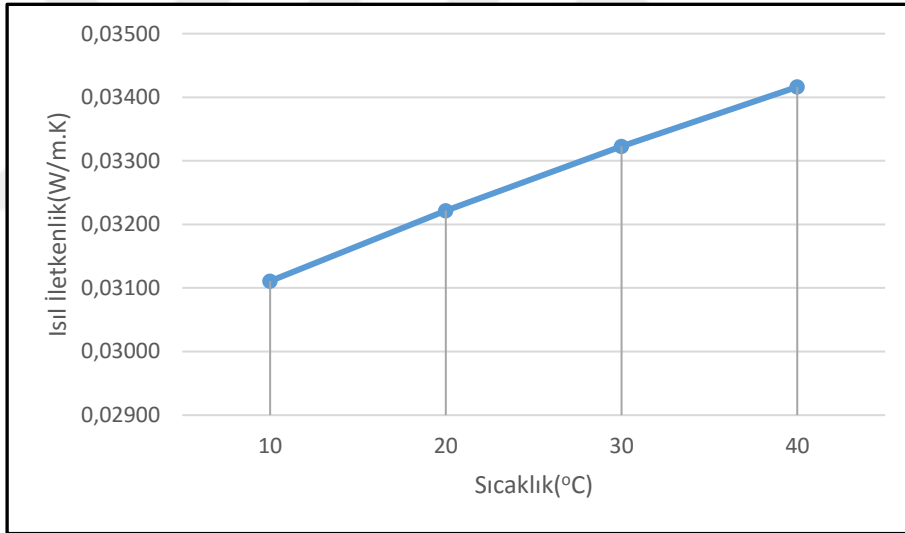
Kuru duruma getirilen numunelerin uygun koşullarda yoğunluk ve sıcaklığa bağlı olarak ısı iletkenlik değeri belirlenmiştir. Her yoğunluk değeri için ısı iletkenlik ortalama 10°C, 20°C, 30°C ve 40°C sıcaklıkta ölçülmüştür. Şekil 4.1, şekil 4.2 ve şekil 3.3’de çalışmada kullanılan kuru durumdaki EPS yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi verilmiştir. Burada görüldüğü gibi her yoğunluk değeri için sıcaklık arttıkça ısı iletkenlik değeri artmaktadır.



Şekil 4.1. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip numunenin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.2. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip numunenin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.3. 25 kg/m³ yoğunluğa sahip numunenin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi

Deneysel olarak ısı iletkenliğinin belirlenmesinde cihazdan ve birtakım etkilerden dolayı meydana gelen ölçüm belirsizleri dikkate alınarak farklı günlerde 5 ölçüm yapılarak ortalama bir değer kullanılmıştır.

Grafikler incelendiğinde EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişiminin doğrusal olduğu görülmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlar

kullanılarak kuru durumdaki farklı yoğunluklardaki EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğinin sıcaklıkla değişimi eşitlik 4.2, eşitlik 4.3 ve eşitlik 4.4 şeklinde doğrusal bir denklem ile ifade edilebilir.

$$k_{(16 \text{ kg/m}^3)} = 0,032062 + 0,000125 * T \quad (4.2)$$

$$k_{(21 \text{ kg/m}^3)} = 0,030962 + 0,000111 * T \quad (4.3)$$

$$k_{(25 \text{ kg/m}^3)} = 0,030136 + 0,000102 * T \quad (4.4)$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak her yoğunluk değeri için farklı sıcaklıklardaki ısı iletkenlik değeri yaklaşık olarak %0.1 gibi küçük bir hata oranı ile tespit edilebilir. Doğrusal denklem kullanılarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile karşılaştırması her numune için çizelge 4.4, çizelge 4.5 ve çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.4. Doğrusal denklem kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırması (16 kg/m³)

Sıcaklık (°C)	Isıl İletkenlik Değeri (Doğrusal Denklem Kul.)	Isıl İletkenlik Değeri (Deneysel)	Hata Oranı (%)
10	0.03331	0.03328	0.092548
20	0.03456	0.03460	0.109827
30	0.03581	0.03583	0.050237
40	0.03706	0.03703	0.086416

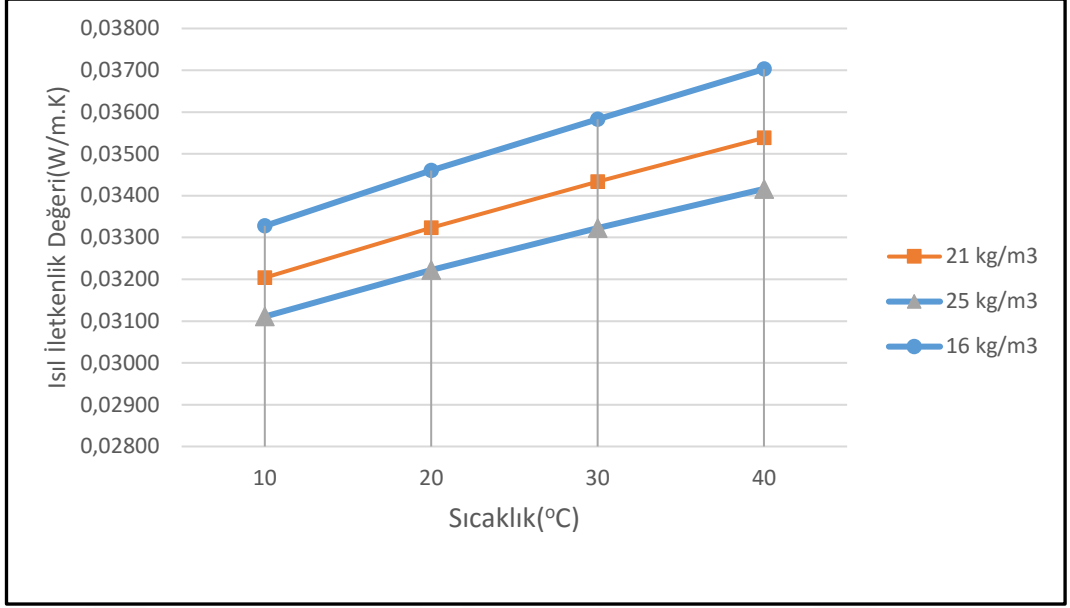
Çizelge 4.5. Doğrusal denklem kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değeri nin deneysel sonuçlar ile karşılaştırması (21 kg/m³)

Sıcaklık (°C)	Isıl İletkenlik Değeri (Doğrusal Denklem Kul.)	Isıl İletkenlik Değeri (Deneysel)	Hata Oranı (%)
10	0.03207	0.03204	0.099875
20	0.03318	0.03323	0.144448
30	0.03429	0.03433	0.110690
40	0.03540	0.03538	0.062182

Çizelge 4.6. Doğrusal denklem kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değeri nin deneysel sonuçlar ile karşılaştırması (25 kg/m³)

Sıcaklık(°C)	Isıl İletkenlik Değeri (Doğrusal Denklem Kul.)	Isıl İletkenlik Değeri (Deneysel)	Hata Oranı (%)
10	0.03116	0.03111	0.147862
20	0.03218	0.03222	0.136561
30	0.03320	0.03323	0.102317
40	0.03422	0.03416	0.163934

Farklı yoğunluktaki numuneler için yapılan incelemelerde ısı iletkenlik değeri nin yoğunluk arttıkça azaldığı görülmektedir. Şekil 4.4’de farklı yoğunluktaki numunelerin ısı iletkenliğinin farklı sıcaklıklar için değişimi verilmiştir.



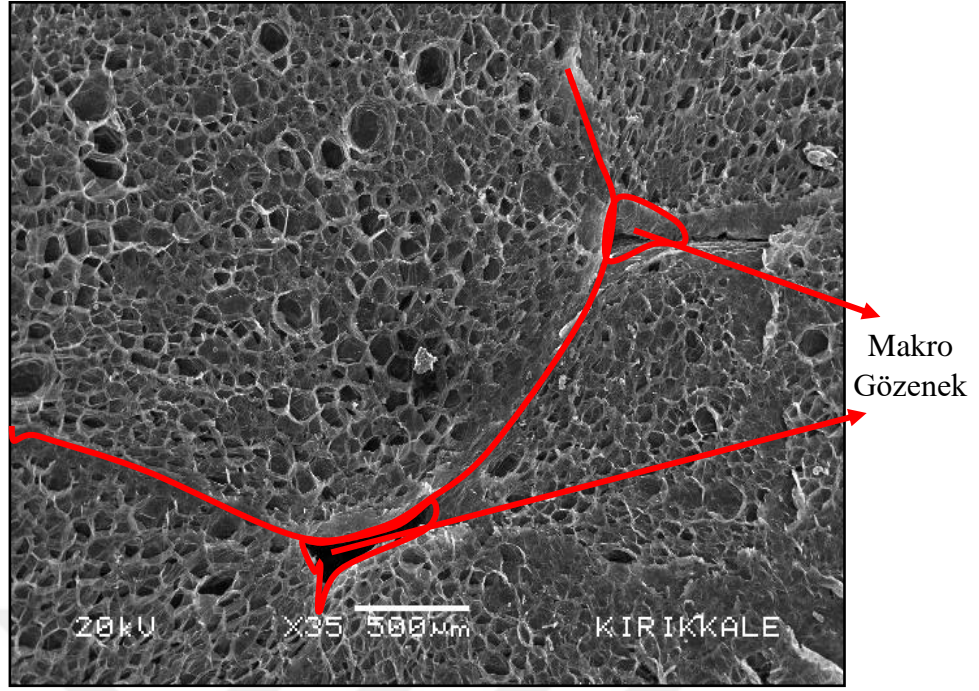
Şekil 4.4. Farklı yoğunluktaki numuneler için ısı iletkenliğinin değışimi

4.3. Sayısal Çalışmalardan Elde Edilen Bulgular

Farklı yoğunluk değeriindeki EPS yalıtım malzemesi için SEM görüntülerinin incelenmesi, modelleme, malzeme özellikleri ve sınır şartlarının tanımlanmasından sonra sayısal olarak çözümler yapılmıştır.

4.3.1. SEM Görüntüsünden Elde Edilen Bulgular

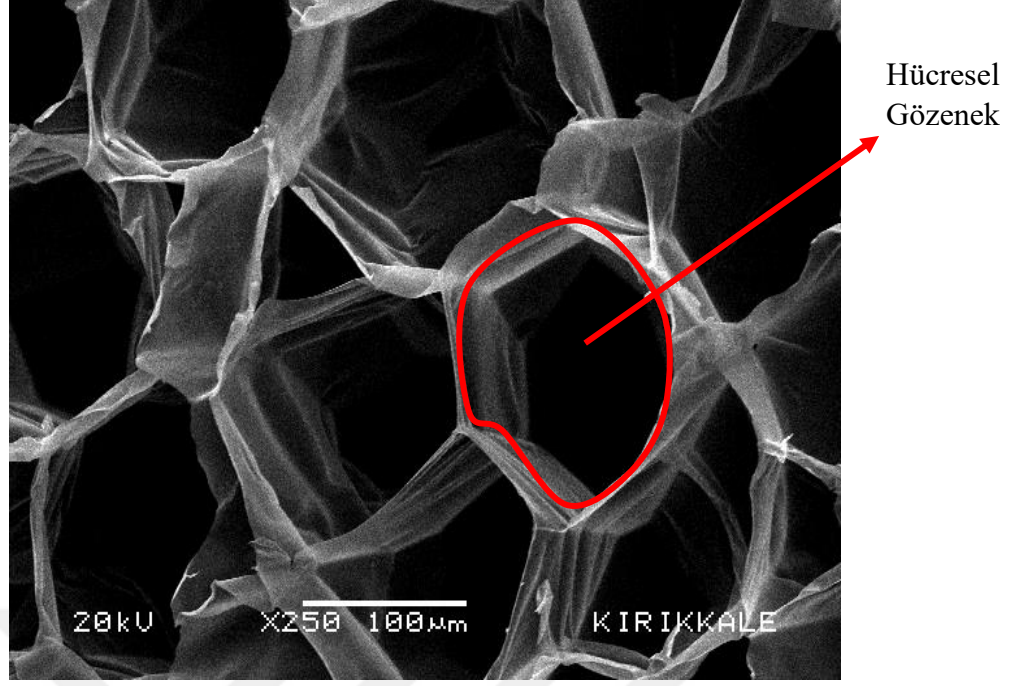
25 kg/m³ yoğunluk değeriine sahip olan numune için şekil 4.5’de verilen kaba bir büyütme oranındaki SEM görüntüsü alınarak malzemenin içyapısı hakkında fikir sahibi olunmuştur.



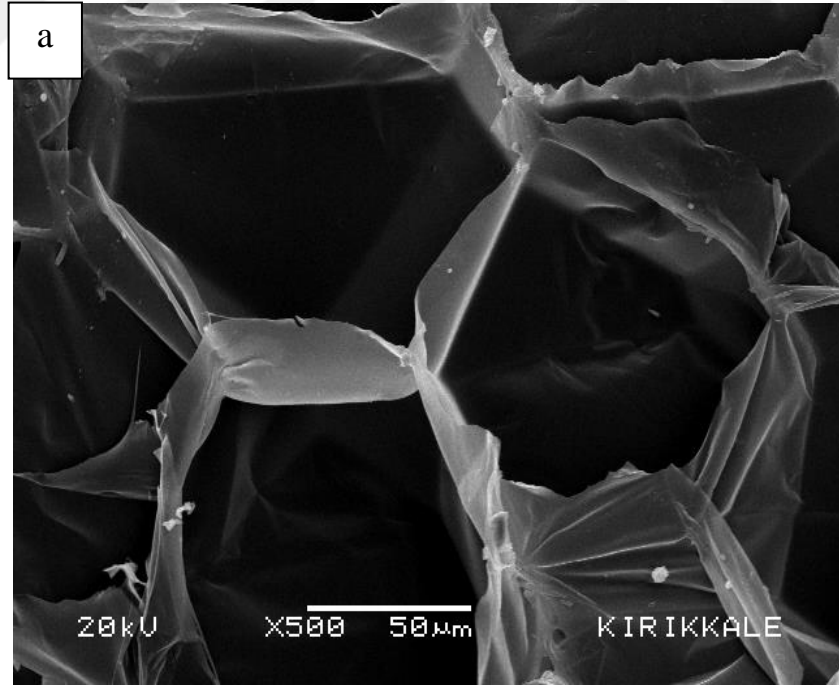
Şekil 4.5. 25 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS'nin X35 mikro yapı görüntüsü

EPS malzemesinin gözenek yapısının homojen olmadığı 2 farklı gözenekten oluştuğu şekil 4.5 ve şekil 4.6 incelendiğinde anlaşılmıştır. Bunlar şekil 4.5'de gösterilen düzensiz bir şekilde bağlantıları olan makro gözenekler ve şekil 4.6'da gösterilen küçük hücresel gözeneklerdir. Makro düzeyinde gözeneklerin incelenmesi halinde gözeneklilik oranının yaklaşık 4-10 % arasında olduğu, mikro düzeyde gözeneklilik ise yaklaşık olarak 97-99 % arasında olduğu bilinmektedir[23].

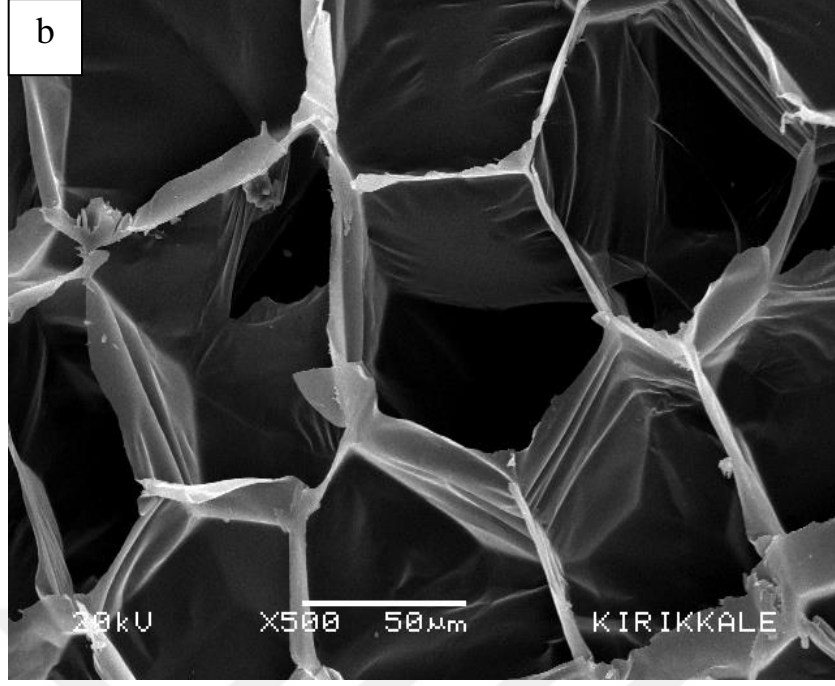
Malzeme içinde siyah olarak görünen kısımların hava, geriye kalan havayı çevreleyen beyaz kısımların polistiren olduğu görülmektedir. Bu ayrımı daha büyük yakınlaştırma yapılmış görüntülerde daha iyi anlayabiliriz. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi 2 boyutlu resim olmasından dolayı ışık düşen yerlerde polistiren olarak görünmektedir. Geometrinin oluşturulması sırasında bu noktada dikkatli olunarak doğru bir tasarımın yapılması oldukça önemlidir. EPS malzemesi için alınan diğer görüntüler ekte verilmiştir.



Şekil 4.6. 16 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS'nin X250 mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.7. 16 kg/m³ (a) ve 21(b) kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS'nin X500 mikro yapı görüntüsü

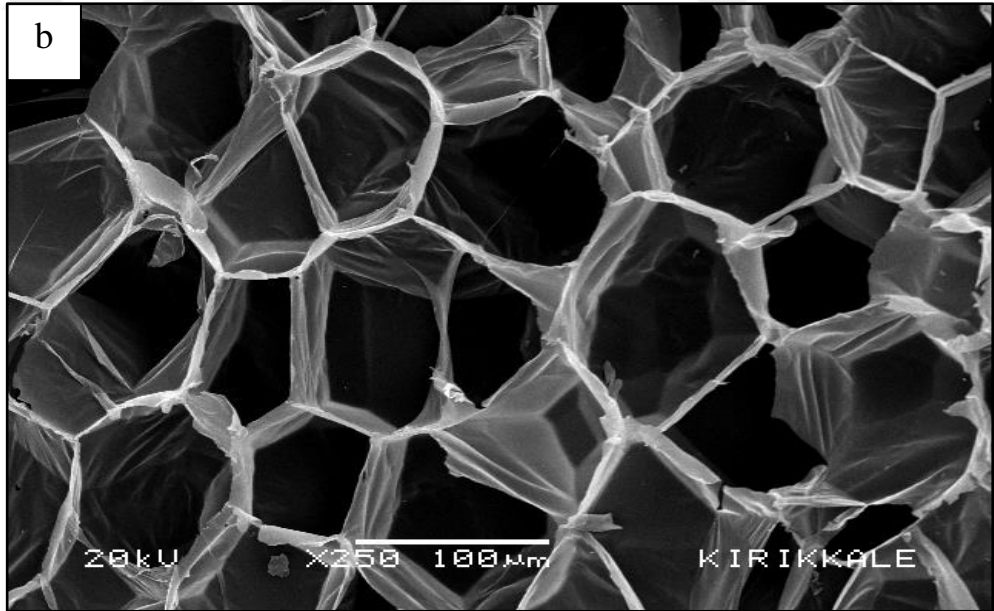
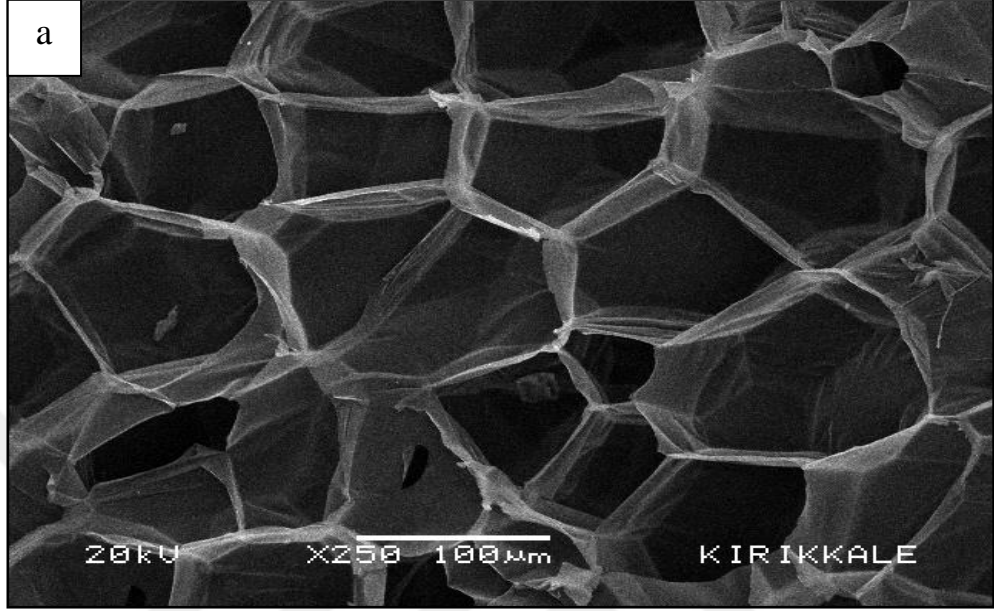


Şekil 4.7. (devam)

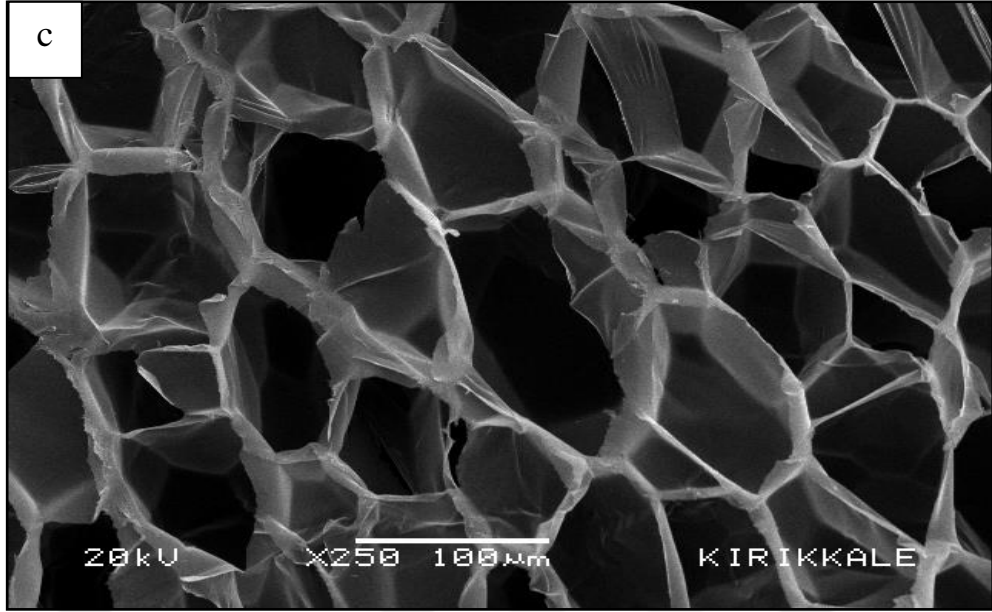
Malzemelerde gözenek oranının farklı olması numuneler arasında yoğunluk değerlerinde farklılık meydana getirmektedir. EPS malzemesinin farklı yoğunluk değerlerindeki içyapıları incelendiğinde gözenek boyutlarında ve gözeneklilik oranında farklılık olduğu görülmektedir. Genellikle EPS yalıtım malzemesinin mikro düzeyde gözenek hücre çapının 100-300 µm arasında değiştiği ve yoğunluğun artması ile gözenek çaplarının küçüldüğü bilinmektedir[22, 23]. Şekil 4.7 incelendiğinde literatürdeki çalışmalar ile paralel doğrultuda yoğunluk arttıkça gözenek boyutunun daha küçük olduğu görülmekte olup 16, 21 ve 25 kg/m³ yoğunluk değerindeki EPS malzemesi birçok SEM görüntüsü incelenerek sırasıyla ortalama gözenek çapları yaklaşık olarak 141 µm, 116 µm ve 95 µm olduğu belirlenmiştir.

Geometrinin oluşturulması için farklı büyütme oranlarında birçok SEM görüntüsü incelenmiştir. Modelin doğru ve kolay bir şekilde çizilebilmesi için hava ve polistiren ayrımının net bir şekilde görüldüğü tüm yoğunluk değerleri için X250 büyütme oranındaki görüntülerin kullanılmasına karar verilmiştir. Bu doğrultuda 2 boyutlu olarak şekil 4.8’de verilen görüntüler seçilmiştir. Görüntüler seçilirken iki faz

arasındaki ayrımın net olması modelin doğru oluşturulması açısından oldukça önemlidir.

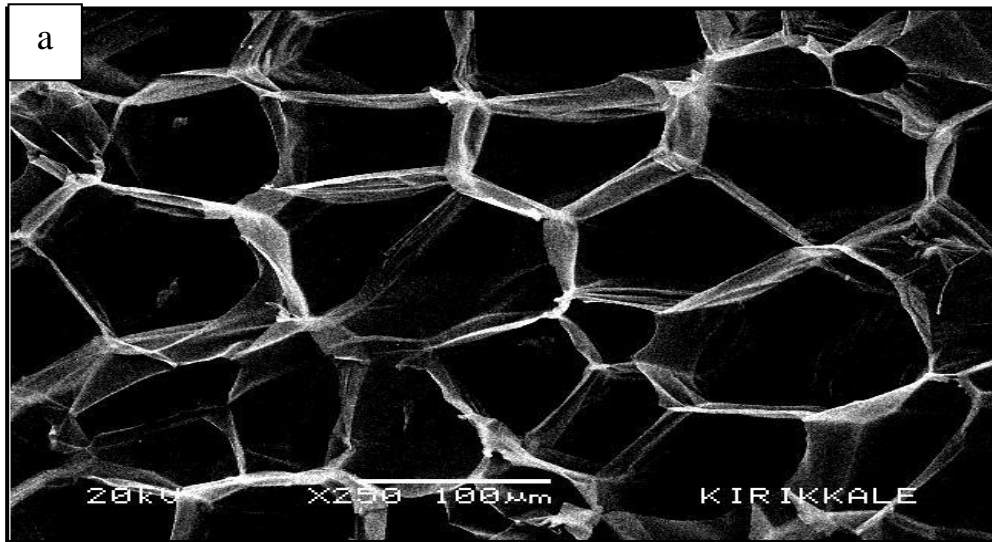


Şekil 4.8. 16 kg/m³ (a), 21 kg/m³ (b), ve 25 kg/m³ (c) yoğunluk değerine sahip EPS'nin X250 mikro yapı görüntüsü

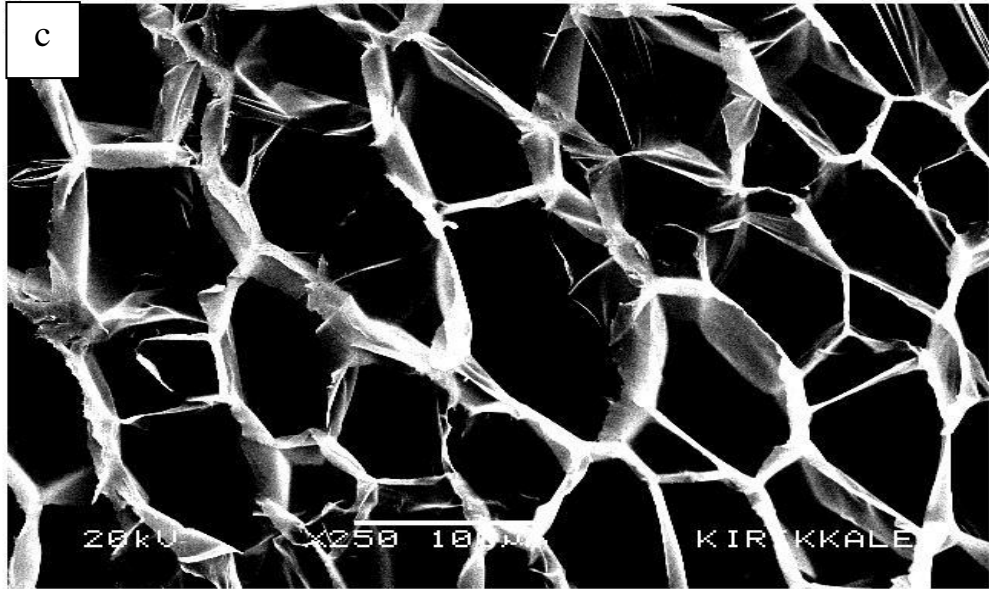
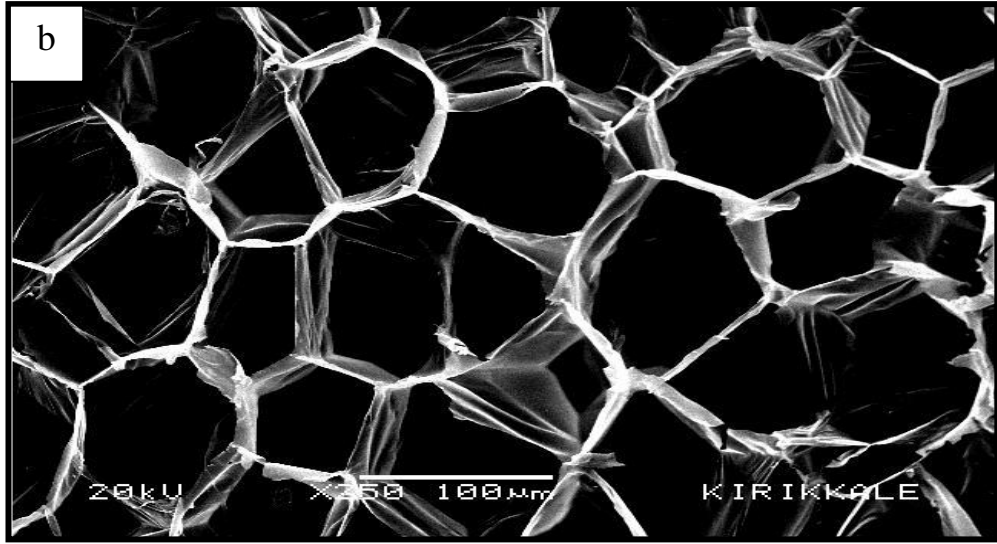


Şekil 4.8. (devam)

MATLAB programı aracılığıyla seçilen SEM görüntüleri için görüntü analizleri yapılmıştır. Şekil 4.9’da kullanılan SEM görüntülerinin görüntü analizleri sonucu elde edilen resimleri verilmiştir.



Şekil 4.9. 16 kg/m³ (a), 21 kg/m³ (b) ve 25 kg/m³ (c) yoğunluk değerine sahip numunelerin görüntü analizinden elde edilen resimleri



Şekil 4.9. (devam)

4.3.2. Sayısal Çözümde Elde Edilen Bulgular

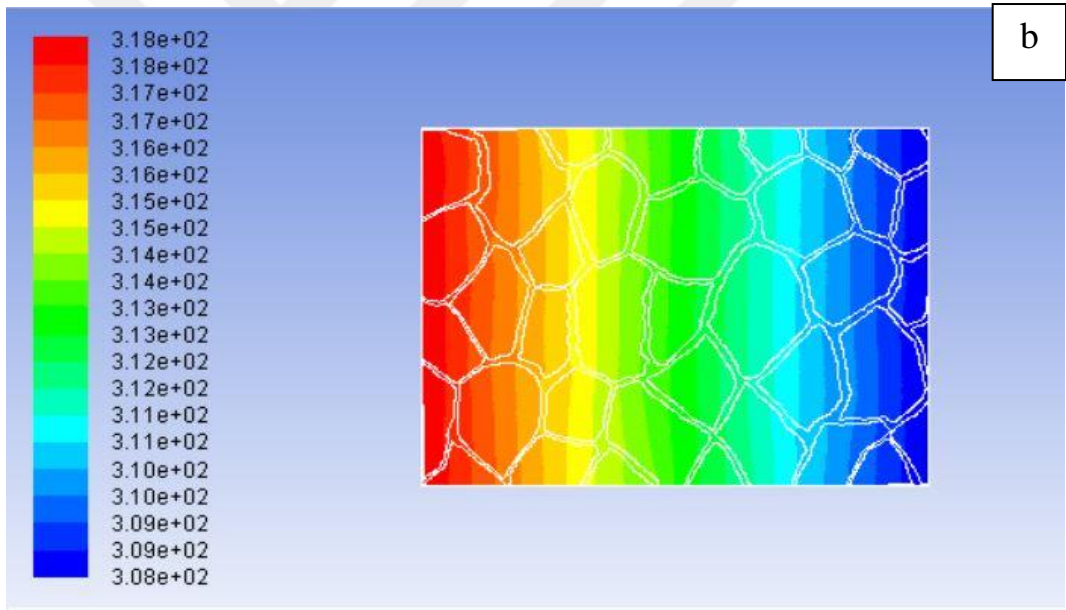
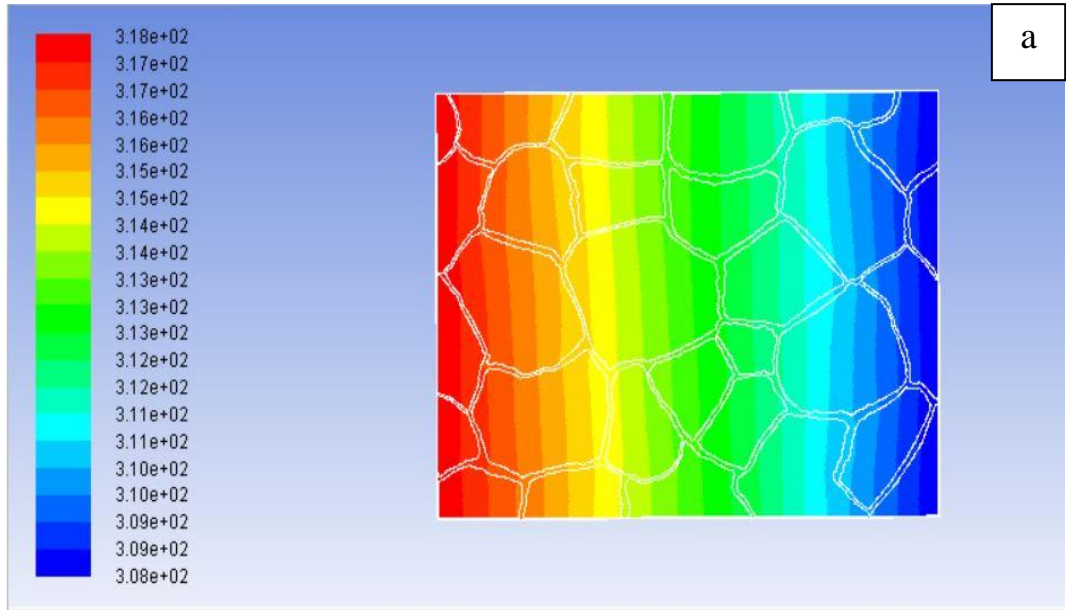
SEM görüntüleri kullanılarak elde edilen modellerin belirlenen sınır koşulları ve malzeme özellikleri ANSYS programına aktarılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.

Sayısal çözümler gerçekleştirilirken ısı transferinin sadece iletim ile olduğu düşünülmüştür. Isı iletim problemlerinde amaç ısı akısı veya sıcaklık dağılımının belirlenmesidir. Bu doğrultuda sabit yüzey sınır şartı kullanılarak çözüm düzleminde tek boyutta ortalama ısı akısı hesaplanmıştır. Isı akısının belirlenmesinden sonra Fourier'in ısı iletim denklemi kullanılarak ısı iletkenlik değeri sayısal olarak hesaplanmıştır.

$$k_{ef} = \frac{\ddot{q}.L}{\Delta T} \quad (4.5)$$

Burada \ddot{q} Ansys programında hesaplanan ortalama ısı akısını, ΔT numunelerin sol ve sağ duvarları arasındaki sıcaklık farkını, L ısı geçiş doğrultusundaki uzunluk olarak tanımlanmıştır.

Modellenen geometriler için ortalama 10° C, 20° C, 30° C ve 40° C sıcaklıklar için çözümler yapılmıştır. Çözümler sonucunda geçen ortalama ısı akısı miktarı belirlenerek eşitlik 4.5 yardımıyla efektif ısı iletkenlik değeri sayısal olarak her bir numune ve sıcaklık değeri için hesaplanmıştır. 16 ve 21 kg/m³ yoğunluk değerine sahip numuneler için x-doğrultusundaki sayısal çözümler sonucu sıcaklık dağılımı şekil 4.10'da verilmiştir. Malzemenin iç yapısının homojen dağılım göstermemesinden kaynaklı sıcaklık dağılımında dalgalanmalar meydana gelmiştir. Yoğunluk değerinin artması ile ısı iletkenliğinin azaldığı sıcaklık dağılımından görülmektedir. Modeller için y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı ekte verilmiştir.



Şekil 4.10. 16 kg/m³ (a) ve 21 kg/m³ (b) yoğunluktaki numunelerin sıcaklık dağılımı

EPS yalıtım malzemesi içerisinde bulundurduğu yüksek miktardaki hava oranı ile iyi bir yalıtım malzemesi olma özelliği taşımaktadır. İçerisindeki hava tanecikleri ile katı malzeme polistiren arasında taşınım ile ısı transferinin gerçekleşip gerçekleşmediğinin incelenmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda taşınım ile ısı geçişi

incelenirken çalışmaların mikro düzeyde olması nedeniyle hava hareketleri çok düşük hızlarda gerçekleşmektedir. Bunun nedeni olarak taşınım ile ısı transferinin önemli ölçüde gerçekleşmesi için yeterli bir mesafeye sahip olunması gerekmektedir. Eğer gözenek hücre çapının yaklaşık olarak 4 mm küçük olması halinde taşınım ile ısı geçişi ihmal edilmektedir[22]. Sonuç olarak ısı transferinin doğal taşınım ile çok küçük olması sebebiyle ihmal edilmesi sonuçların doğruluğu açısından hatalı bir kabul olmayacaktır.

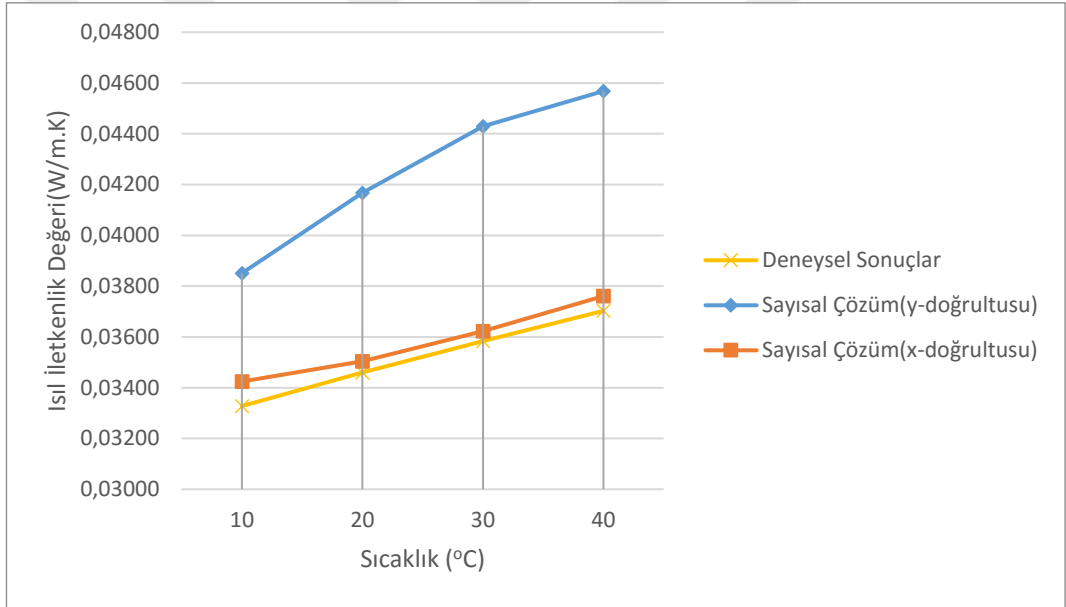
Sayısal analizler neticesinde x ve y doğrultularında hesaplanan efektif ısı iletkenlik değerleri çalışmada kullanılan numuneler için sırasıyla tablolar halinde ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması grafikler halinde aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.7. 16 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları (x-doğrultusu)

Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Isı Akısı (W/m ²)	Uzunluk (m)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Efektif Isıl İletkenlik Değeri (W/m. K)
10	728.569	4.70E-04	10	0.03424
20	745.446	4.70E-04	10	0.03504
30	770.785	4.70E-04	10	0.03623
40	800.148	4.70E-04	10	0.03761

Çizelge 4.8. 16 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları
(y-doğrultusu)

Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Isı Akısı (W/m ²)	Uzunluk (m)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Efektif Isıl İletkenlik Değeri (W/m. K)
10	1100.256	3.50E-04	10	0.03851
20	1190.457	3.50E-04	10	0.04167
30	1265.578	3.50E-04	10	0.04430
40	1305.124	3.50E-04	10	0.04568



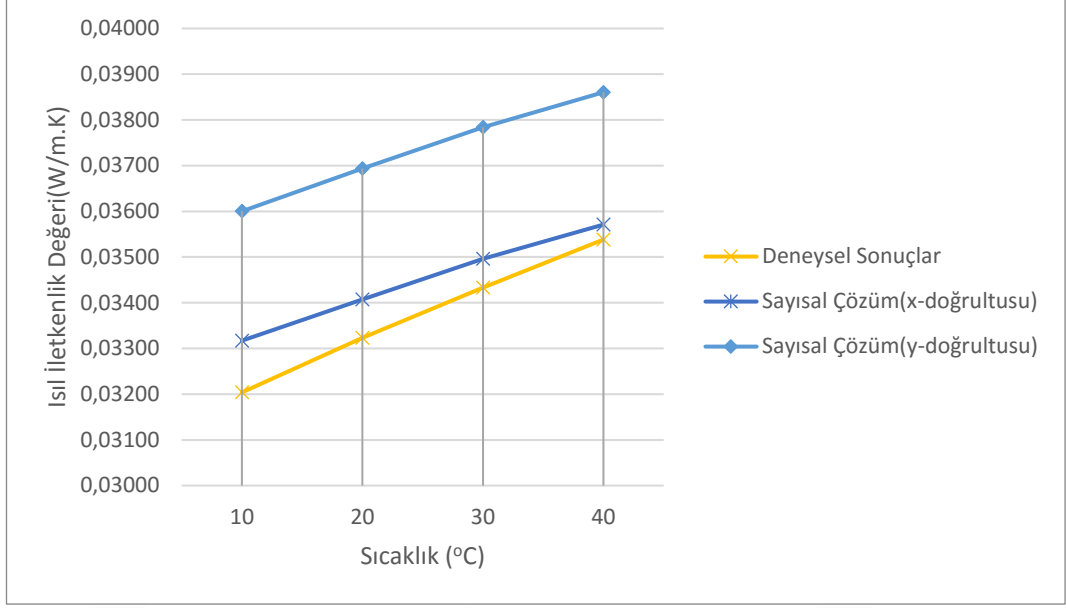
Şekil 4.11. 16 kg/m³ yoğunluktaki numune için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırması

Çizelge 4.9. 21 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları
(x-doğrultusu)

Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Isı Akısı (W/m ²)	Uzunluk (m)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Efektif Isıl İletkenlik Değeri (W/m. K)
10	705.730	0.47e-3	10	0.03317
20	724.935	0.47e-3	10	0.03407
30	743.859	0.47e-3	10	0.03496
40	759.697	0.47e-3	10	0.03571

Çizelge 4.10. 21 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları
(y-doğrultusu)

Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Isı Akısı (W/m ²)	Uzunluk (m)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Efektif Isıl İletkenlik Değeri (W/m. K)
10	1028.625	0.35e-03	10	0.03600
20	1055.359	0.35e-03	10	0.03694
30	1081.213	0.35e-03	10	0.03784
40	1102.980	0.35e-03	10	0.03860



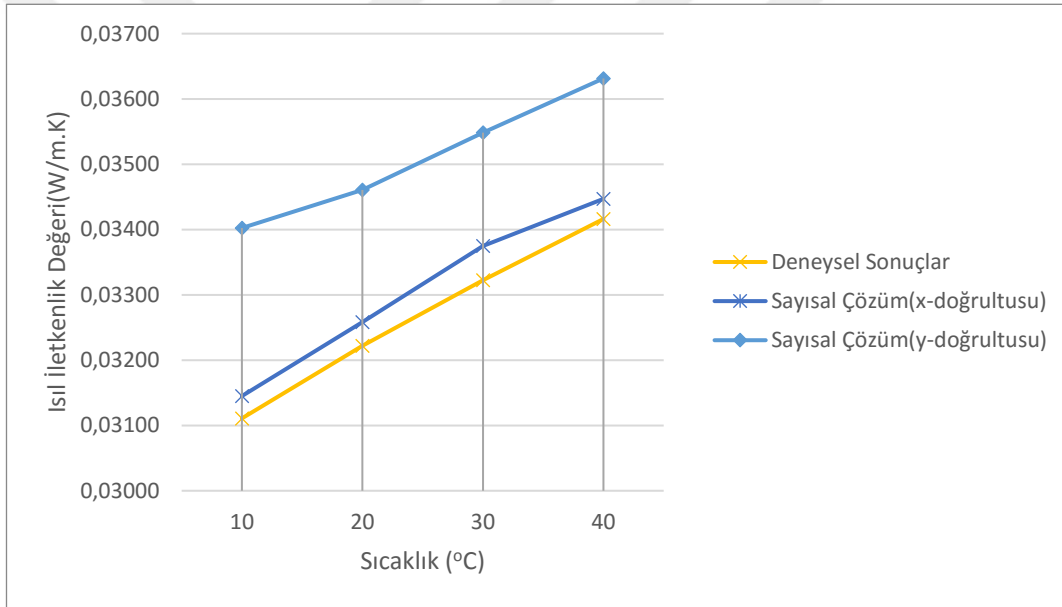
Şekil 4.12. 21 kg/m³ yoğunluktaki numune için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırması

Çizelge 4.11. 25 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları (x-doğrultusu)

Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Isı Akısı (W/m ²)	Uzunluk (m)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Efektif Isıl İletkenlik Değeri (W/m. K)
10	669.119	0.47e-3	10	0.03145
20	693.253	0.47e-3	10	0.03258
30	717.979	0.47e-3	10	0.03375
40	733.428	0.47e-3	10	0.03447

Çizelge 4.12. 25 kg/m³ yoğunluk değerine sahip EPS için sayısal çözüm sonuçları (y-doğrultusu)

Ortalama Sıcaklık (°C)	Ortalama Isı Akısı (W/m ²)	Uzunluk (m)	Sıcaklık Farkı (ΔT)	Efektif Isıl İletkenlik Değeri (W/m. K)
10	972.106	0.35e-03	10	0.03402
20	988.796	0.35e-03	10	0.03461
30	1013.777	0.35e-03	10	0.03548
40	1037.532	0.35e-03	10	0.03631



Şekil 4.13. 25 kg/m³ yoğunluktaki numune için sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırması

Yukarıda verilen tablolar incelendiğinde sayısal olarak belirlenen ısı iletkenlik değerinin deneysel çalışmalarda olduğu gibi sıcaklık arttıkça arttığı görülmektedir. Ayrıca yoğunluğun artması ile ısı iletkenliğinin azaldığı sonuçlar incelendiğinde görülmektedir.

Sayısal çözümler gerçekleştirilirken modellenen geometrilerin gözeneklilik oranı malzemenin gerçekteki değerinden farklıdır. Gerçek koşullarda bir tahmin yapabilmek için gözeneklilik değerlerine göre bir düzeltme faktörü modellerin hepsi için tanımlanmıştır. Belirlenen düzeltme faktörüne göre ısı iletkenlik değerleri gözenekliliğin artması ile azaltılmıştır. Çizelge 4.13’de tasarımı yapılan modellerin gözeneklilik değerlerini ve olması gereken gözenek oranlarını göstermektedir.

Çizelge 4.13. Gerçek ve sayısal gözenek oranları

Yoğunluk (kg/m ³)	Sayısal Model Gözeneklilik Oranı	Gerçek Gözeneklilik Oranı	Düzeltilme Faktörü
16	0.90	0.984	1.09
21	0.89	0.976	1.09
25	0.88	0.971	1.10

Sayısal sonuçlar ile belirlenen ısı iletkenlik değerleri düzeltme faktörleri kullanılarak yeniden düzenlenerek çizelge 4.14 ve çizelge 4.15’de verilmiştir.

Çizelge 4.14. Düzeltme faktörü kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değerleri

(x-doğrultusu) (W/m.K)

Ortalama Sıcaklık (°C)	16 kg/m ³	21 kg/m ³	25 kg/m ³
10	0.03141	0.03043	0.02859
20	0.03215	0.03126	0.02961
30	0.03323	0.03207	0.03068
40	0.03450	0.03276	0.03133

Çizelge 4.15. Düzeltme faktörü kullanılarak belirlenen ısı iletkenlik değeri (y-doğrultusu) (W/m.K)

Ortalama Sıcaklık (°C)	16 kg/m ³	21 kg/m ³	25 kg/m ³
10	0.03533	0.03303	0.03093
20	0.03823	0.03389	0.03146
30	0.04064	0.03472	0.03225
40	0.04191	0.03541	0.03301

4.4. Farklı Nem Oranının Isıl İletkenliğe Etkisinden Elde Edilen Bulgular

Binalarda enerji kayıplarını azaltmak için tek başına düşük ısı iletkenliğe sahip yalıtım malzemesi seçimi yeterli değildir. Malzemelerin yapısına göre nemin depolanması veya transferi sırasında ısı iletkenlik değeri değişimlerin olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmalarda tuğla[63], gazbeton[64], kireç esaslı karışımlar[65] ve ısı yalıtım malzemelerinin[29, 30, 66] ısı iletkenlik değeri nemin etkisiyle kuru durumdaki değerlerine göre ciddi artışların olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle enerji ile ilgili yapılan hesaplamalarda nemin ısı transferine etkisi veya malzemenin ısı geçirgenliği üzerinde meydana getirdiği değişimleri ihmal etmek uygun bir yaklaşım olmayabilir.

EPS malzemesinin kuru duruma göre nem içeriği belirlenerek ısı iletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

TS EN 12087 standardına göre ilk 10 saniye boyunca almış olduğu su miktarı aşağıdaki bağıntı kullanılarak belirlenirse;

$$\frac{m_1 - m_0}{A_p} \leq 0.5 \text{ kg/m}^2 \text{ ise ilgili standarttaki 2B yöntemi kullanılacaktır.}$$

$$\frac{m_1 - m_0}{A_p} \geq 0.5 \text{ kg/m}^2 \text{ ise standarttaki 2A yöntemi kullanılacaktır.}$$

Burada m_1 tamamen daldırmanın 10 s sonrasında numunenin kütlesi, kg; A_p numunenin su ile temas ettiği yüzey alanı, m²; m_0 kuru durumdaki numunenin kütlesi, kg. Çizelge 4.16'da 10 s sonrasında numunelerin kütlesi ve kuru durumdaki numunelerin kütlesi verilmiştir.

Çizelge 4.16. 10 saniye sonrasında numune kütleleri

Yoğunluk (kg/m ³)	m_1 (kg)	m_0 (kg)	$\frac{m_1 - m_0}{A_p}$ (kg/m ²)
16	0.04954	0.02947	0.223
21	0.05748	0.03884	0.207
25	0.06101	0.04396	0.189

Yapılan ölçümler sonucunda TS EN 12087 standardında belirtilen 2B yönteminin geçerli olduğu tespit edilmiştir.

Numunelerin uzun süreli tam daldırma sonucu hacimce su emme oranları (kuru duruma göre nem içeriği) eşitlik 4.6 ile hesaplanır.

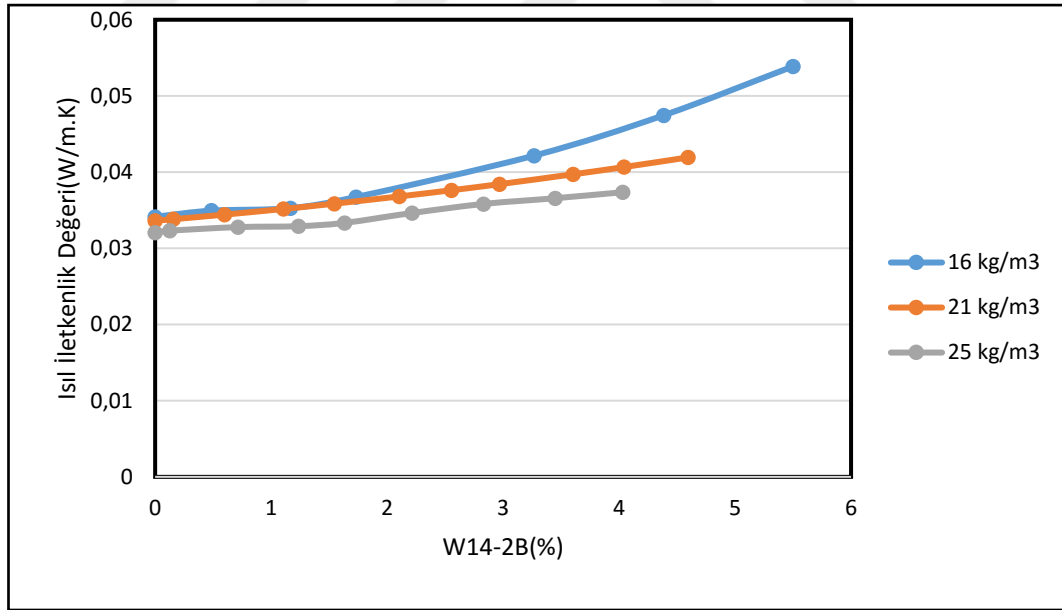
$$W_{2B} = \frac{m_{14} - m_1}{V} \cdot \frac{100}{\rho_w} \quad (4.6)$$

Burada m_{14} 14 gün boyunca tam daldırma sonucunda numunenin kütlesi, kg; m_0 kuru durumdaki numunenin kütlesi, kg; V numunenin ilk hacmi, m³; ρ_w suyun yoğunluğu, kg/m³.

14 gün boyunca tamamen daldırma işlemi sonunda doymuş nem içeriği belirlenmiş olup 16 kg/m³ yoğunluğa sahip numune için hacimce $W_{doy} = \%5,5$, 21 kg/m³ yoğunluğa sahip numune için hacimce $W_{doy} = \%4,6$, 25 kg/m³ yoğunluğa sahip

numune için hacimce $W_{\text{doy}} = \%4$ olarak belirlenmiştir. TS EN 13163 standardında belirtildiği üzere EPS malzemesi için hacimce su emme oranının $\%5$ değerinin altında olması gerektiği bilinmektedir. Çalışmada elde edilen değerlerin bu bilgiyi doğruladığı görülmüştür. Fakat yine de $\%5$ 'in üzerinde hacimce su emme oranları olabileceği gibi aynı yoğunluk değerindeki farklı numunelerinde farklı hacimce su emme oranlarına sahip olabileceği yapılan çalışmalarda görülmüştür[31, 67].

Sırasıyla doymuş nem içeriklerinde EPS malzemesinin ısı iletkenlik değeri farklı yoğunluklar için $k_{(16 \text{ kg/m}^3)} = 0.05383 \text{ W/m.K}$, $k_{(21 \text{ kg/m}^3)} = 0.04192 \text{ W/m.K}$, $k_{(25 \text{ kg/m}^3)} = 0.03736 \text{ W/m.K}$ olarak belirlenmiştir. Doymuş nem içeriğindeki numuneler doğal ortamda kontrollü bir şekilde bırakılarak farklı nem içeriğinde malzemenin sahip olduğu ısı iletkenlik değeri belirlenmiştir. Şekil 4.14'de farklı nem içeriklerinde farklı yoğunlukta EPS malzemesinin sahip olduğu ısı iletkenlik değerlerinin ortalama 10°C sıcaklıktaki değişimi verilmiştir.



Şekil 4.14. Farklı nem içeriklerinde ısı iletkenliğinin değişimi

5. SONUÇLAR

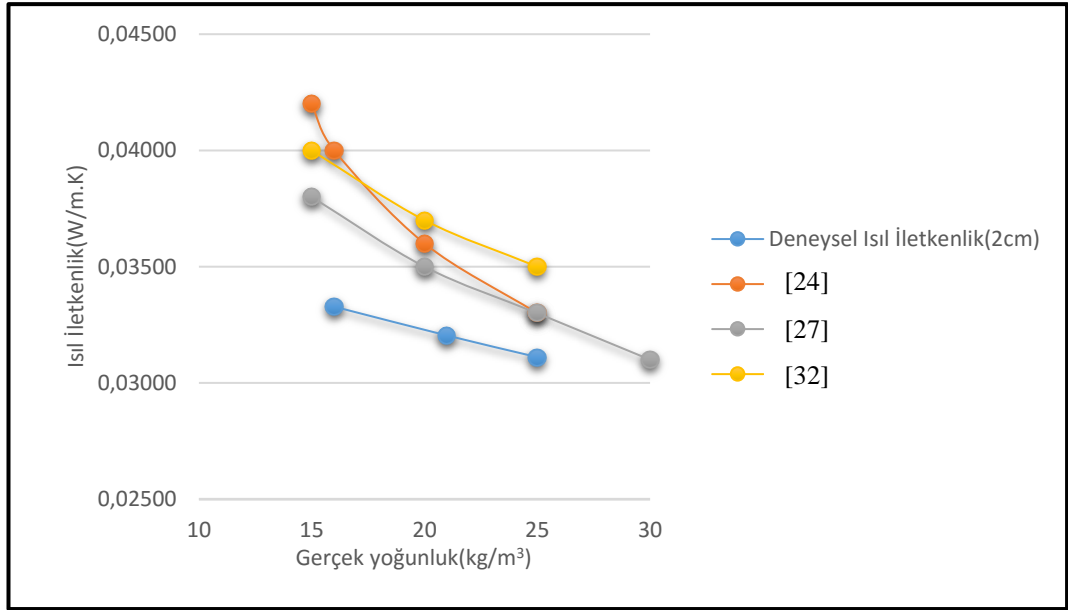
Enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılan yalıtım malzemelerinin mühendislik uygulamalarında tercih edilmesinin gerekçeleri sahip oldukları ısı özellikleri ile yakından ilgilidir. Enerji kayıplarının azalmasında malzemeler için önemli bir parametre olan ısı iletkenlik değerinin hangi parametrelere göre değiştiğinin bilinmesi önemli bir olgudur. Yapılan araştırmalar sonucunda gözenekli yapıya sahip malzemeler için ısı iletkenlik değerinin gözeneklerin dağılımı, gözenek boyutu ve gözenek oranına bağlı olarak değiştiği bilinmekte olup EPS malzemesi için yeterince çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca su emme miktarının belirlenmesi ve farklı nem içeriklerinde EPS malzemesinin ısı iletkenliğinin nasıl değiştiğinin bilinmesi etkin bir yalıtımın sağlanması açısından önemlidir. Bu çalışma kapsamında piyasada oldukça çok tercih edilen içerdiği yüksek gözenek içeriği sayesinde ısı iletkenlik değerini düşüren EPS yalıtım malzemesi kullanılmıştır.

Farklı yoğunluktaki (16, 21 ve 25 kg/m³) EPS malzemesinin SEM görüntüleri incelenerek iç yapısı belirlenmiş olup, farklı yoğunlukta hücresel gözenek boyutlarındaki değişim belirlenmiştir. Ayrıca SEM görüntülerinden yararlanarak bilgisayar ortamında modellenmesi yapılarak sayısal olarak efektif ısı iletkenliği farklı sıcaklıklarda tespit edilmiştir. EPS malzemesinin gözeneklilik oranı hakkında elde edilen bilgiler literatürde yapılan çalışmalar ile sınırlıdır. Literatürde EPS malzemesinin mikro düzeyde gözenek oranının yaklaşık 97-99% değerleri arasında değiştiği belirlenmiş olup, yoğunluğun artması sonucu gözenek miktarının azalacağı tespit edilmiştir[22, 23]. Bu doğrultuda gözenekleri oluşturan hava miktarının azalması sonucu ısı iletkenlik değerinin artması beklenir. Fakat burada tam tersi bir durum söz konusudur. Bunun nedeni malzeme yapısındaki dağılım ve hücresel gözeneklerin boyutlarıdır. Her bir yoğunluk değeri için farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen analizler sonucunda bilindiği üzere ısı iletkenlik değerinin sıcaklık arttıkça yükseldiği görülmüştür. Sayısal çalışmaların yapılması sırasında geometrinin modellenmesi, ağ yapıları, sınır koşulları ve uygun malzeme özelliklerinin belirlenmesi çok önemli bir konudur. Burada yapılacak hatalar sayısal çalışmanın doğruluğunu etkileyecektir. Geometrinin modellenmesi sırasında yapılan kabuller, sınırların net

olarak belli olmaması ve iki boyutlu bir düzlemde yapılan çalışmalar sayısal sonuçların hata nedenleri olarak gösterilebilir. Çünkü EPS malzemesi kabuk yapısı gereği çift katmanlı bir yapıya sahip olup gözeneklerinin duvar kalınlıkları bile ısı transferine katkıda bulunmaktadır. Yani aynı yoğunlukta ve yaklaşık aynı hücresel gözenek çapına sahip malzemelerin ısı iletkenlik değerleri farklı olabilmektedir. Isı transfer mekanizmaları dikkate alındığında mikro düzeyde gerçekleştirilen çalışmalar için hava hareketlerinin $10e-25$ m/s mertebelerinde olmasından dolayı taşınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Sayısal çözümlerde iki bileşende katı gibi düşünülerek iletim ile ısı transferi dikkate alınarak çözümler yapılmıştır.

Deneysel çalışmalarda sayısal çalışmalarda incelenen farklı yoğunluktaki numuneler için öncelikle kurutma işlemi yapılmış ve daha sonra belirlenen ısı akış ölçme metodu doğrultusunda TS 8301 standardında ölçüm yapan Fox 314 ısı iletkenlik ölçüm cihazında farklı ortalama sıcaklıklar için deneysel ölçümler yapılmıştır. Deneysel ölçümlerin yapılması sırasında ölçüm cihazı için uygun ortam koşullarının sağlanması ve cihazın kalibre edilmiş olması çok önemlidir. Bu şartlar altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda ısı iletkenlik değerinin farklı sıcaklıklardaki değerleri farklı yoğunluklar için tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar ile de ısı iletkenlik değerinin EPS malzemesi için yoğunluk arttıkça azaldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalarda yoğunluğun artması sonucu ısı iletkenlik değerinin azalması sayısal çalışmalarda olduğu gibi gözeneklerin dizilimi, kabuk yapısı, gözenek boyutlarının küçülmesi sonucu taşınım ile ısı transferinin azalması ile açıklanabilir[68].

Literatürde yapılan çalışmalarda EPS malzemesi için genellikle 5 cm kalınlığındaki numuneler için ısı iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Aynı kalınlıkta farklı üretici firmalardan alınan malzemelerde bile ısı iletkenlik değerinde farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıkların üretim aşamasındaki işlemlerden meydana gelebileceği düşünülmektedir. Şekil 5.1'de ortalama 10^0C sıcaklıkta EPS malzemesi için ısı iletkenliğinin yoğunluğa göre değişimi yapılan çalışmalardaki sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



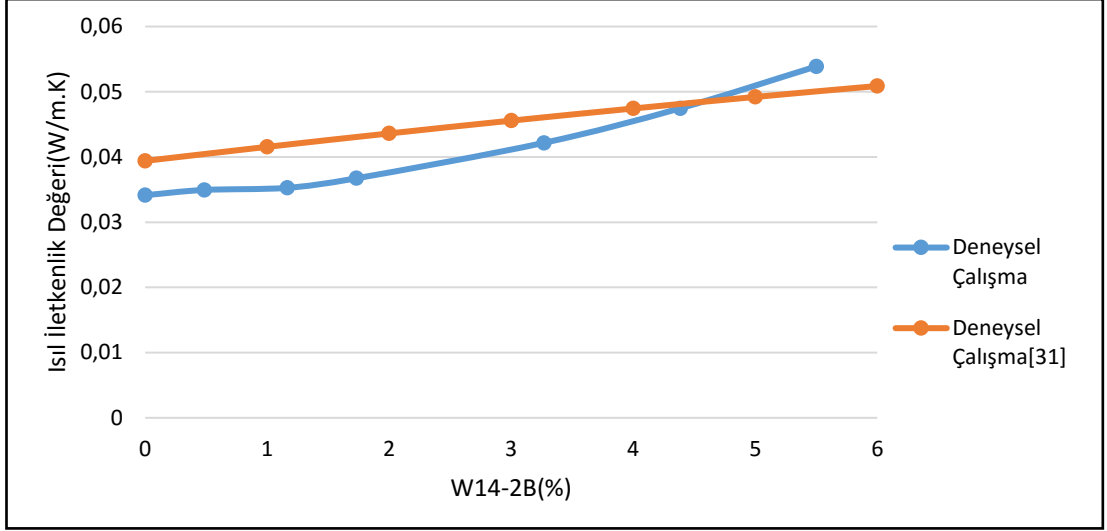
Şekil 5.1. Isıl iletkenliğin yoğunluğa göre değişiminin literatür çalışmaları ile karşılaştırılması ($T_{ort}=10^{\circ}C$)

Deneysel çalışmalar ile sayısal çalışmaların birbiriyle karşılaştırması yapılırken bir noktada dikkat edilmesi gerekir. Sayısal çalışmalar mikro düzeyde malzemenin bir bölümünde gerçekleştirilmiştir. Malzeme genelinde homojen bir dağılım olmaması ve dizilimin değişmesi deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bir hata meydana getirmiştir. Deneysel ve sayısal ısı iletkenlik değerlerinin birbiriyle yaklaşık 1-4% hata oranıyla çakıştığı belirlenmiştir. Gerçekçi yaklaşımlar yapabilmek için x ve y doğrultularındaki ısı iletkenlik değerleri belirlenerek ortalama bir ısı iletkenlik değeri kullanılabilir. Sayısal modellemede malzeme gerçek gözenek oranlarına ulaşmadığı için bir düzeltme faktörü kullanılarak daha doğru olabilecek ısı iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Ayrıca geometrinin doğru bir şekilde modellenememesi, gerçek koşulların analiz programında tam olarak sağlanamaması ve iki boyutta gerçekleştirilen sayısal çalışmalardan dolayı meydana geldiği düşünülmektedir. Yine de deneysel çalışmaların yanında sayısal çalışmaların yapılması bize malzemenin yoğunluğunun değişmesi sonucu ısı iletkenliğinin neden azaldığı konusunda fikir sahibi olmamızı sağlamıştır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmaları özetleyecek olursak gözenekli yalıtım malzemesi EPS için ısı iletkenlik değeri hücresel gözenek boyutlarına, bileşenlerin sıcaklık ile ısı özelliklerinin değişimine, gözeneklerin

dizilimi ve yapısına bağı olduğu tespit edilmiştir. Isıl iletkenliğin azaltılması adına bu parametreler dikkate alınarak iyileştirmeler yapılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca sayısal yöntemler ile deneysel çalışmalar yapmadan bir malzeme için tahmini ısı iletkenlik değeri belirlenebilir.

Yalıtım malzemelerinde diğere bir önemli parametrenin nem olduğu, ısı iletkenliği önemli ölçüde değıştirdiğı belirlenmiştir. Bu doğrultuda TS EN 12087 standardında uzun süreli tam daldırma sonucun farklı yoğunluktaki EPS malzemeleri için doymuş nem içerikleri belirlenmiştir. Daha sonra kontrollü bir şekilde kurumaya bırakılarak farklı nem içeriklerinde ısı iletkenlik değeri belirlenmiştir. Nem oranının artması ile birlikte ısı iletkenlik değerin arttığı kuru duruma göre yaklaşık olarak sırasıyla 16, 21 ve 25 kg/m³ yoğunluk değeriindeki EPS malzemesi için %61, %30 ve %20 oranında ısı iletkenliğin artması söz konusudur. Gözeneklerinin yüksek orandaki miktarının kapalı gözenekli olması su emme miktarının az olacağını gösterir[69]. Bu doğrultuda en çok su emme miktarının düşük yoğunluklu malzemede olduğu, bu yüzden düşük yoğunluklu malzemeler için kapalı gözenek miktarının diğere yüksek yoğunluktaki malzemelere göre daha az olabileceğı tahmin edilebilir.

Literatürde yapılmış olan 16 kg/m³ yoğunluk değeriindeki EPS malzemesinin farklı nem içeriğindeki ısı iletkenliğinin değışimi yapılan çalışma ile karşılaştırılmalı olarak şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS malzemesinin ısı iletkenliğinin farklı nem içeriklerinde karşılaştırılması

Efektif ısı iletkenliğinin belirlenmesinde teorik modellerin ihtiyaçlar doğrultusunda farklı özellikteki malzemeler için tanımlandığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan teorik modellerin kendi içinde karşılaştırması yapılmış olup aralarında küçük hatalar olduğu gibi çok büyük hatalarında olduğu görülmüştür. Teorik modeller ile deneysel sonuçların karşılaştırılması yapılmış olup yaklaşık %20 gibi büyük bir hata oranı ile çakıştığı belirlenmiştir.

Isı iletkenliğinin belirlenmesi için deneysel ve analitik çalışmaların birbiriyle karşılaştırıldığında uyum içinde olmadığı görülmüştür. Modellerin uygulanmasında bağıntılarda gözenek dizilimleri, malzeme içerisindeki farklı gözenek boyutları, meydana gelen ısı transferi olayları gibi parametreler hesaba katılmadığı için homojen dağılıma sahip olmayan gözenekli malzemeler için analitik hesapların çok doğru sonuçlar vermeyeceği görülmektedir. Bundan hareketle analitik sonuçların gözenekli malzemelerde ısı iletkenlik tahmini için çok gerçekçi sonuçlar vermeyeceği başka yöntemlerin kullanılması gerektiği açıkça görülmektedir.

Sonuç olarak yoğunluğun ısı iletkenlik değerini değiştirdiği, enerji tasarrufu amacıyla yoğunluğu yüksek yalıtım malzemelerinin tercih edilebileceği, malzemelerin

ısı iletkenlik değerini azaltmak amacıyla ilgili parametrelerin üretim işlemi sırasında değiştirilebileceği dūřünlmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C., A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*. 40 (3), 394-398, 2008.
- [2] Yang, L., Yan, H., Lam, J. C., Thermal comfort and building energy consumption implications – A review. *Applied Energy*. 115, 164-173, 2014.
- [3] Büyükalaca, O., Bulut, H., Detailed weather data for the provinces covered by the Southeastern Anatolia Project (GAP) of Turkey. *Applied Energy*. 77 (2), 187-204, 2004.
- [4] Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., Al-Ajlan, S. A. et al., Heat Transfer Characteristics and Optimum Insulation Thickness for Cavity Walls. *Journal of Building Physics*. 26 (3), 285-307, 2003.
- [5] Bolattürk, A., Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Applied Thermal Engineering*. 26 (11-12), 1301-1309, 2006.
- [6] Dombaycı, Ö. A., Gölcü, M., Pancar, Y., Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources. *Applied Energy*. 83 (9), 921-928, 2006.
- [7] Sisman, N., Kahya, E., Aras, N. et al., Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regions. *Energy Policy*. 35 (10), 5151-5155, 2007.
- [8] Bolattürk, A., Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey. *Building and Environment*. 43 (6), 1055-1064, 2008.
- [9] Kaynakli, O., A study on residential heating energy requirement and optimum insulation thickness. *Renewable Energy*. 33 (6), 1164-1172, 2008.
- [10] Yu, J., Yang, C., Tian, L. et al., A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China. *Applied Energy*. 86 (11), 2520-2529, 2009.
- [11] Fertelli, A., Determination Of Optimum Insulation Thickness For Different Building Walls In Turkey. *Transactions Of Famena* 2,2013.
- [12] Bektas Ekici, B., Aytac Gulden, A., Aksoy, U. T., A study on the optimum insulation thicknesses of various types of external walls with respect to different materials, fuels and climate zones in Turkey. *Applied Energy*. 92, 211-217, 2012.

- [13] Ozel, M., Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials. *Applied Thermal Engineering*. 31 (17-18), 3854-3863, 2011.
- [14] Al-Sanea, S. A., Zedan, M. F., Al-Ajlan, S. A., Effect of electricity tariff on the optimum insulation-thickness in building walls as determined by a dynamic heat-transfer model. *Applied Energy*. 82 (4), 313-330, 2005.
- [15] Ozel, M., Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method. *Applied Energy*. 88 (7), 2429-2435, 2011.
- [16] Daouas, N., Hassen, Z., Aissia, H. B., Analytical periodic solution for the study of thermal performance and optimum insulation thickness of building walls in Tunisia. *Applied Thermal Engineering*. 30 (4), 319-326, 2010.
- [17] Daouas, N., A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads. *Applied Energy*. 88 (1), 156-164, 2011.
- [18] Mendes, N., Winkelmann, F. C., Lamberts, R. et al., Moisture effects on conduction loads. *Energy and Buildings*. 35 (7), 631-644, 2003.
- [19] Kong, F., Zheng, M., Effects of combined heat and mass transfer on heating load in building drying period. *Energy and Buildings*. 40 (8), 1614-1622, 2008.
- [20] Liu, X., Chen, Y., Ge, H. et al., Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. *Energy and Buildings*. 93, 259-268, 2015.
- [21] Liu, X., Chen, Y., Ge, H. et al., Determination of optimum insulation thickness for building walls with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China. *Energy and Buildings*. 109, 361-368, 2015.
- [22] Schellenberg, J., Wallis, M., Dependence of Thermal Properties of Expandable Polystyrene Particle Foam on Cell Size and Density. *Journal of Cellular Plastics*. 46 (3), 209-222, 2010.
- [23] Rémi, C., Dominique, B., Daniel, Q., Radiative Properties of Expanded Polystyrene Foams. *Journal of Heat Transfer*. 131 (1), 012702, 2009.
- [24] Gnip, I., Vèjelis, S., Vaitkus, S., Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10°C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50°C. *Energy and Buildings*. 52, 107-111, 2012.
- [25] Mihlayanlar, E., Dilmaç, Ş., Güner, A., Analysis of the effect of production process parameters and density of expanded polystyrene insulation boards on mechanical properties and thermal conductivity. *Materials & Design*. 29 (2), 344-352, 2008.

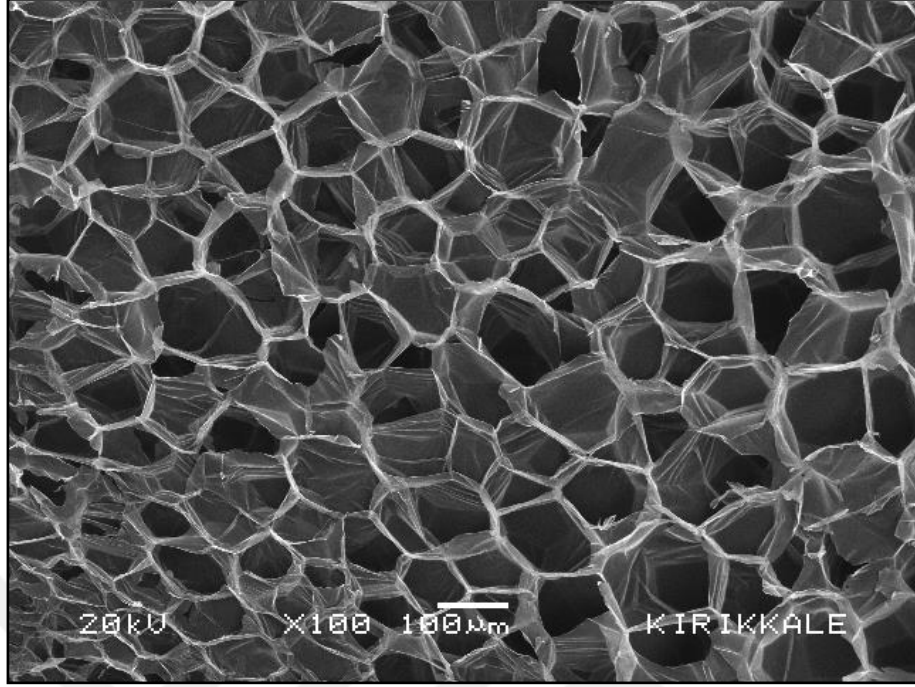
- [26] Yucel, K. T., Basyigit, C., Ozel, C., Thermal Insulation Properties Of Expanded Polystyrene As Construction And Insulating Materials. 15th Symposium on Thermophysical Properties, NIST/ASME, Boulder, Colorado. 54–66, 2003.
- [27] Lakatos, Á., Kalmár, F., Investigation of thickness and density dependence of thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials. *Materials and Structures*. 46 (7), 1101-1105, 2012.
- [28] Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H. et al., A Comparison of Different Techniques to Quantify Moisture Content Profiles in Porous Building Materials. *Journal of Building Physics*. 27 (4), 261-276, 2004.
- [29] Karamanos, A., Hadjarakou, S., Papadopoulos, A. M., The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. *Energy and Buildings*. 40 (8), 1402-1411, 2008.
- [30] Ochs, F., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 51 (3-4), 539-552, 2008.
- [31] Jerman, M., Černý, R., Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials. *Energy and Buildings*. 53, 39-46, 2012.
- [32] Lakatos, A., Kalmar, F., Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials. *Building Services Engineering Research and Technology*. 34 (4), 407-416, 2012.
- [33] Vejmelkova, E., Pavlikova, M., Jerman, M. et al., Free Water Intake as Means of Material Characterization. *Journal of Building Physics*. 33 (1), 29-44, 2009.
- [34] Yu, Q., Thompson, B. E., Straatman, A. G., A Unit Cube-Based Model for Heat Transfer and Fluid Flow in Porous Carbon Foam. *Journal of Heat Transfer*. 128 (4), 352, 2006.
- [35] Bouvard, D., Chaix, J. M., Dendievel, R. et al., Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*. 37 (12), 1666-1673, 2007.
- [36] Jose Angel, D. D. L. P., Hector, P. M., Miguel, T. C. et al., Microstructure Characterization of Low Density EPS. *Applied Mechanics and Materials*. 420, 167-176, 2013.
- [37] *Plastics*, B., Technical Information, 1992.
- [38] Mihlayanlar, E., Eps yalıtım levhalarının özelliklerine etki eden üretim parametrelerinin irdelenmesi. Doktora Tezi. Trakya Üniversitesi, Edirne, 2005.

- [39] Akıncı, H., Günümüzde Uygulanan Isı Yalıtım Malzemeleri,Özellikleri, Uygulama Teknikleri Ve Fiyat Analizleri. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2007.
- [40] Anonim, Eps'nin bazı özellikleriyle ilgili açıklamalar, <http://www.styrosan.com.tr/> (08.03.2017)
- [41] Uzun, İ., Isı Yalıtımı. Yönetmelikler Işığında Isı Yalıtımı ve Uygulamaları. 8-19, 2013.
- [42] Çengel, Y., Ghajar, A. J., Introduction and Basic Concepts. Heat and Mass Transfer:Fundamentals and Applications. 1-47, Mc-Graw-Hill, Singapore, 2011.
- [43] Al-Homoud, S., D. M., Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. Building and Environment. 40 (3), 353-366, 2005.
- [44] Pehlivanlı, Z., Gazbeton Malzemesinin Farklı Sıva Malzemeleriyle Birlikte Isıl Özelliklerinin Nem ve Sıcaklıkla Değişiminin İncelenmesi Doktora Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2010.
- [45] DURMAZ, S., A Numerical Study On The Effective Thermal Conductivity Of Composite Materials. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2004.
- [46] Fiedler, T., Solórzano, E., Öchsner, A., Numerical and experimental analysis of the thermal conductivity of metallic hollow sphere structures. Materials Letters. 62 (8-9), 1204-1207, 2008.
- [47] YÜKSEL, N., AVCI, A., Gözenekli Malzemelerin Etken Isıl İletkenlikleri Üzerine Mevcut Çalışmalar. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. 25 (2), 331-346, 2010.
- [48] Tavman, I. H., Effective thermal conductivity of isotropic polymer composites. International Communications in Heat and Mass Transfer. 25 (5), 723-732,1998.
- [49] Cernuschi, F., Ahmaniemi, S., Vuoristo, P. et al., Modelling of thermal conductivity of porous materials: application to thick thermal barrier coatings. Journal of the European Ceramic Society. 24 (9), 2657-2667, Aug, 2004.
- [50] Kohout, M., Collier, A. P., Štěpánek, F., Effective thermal conductivity of wet particle assemblies. International Journal of Heat and Mass Transfer. 47 (25), 5565-5574, 2004.
- [51] Carson, J. K., Lovatt, S. J., Tanner, D. J. et al., Thermal conductivity bounds for isotropic, porous materials. International Journal of Heat and Mass Transfer. 48 (11), 2150-2158, 2005.

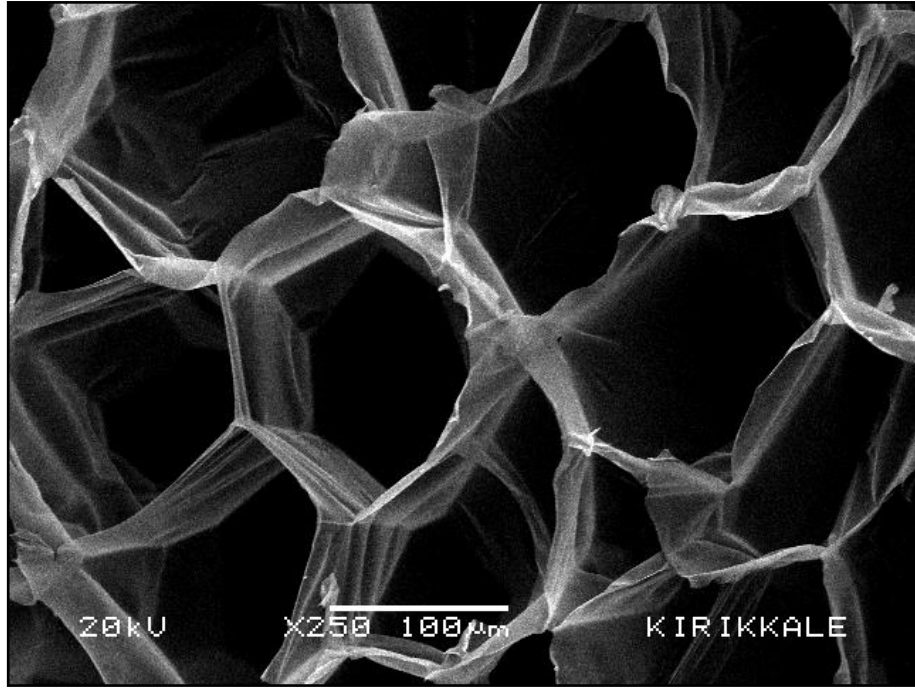
- [52] Fu, S.-Y., Mai, Y.-W., Thermal Conductivity of Misaligned Short-Fiber-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 88, 1497–1505, 2002.
- [53] Carson, J. K., Lovatt, S. J., Tanner, D. J. et al., Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous foods. *Journal of Food Engineering*. 75 (3), 297-307, 2006.
- [54] TSE, "Isı yalıtımı - Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini - Mahfazalı sıcak plaka cihazı," TS ISO 8302 2002.
- [55] TSE, "Isı yalıtımı - Kararlı durum ısı iletim özelliklerinin tayini -Kalibre edilmiş ve mahfazalı sıcak kutu," TS EN ISO 8990 2002.
- [56] Altun, O., Boke, Y. E., Kalemtaş, A., Problems for Determining the Thermal Conductivity of TBCs by Laser – Flash Method. *Journal of Achievements Materials and Manufacturing Engineering*. 30 (2), 2008.
- [57] Altun, Ö., Isıl Engelleme Kaplamalarında Efektif Isı İletim Katsayısının Değişimi. Doktora Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2007.
- [58] Yeşilata, B., Turgut, P., Işıker, Y., Kompozit Yapı Malzemelerinde Isıl Özellik Ölçümü-1: Mevcut Ölçüm Tekniklerinin İrdelenmesi. *Mühendis ve Makina*. 48 (564), 2005.
- [59] Liu, G. R., Quek, S. S., Computational Modelling. The Finite Element Method - A Practical Course. 1-9, Singapore, 2003.
- [60] TSE, "Isı yalıtımı - Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini -Isı akış sayacı cihazı," TS ISO 8301, 2002.
- [61] Çengel, Y. A., Ghajar, A. J., Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. 1-47. Mc-Graw-Hill, Singapore, 2011.
- [62] Algaer, E., Thermal Conductivity of Polymer Material Reverse Nonequilibrium Molecular Dynamics Simulation. Technische Universität. 2010.
- [63] Pavlík, Z., Fiala, L., Vejmelková, E. et al., Application of Effective Media Theory for Determination of Thermal Properties of Hollow Bricks as a Function of Moisture Content. *International Journal of Thermophysics*. 34 (5), 894-908, 2012.
- [64] Jerman, M., Keppert, M., Výborný, J. et al., Moisture and heat transport and storage characteristics of two commercial autoclaved aerated concretes. *Cement Wapno Beton*. 16 (78), 18-29, 2011.

- [65] Pavlík, Z., Vejmelková, E., Fiala, L. et al., Effect of moisture on thermal conductivity of lime-based composites. *International Journal of Thermophysics*. 30 (6), 1999, 2009.
- [66] Mar, J. D., Litovsky, E., Kleiman, J., Modeling and database development of conductive and apparent thermal conductivity of moist insulation materials. *Journal of building physics*. 32 (1), 9-31, 2008.
- [67] Gnip, I. Y., Kersulis, V., Vejelis, S. et al., Water absorption of expanded polystyrene boards. *Polymer Testing*. 25 (5), 635-641, 2006.
- [68] Domínguez-Muñoz, F., Anderson, B., Cejudo-López, J. M. et al., Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials. *Energy and Buildings*. 42 (11), 2159-2168, 2010.
- [69] VĚJELIS, S., VAITKUS, S., Investigation of Water Absorption by Expanded Polystyrene Slabs. *MATERIALS SCIENCE*. 12 (2), 2006.

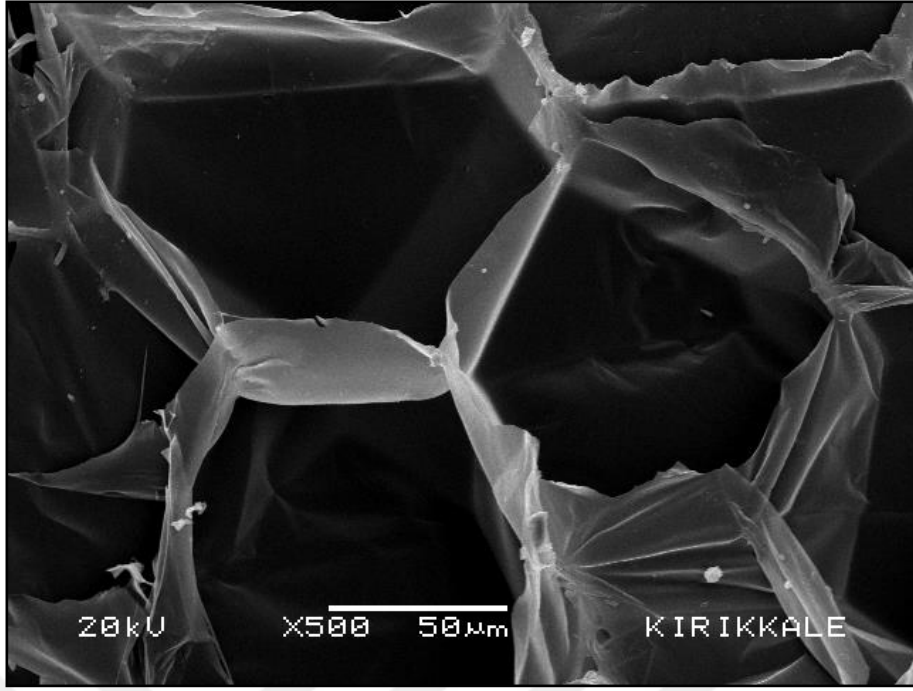
EKLER



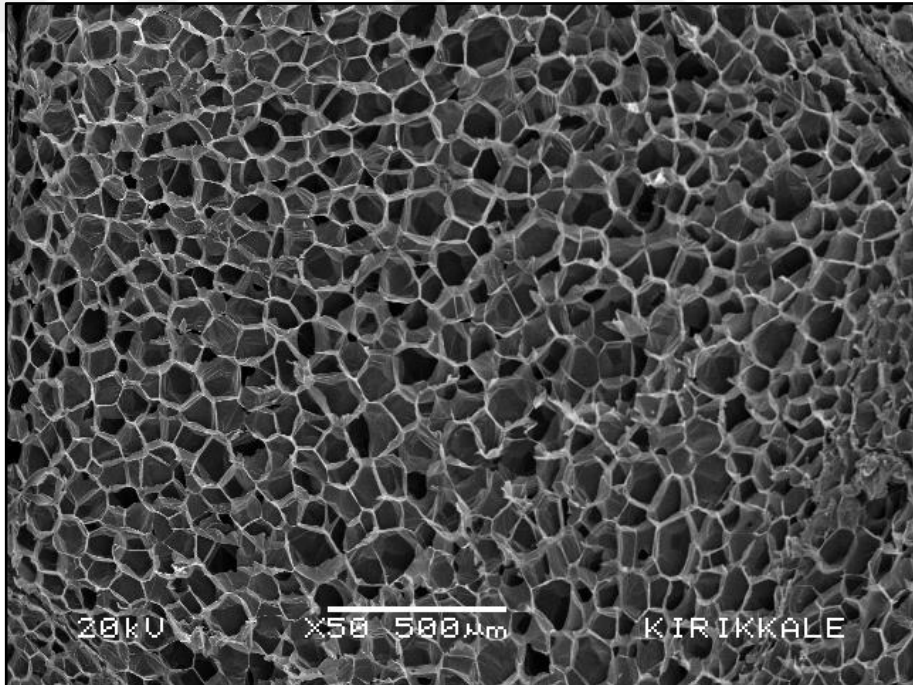
Şekil A.1. 16 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü



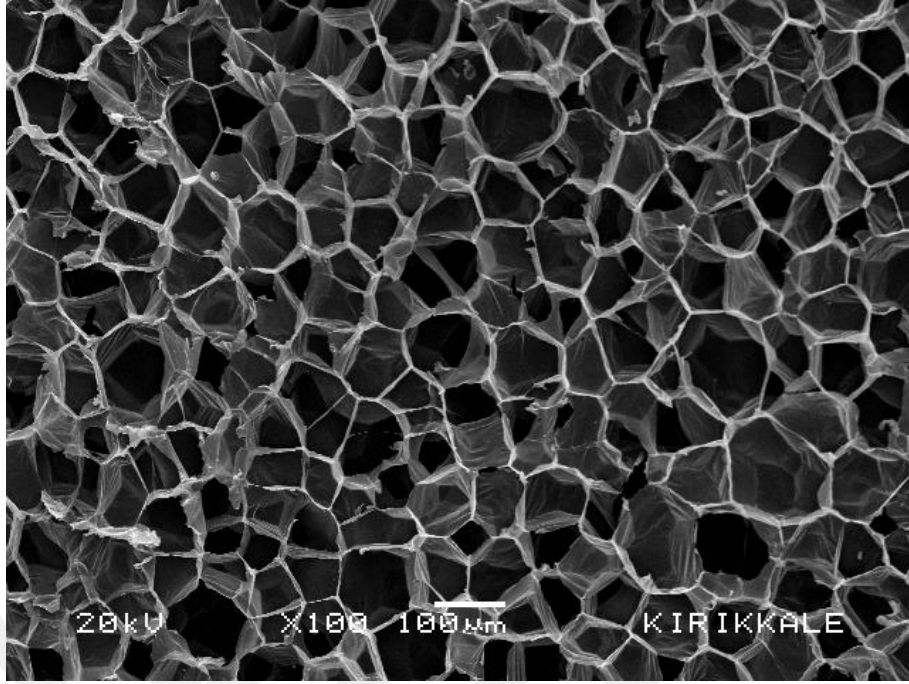
Şekil A.2. 16 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü



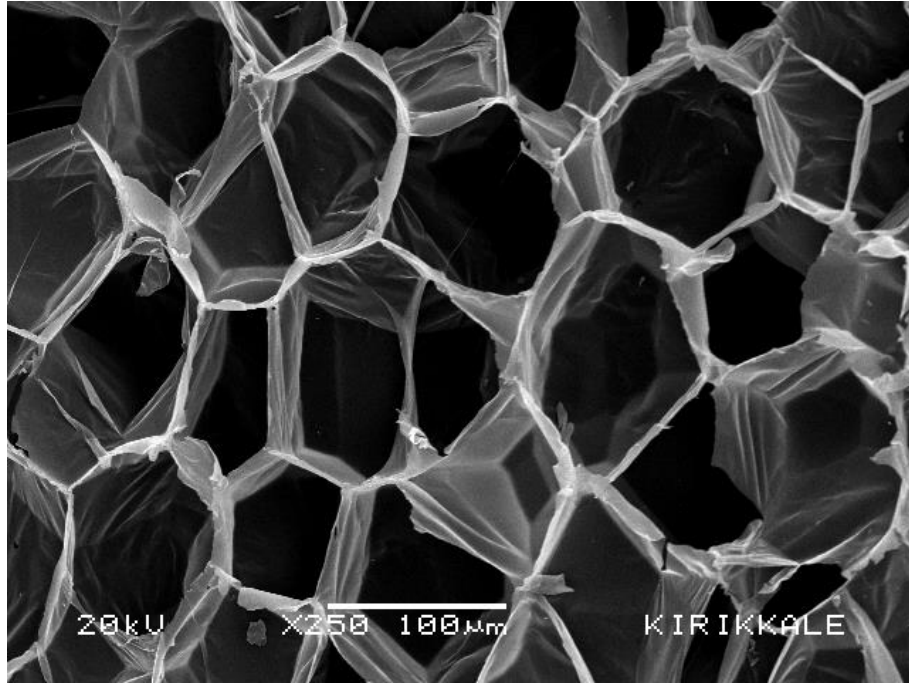
Şekil A.3. 16 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü



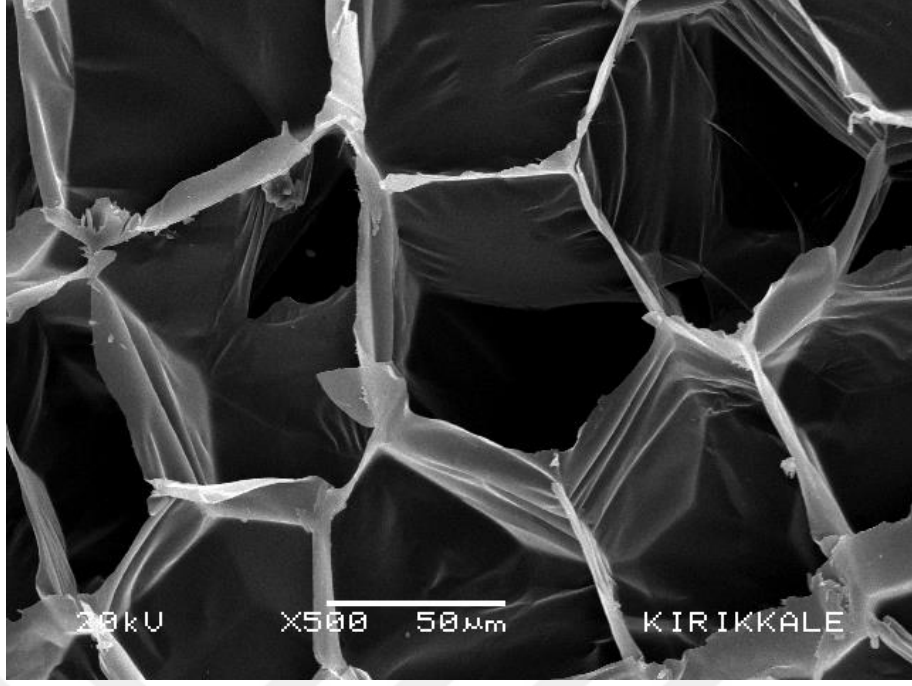
Şekil A.4. 21 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X50 Mikro Görüntüsü



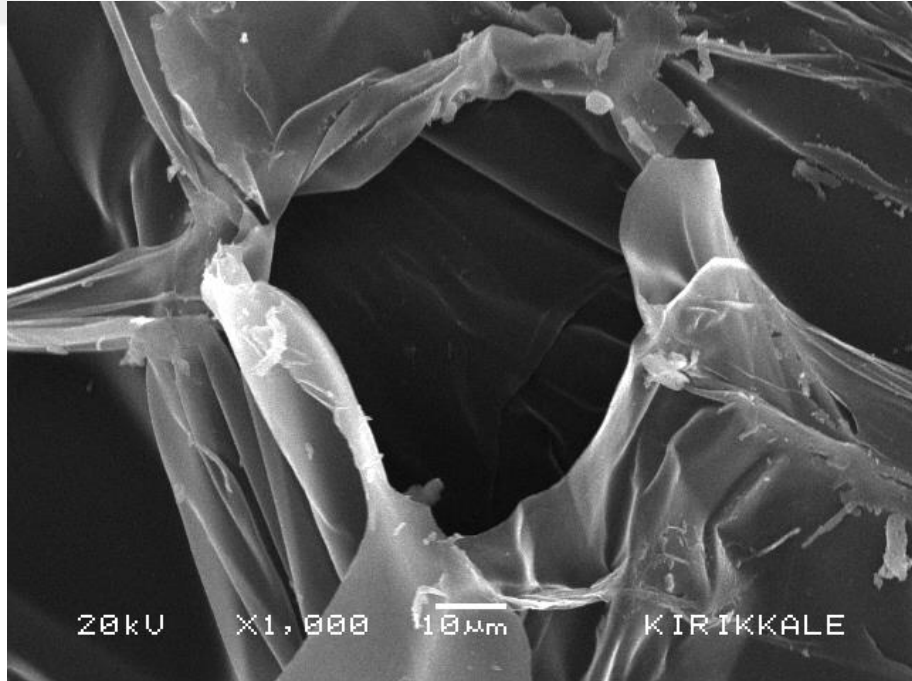
Şekil A.5. 21 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü



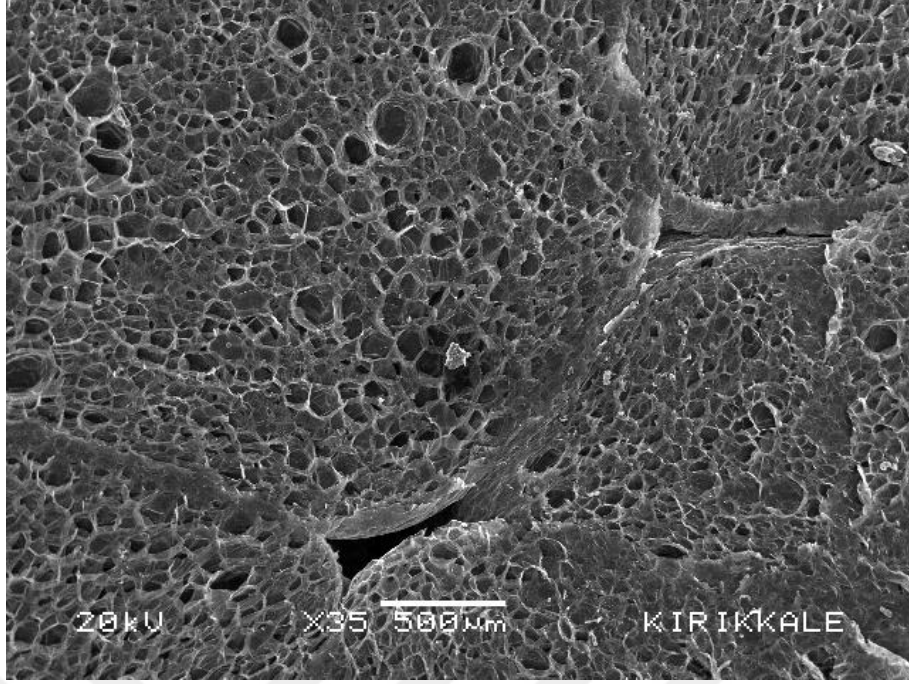
Şekil A.6. 21 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü



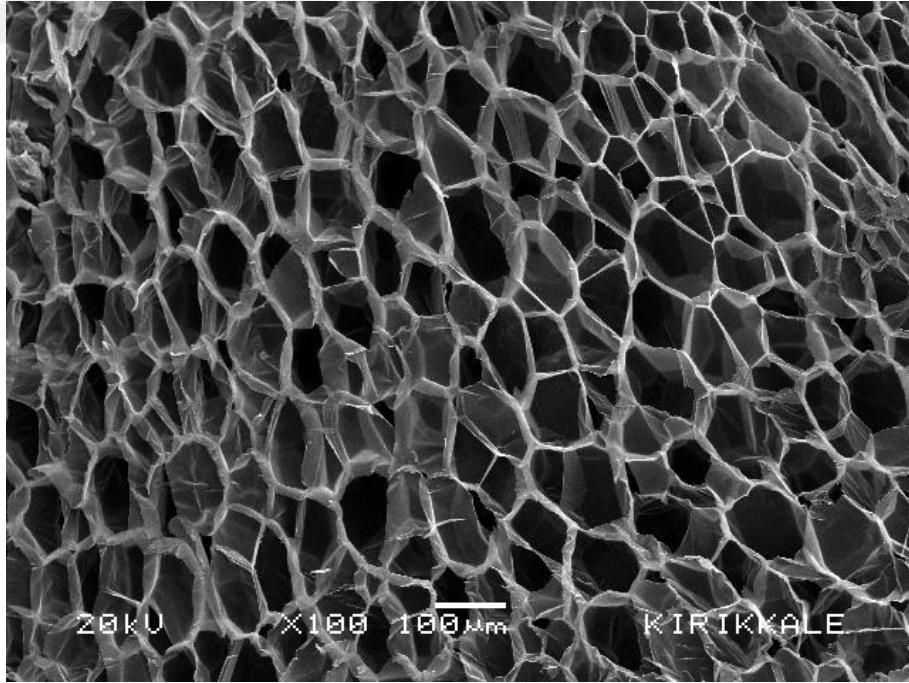
Şekil A.7. 21 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü



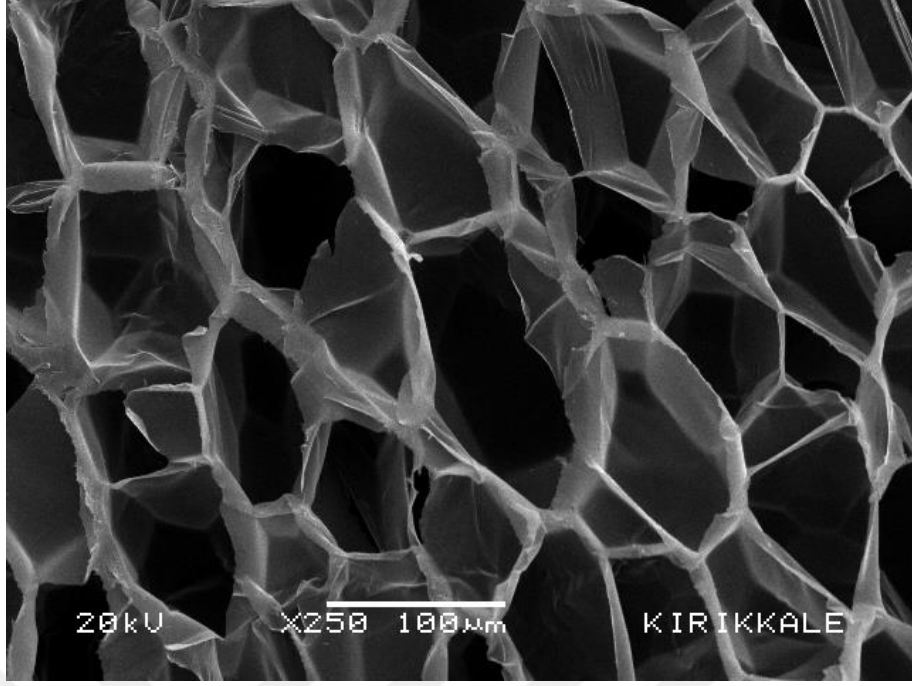
Şekil A.8. 21 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1000 Mikro Görüntüsü



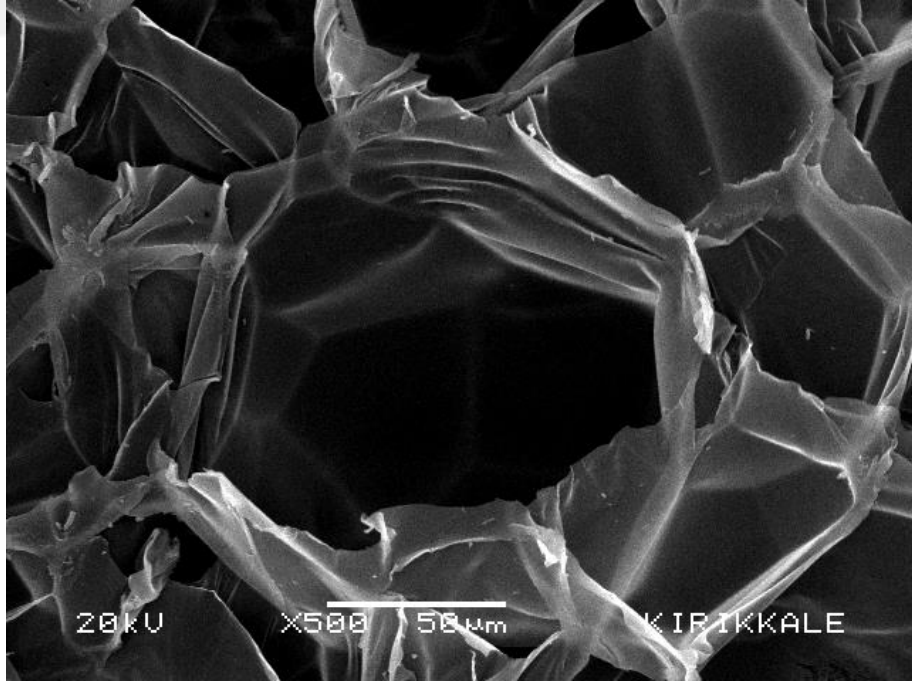
Şekil A.9. 25 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X35 Mikro Görüntüsü



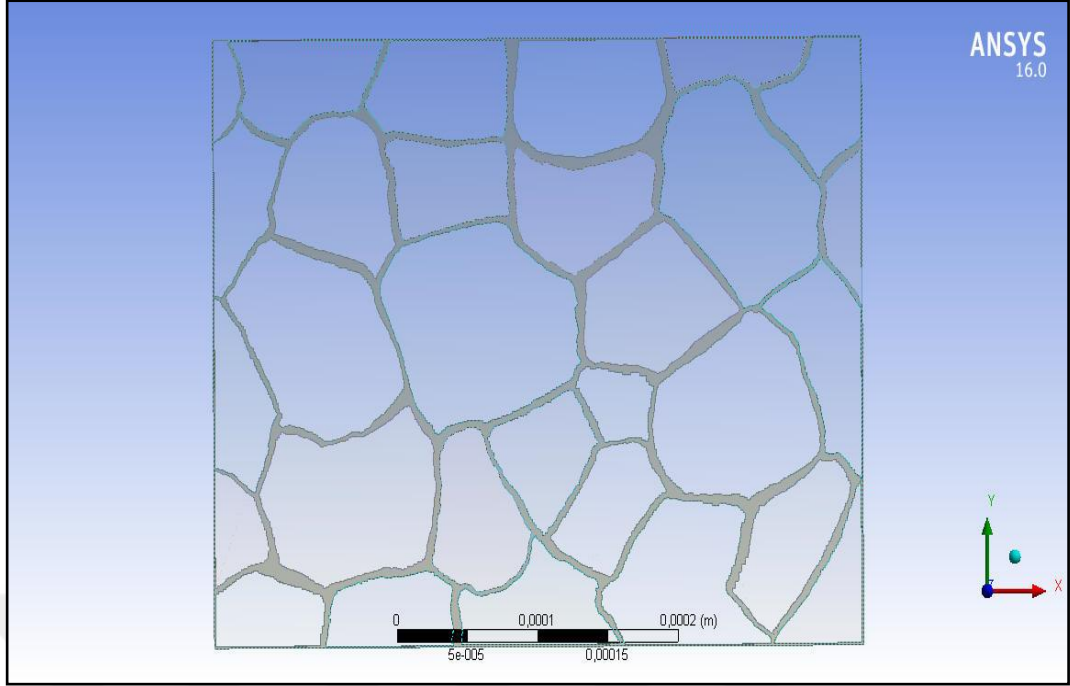
Şekil A.10. 25 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü



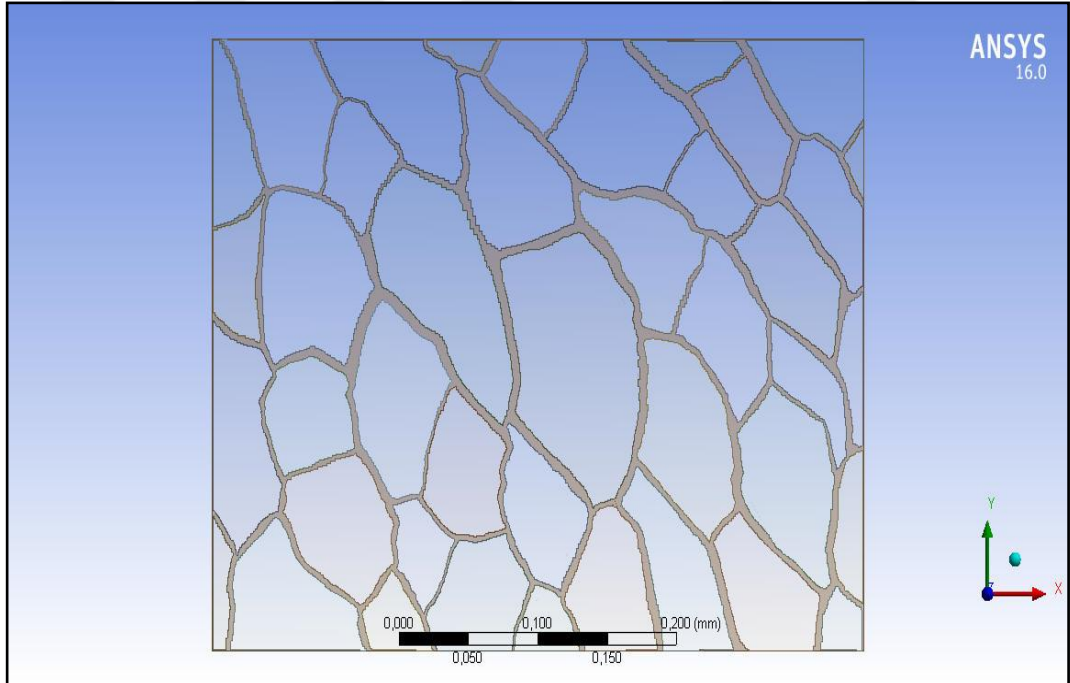
Şekil A.11. 25 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü



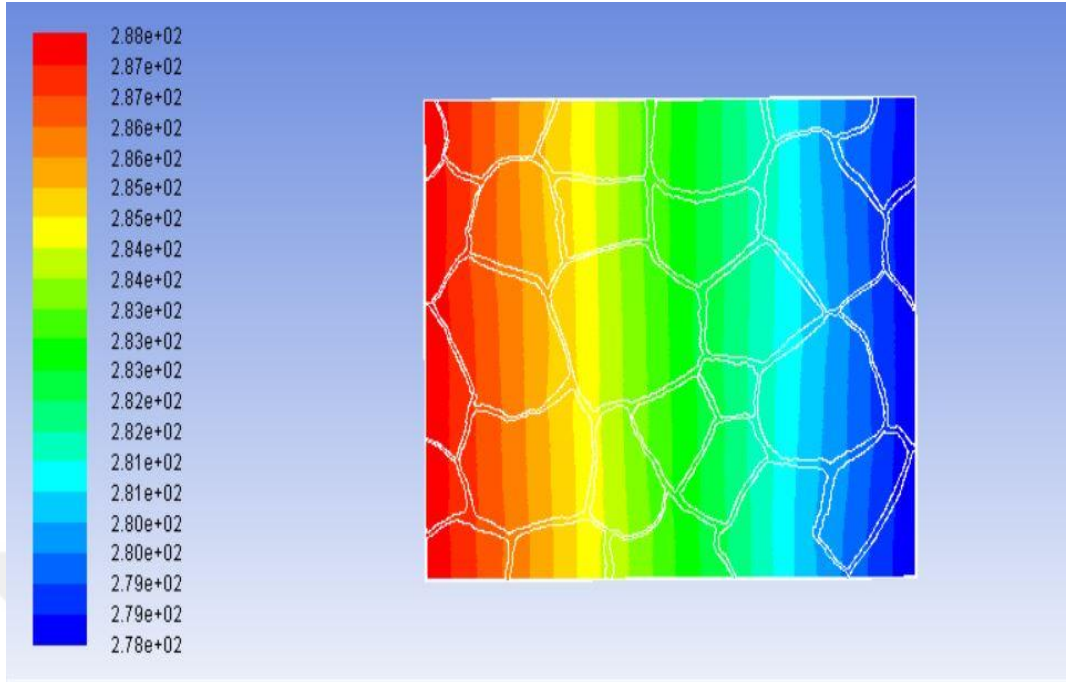
Şekil A.12. 25 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü



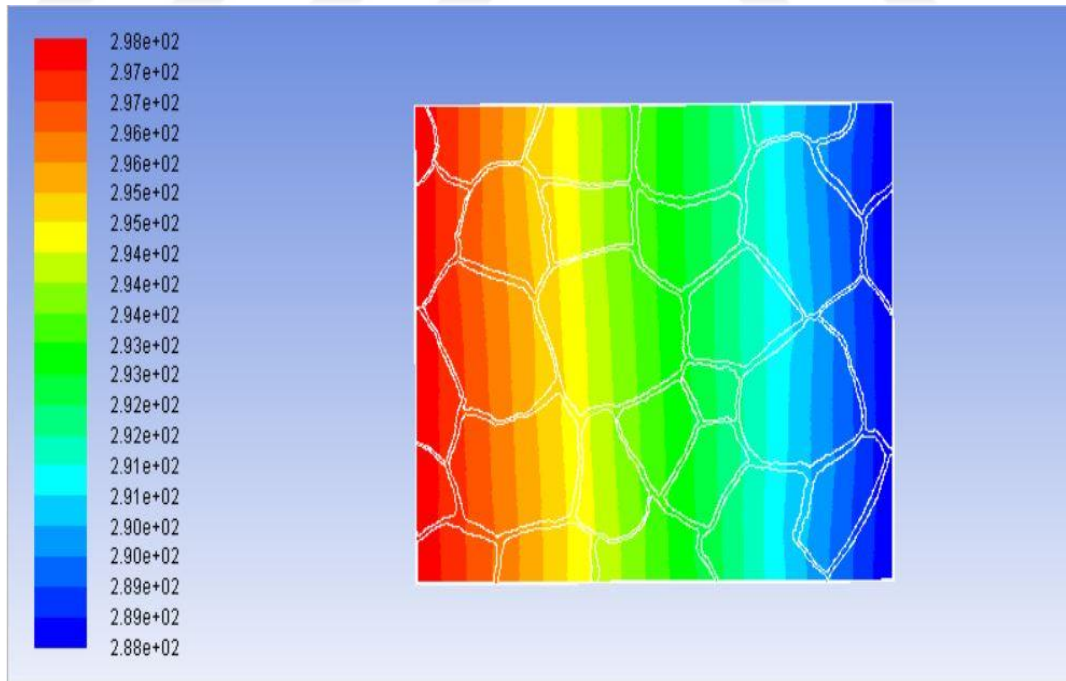
Şekil B.1. 16 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin Sayısal Geometri Modeli



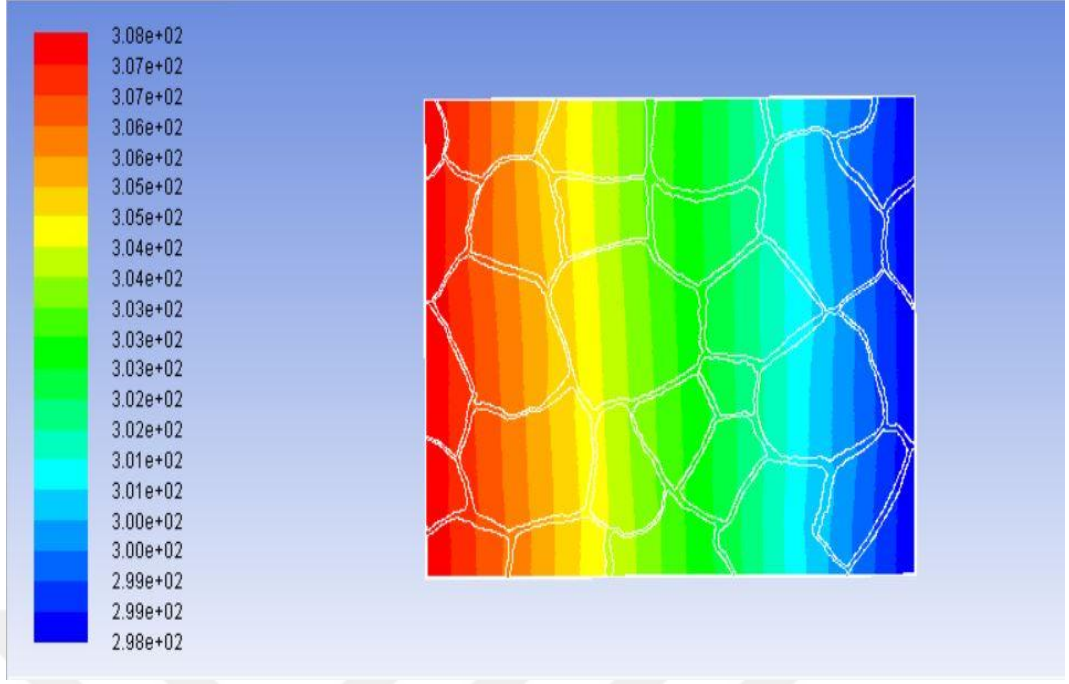
Şekil B.2. 25 kg/m³ Yoğunluğa Sahip EPS'nin Sayısal Geometri Modeli



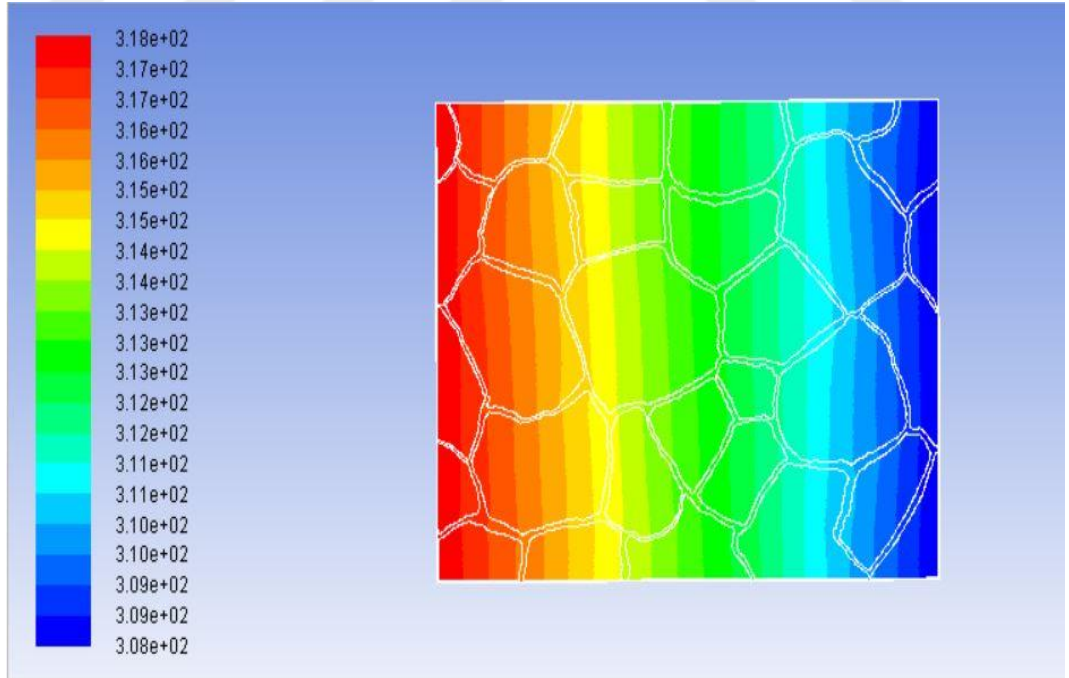
Şekil B.3. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=10 °C)



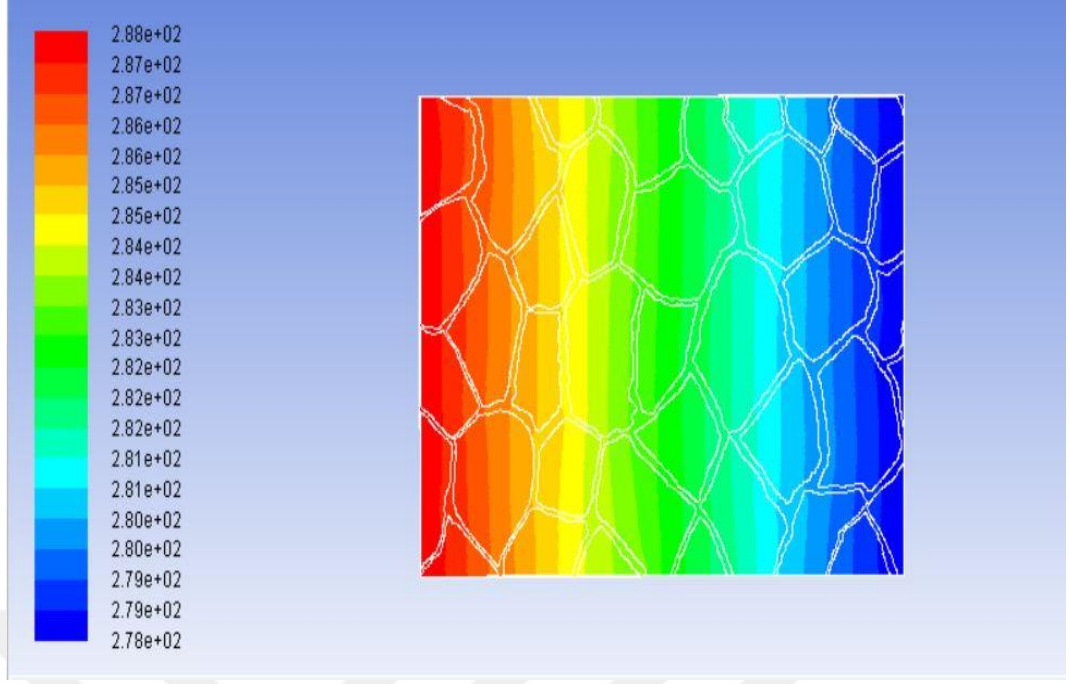
Şekil B.4. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=20 °C)



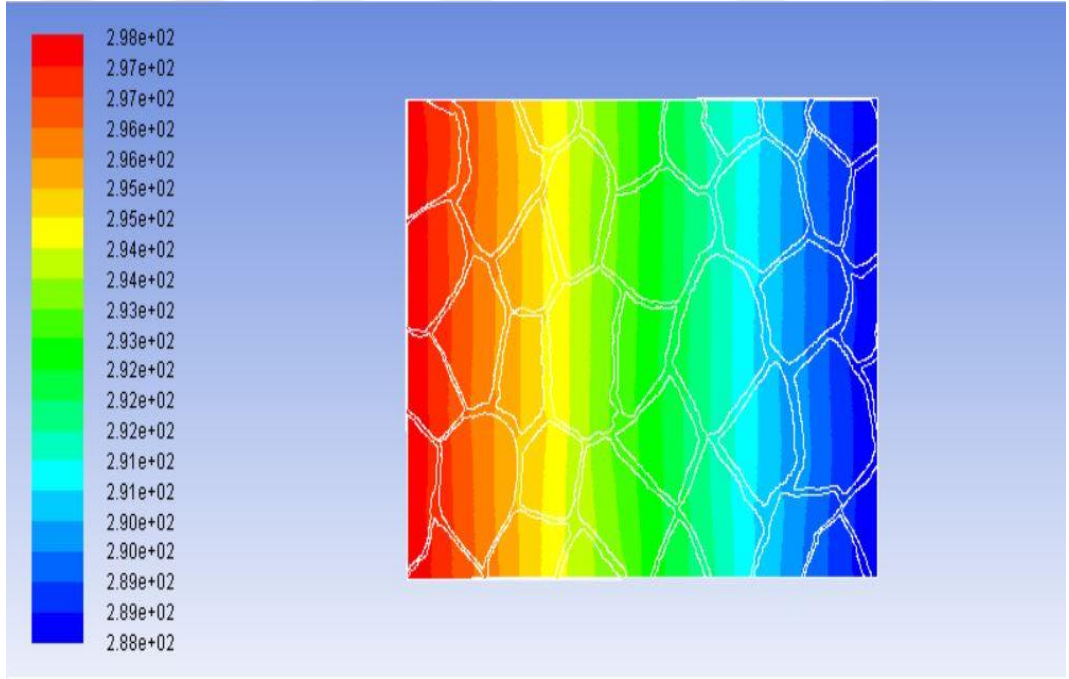
Şekil B.5. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=30 °C)



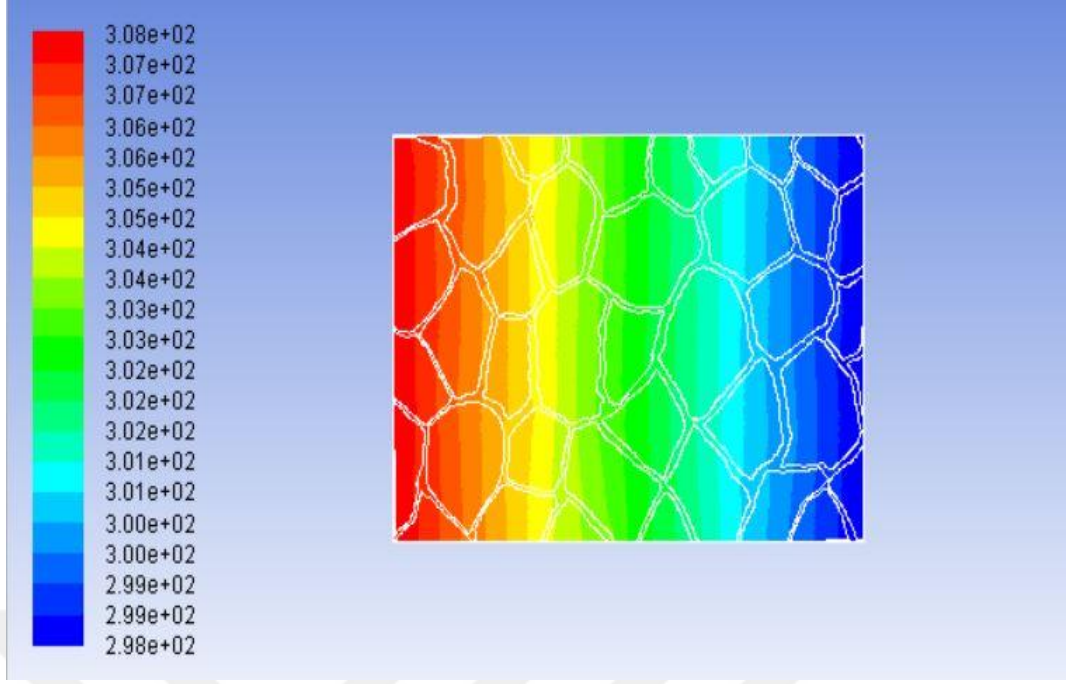
Şekil B.6. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=40 °C)



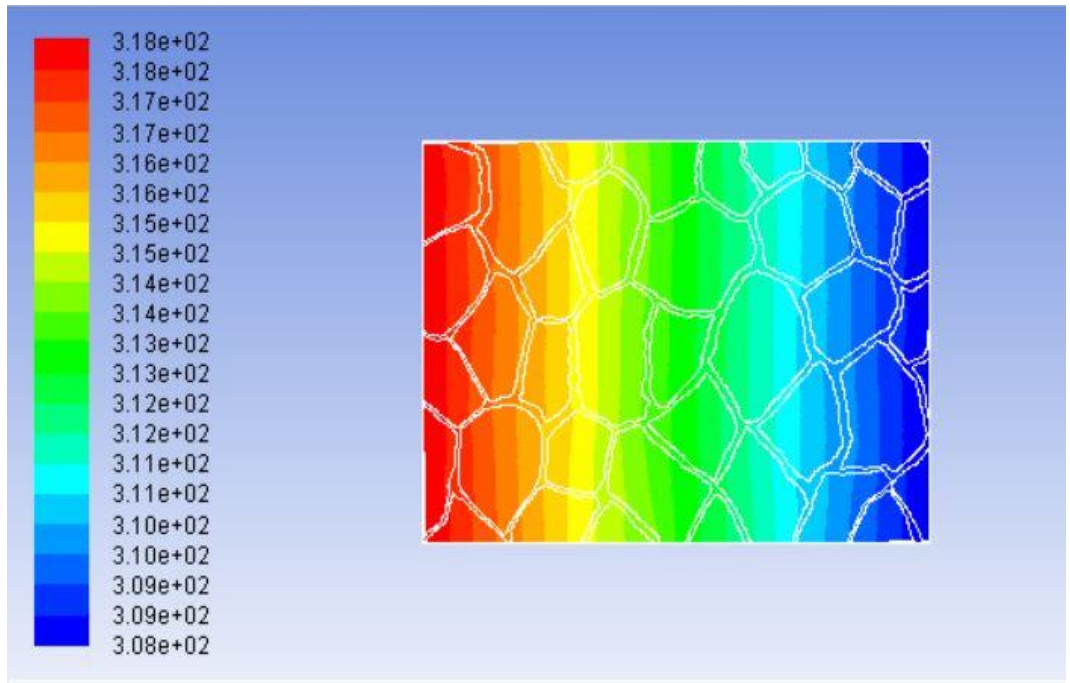
Şekil B.7. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=10 °C)



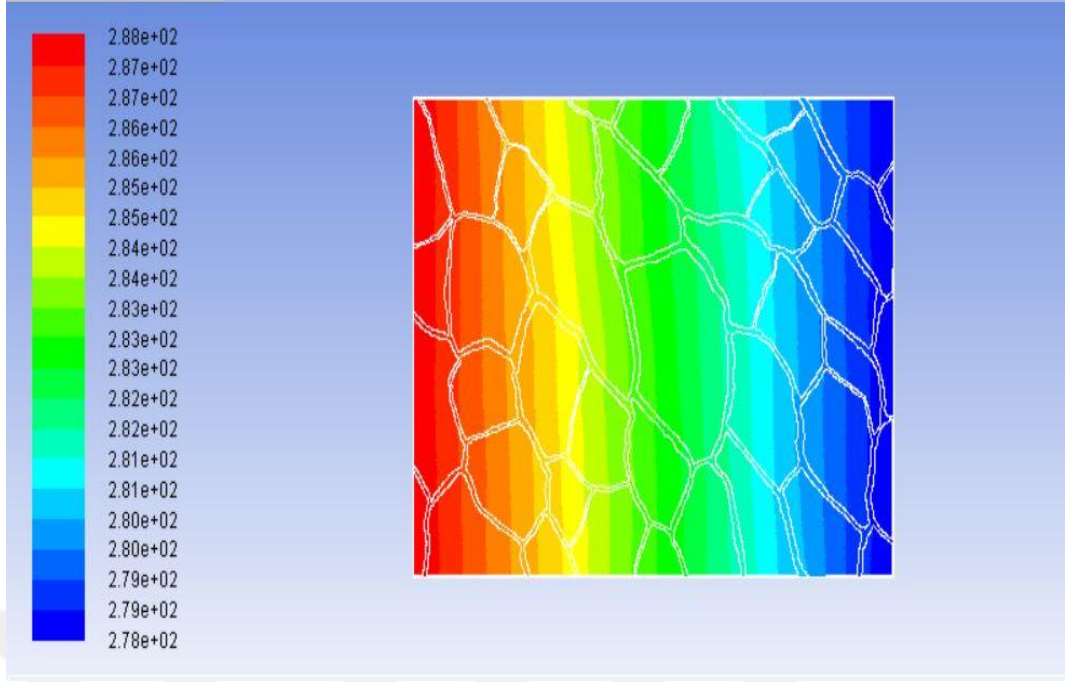
Şekil B.8. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=20 °C)



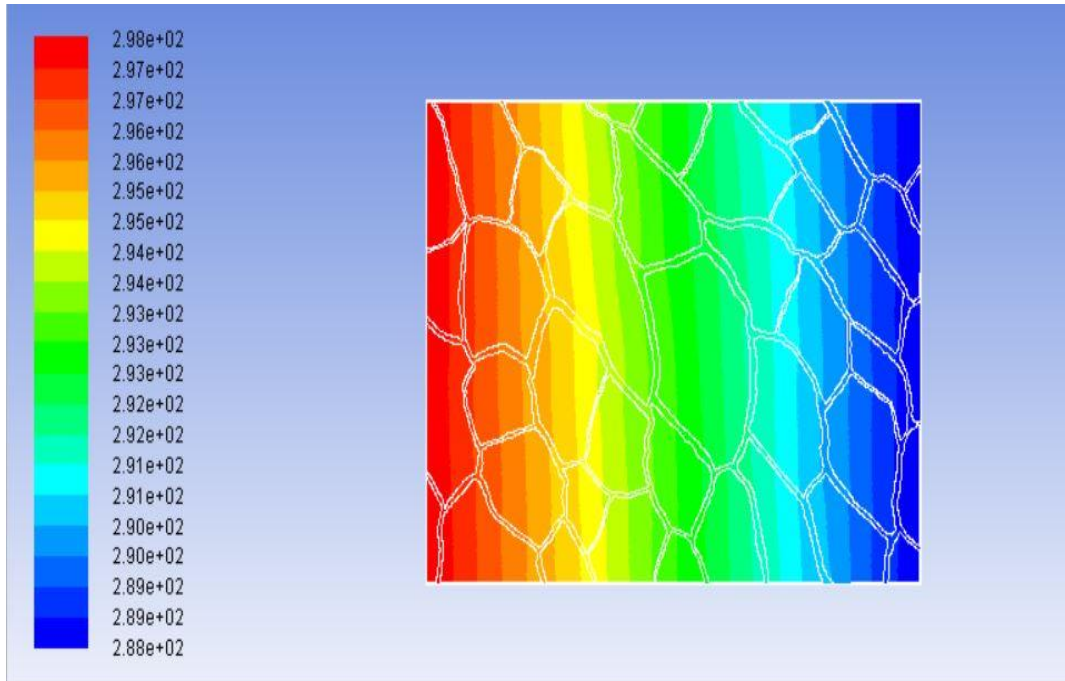
Şekil B.9. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=30 °C)



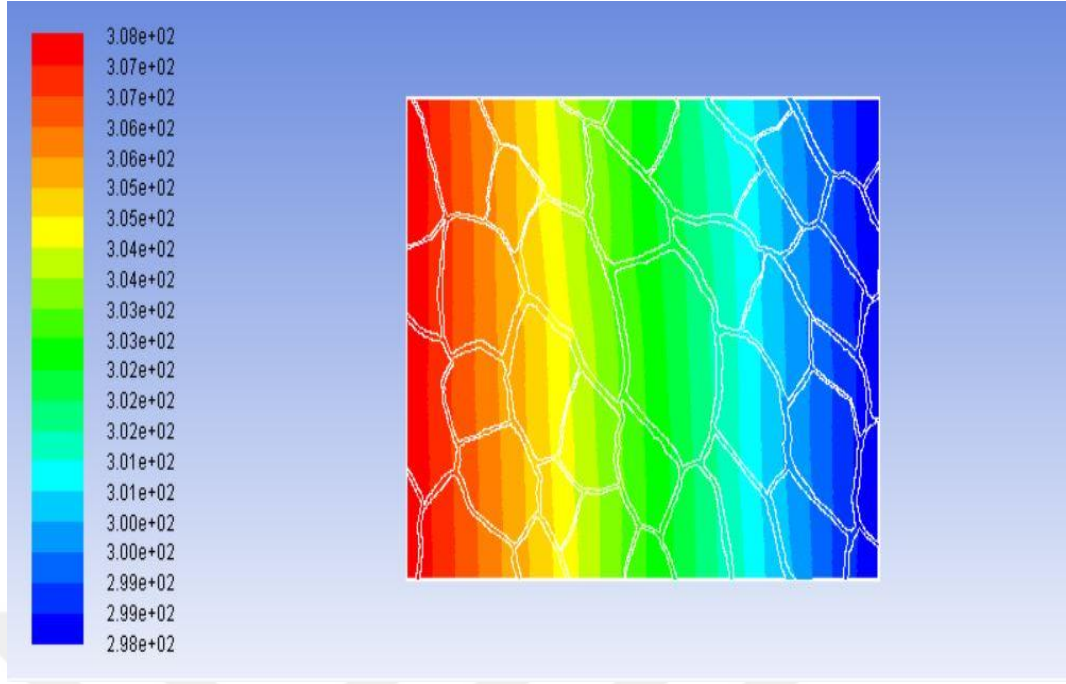
Şekil B.10. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=40 °C)



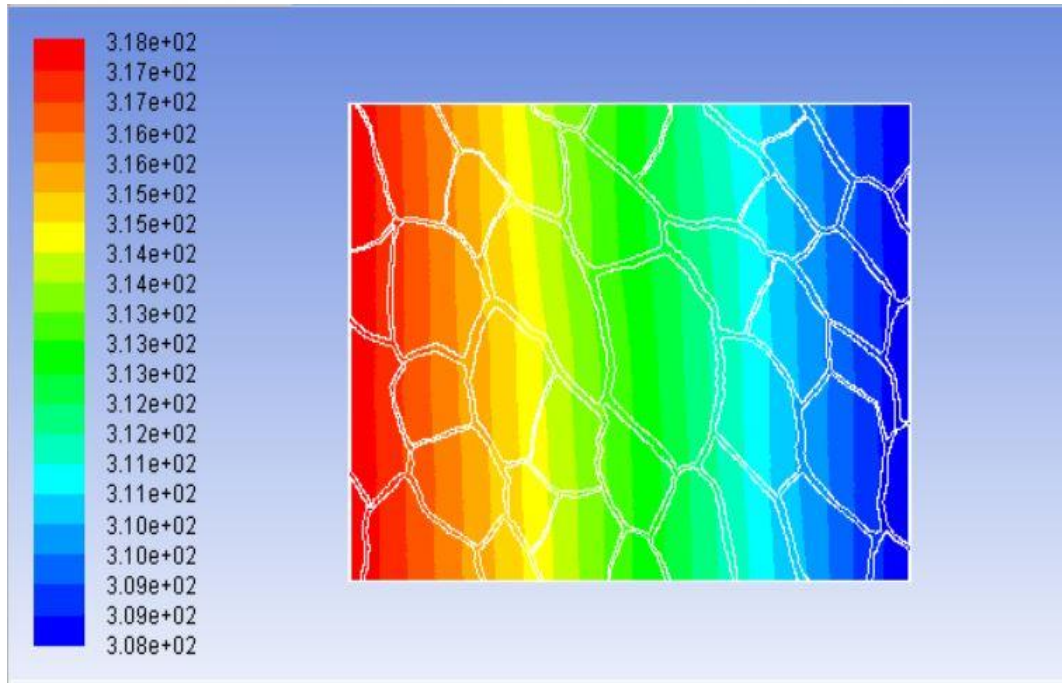
Şekil B.11. 25 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=10 °C)



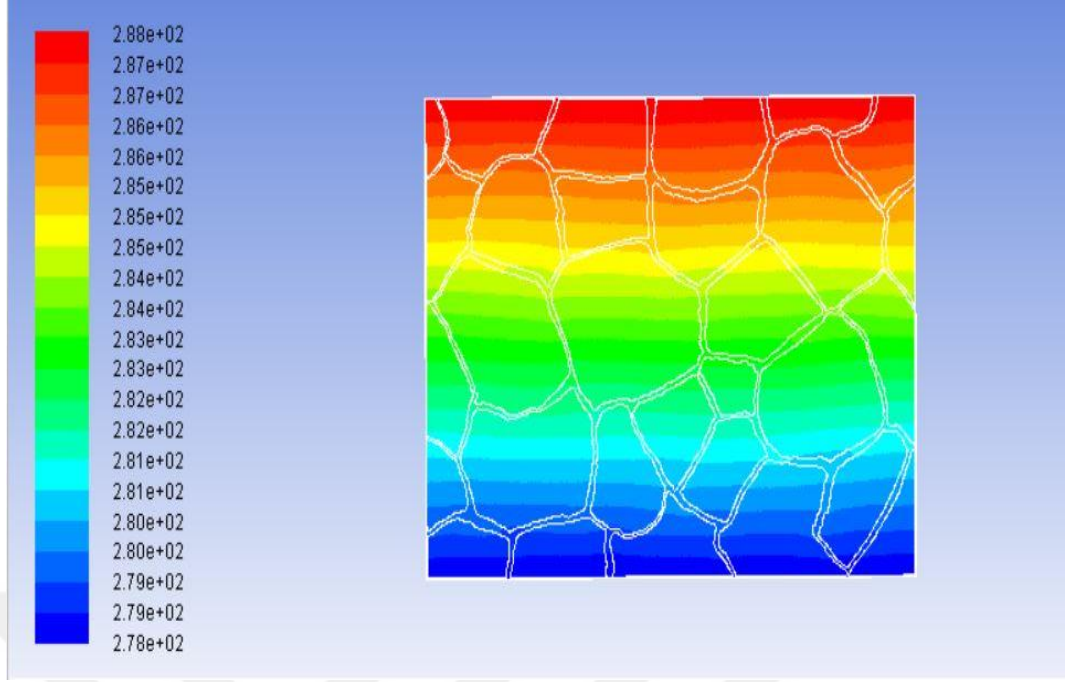
Şekil B.12. 25 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=20 °C)



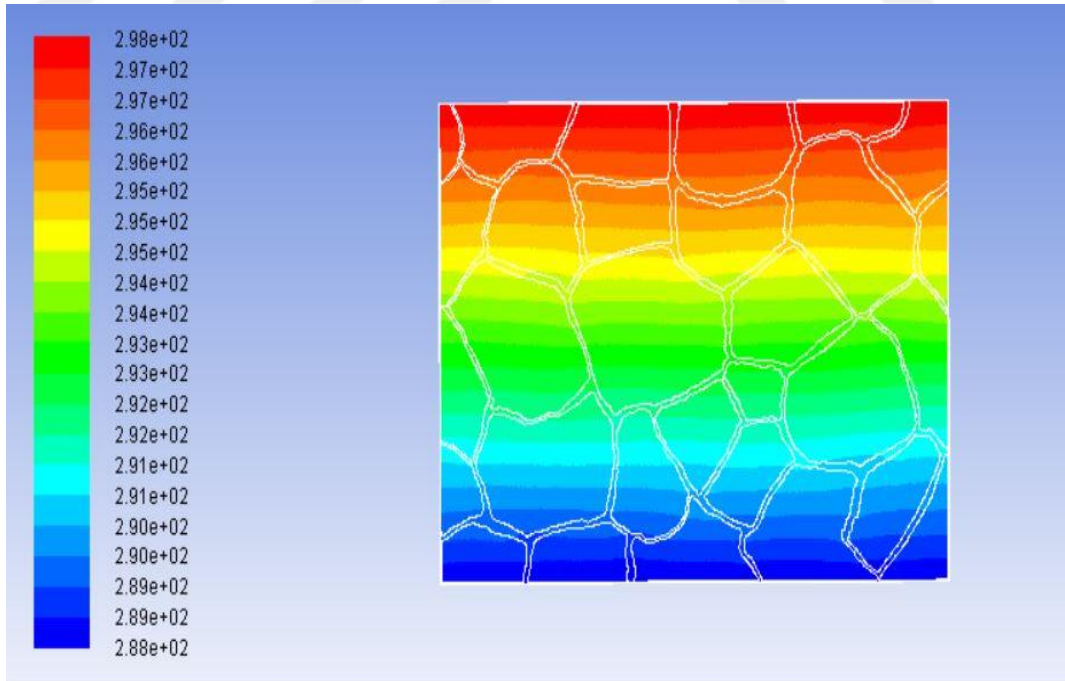
Şekil B.13. 25 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=30 °C)



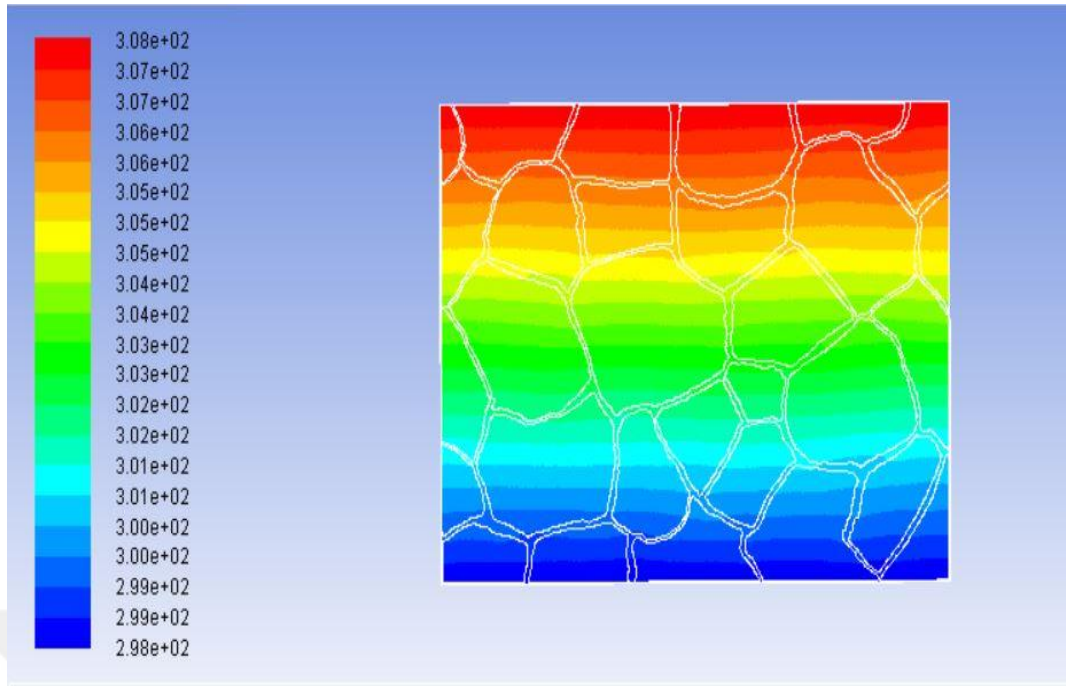
Şekil B.14. 25 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin x-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=40 °C)



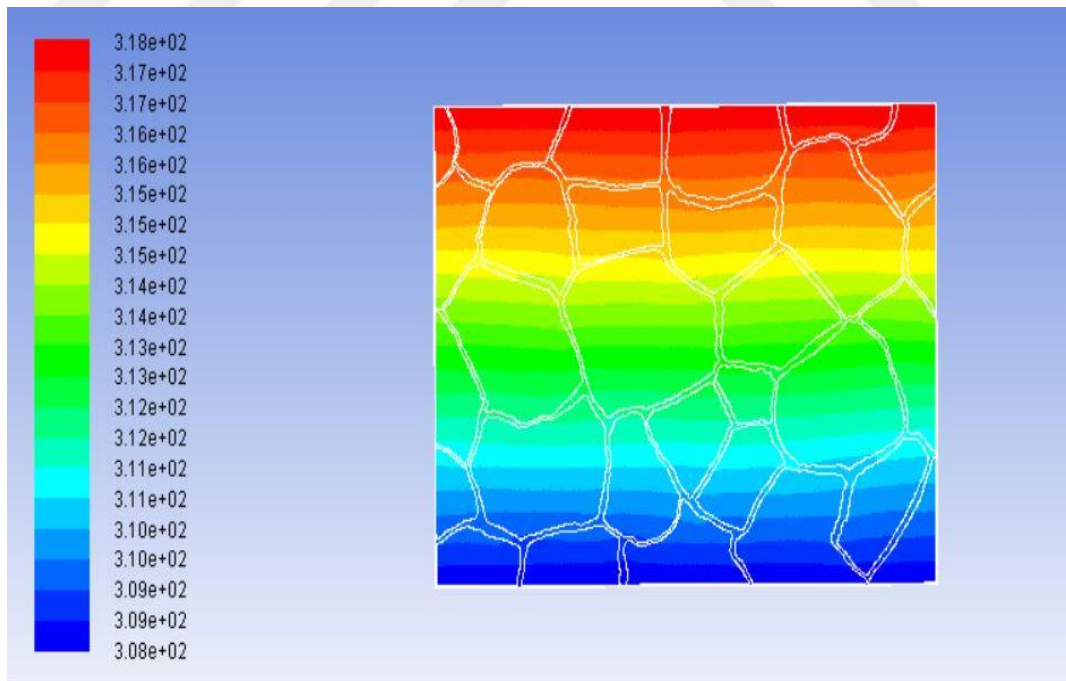
Şekil B.15. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=10 °C)



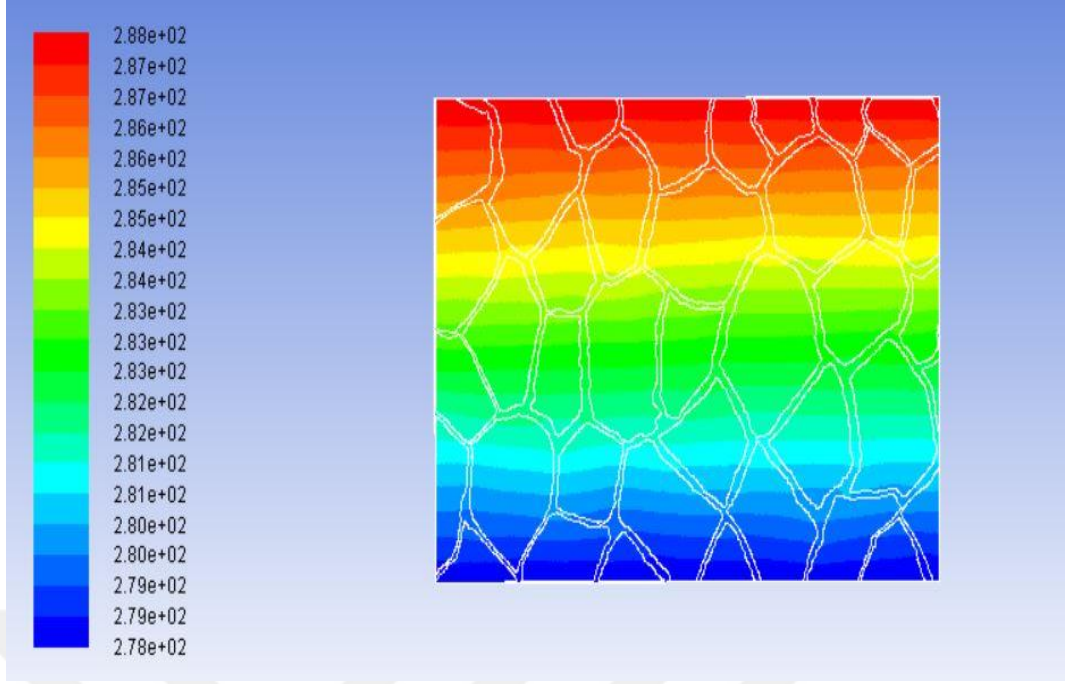
Şekil B.16. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=20 °C)



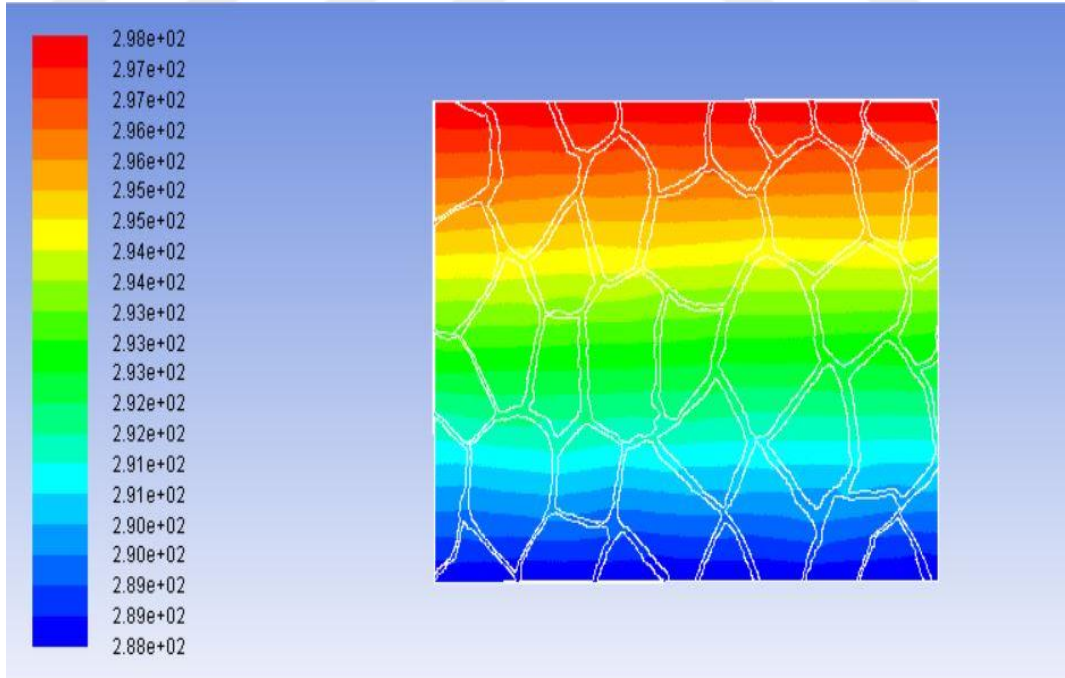
Şekil B.17. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=30 °C)



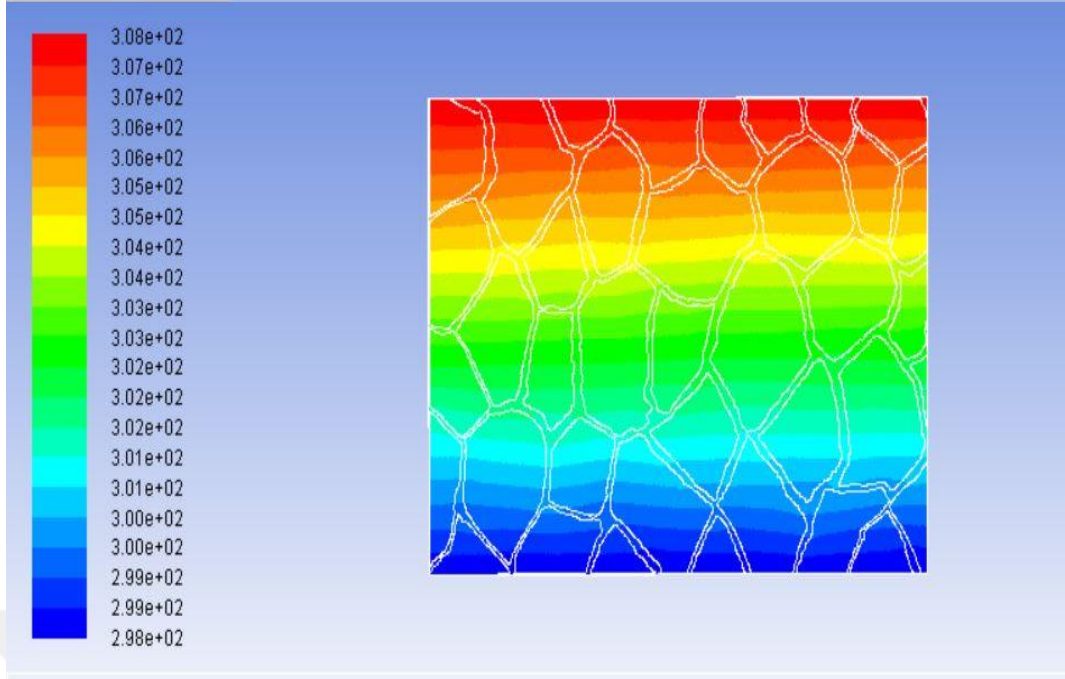
Şekil B.18. 16 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=40 °C)



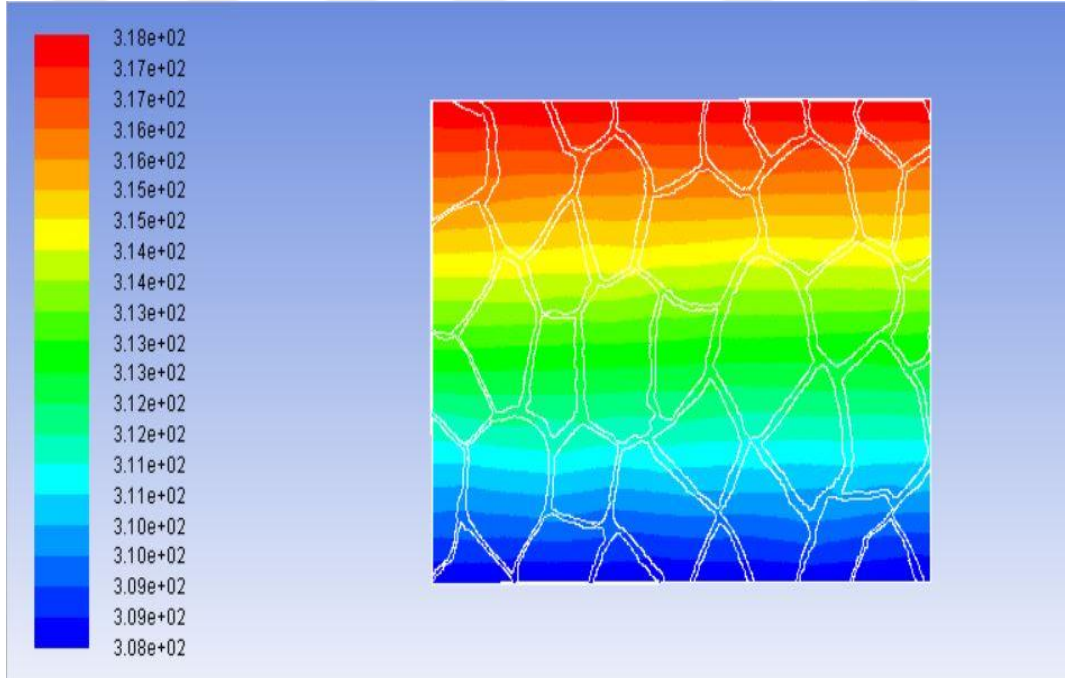
Şekil B.19. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=10 °C)



Şekil B.20. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=20 °C)



Şekil B.21. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=30 °C)



Şekil B.22. 21 kg/m³ yoğunluğa sahip EPS'nin y-doğrultusundaki sıcaklık dağılımı (T_{ort}=40 °C)