

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

EXPANDED POLYSTYRENE STYROFOAM (EPS)  
ISI YALITIM MALZEMELERİNDE GÖZENEKLİLİĞİN  
ISIL İLETKENLİĞE ETKİSİNİN  
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

Murat Kadir YEŞİLYURT

TEMMUZ 2013

**Makine Anabilim Dalında** Murat Kadir YEŞİLYURT tarafından hazırlanan EXPANDED POLYSTYRENE STYROFOAM (EPS) ISI YALITIM MALZEMELERİNDE GÖZENEKLİLİĞİN ISIL İLETKENLİĞE ETKİSİNİN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Yahya DOĞU  
Anabilim Dalı Başkanı

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

Prof. Dr. İbrahim UZUN  
Danışman

*Jüri Üyeleri*

Başkan : Prof. Dr. Ali ERİŞEN \_\_\_\_\_  
Üye (Danışman) : Prof. Dr. İbrahim UZUN \_\_\_\_\_  
Üye : Prof. Dr. Yahya DOĞU \_\_\_\_\_  
Üye : Yrd. Doç. Dr. Tanzer ERYILMAZ \_\_\_\_\_  
Üye : Yrd. Doç. Dr. Battal DOĞAN \_\_\_\_\_

.../.../2013

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

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

# ÖZET

## EXPANDED POLYSTYRENE STYROFOAM (EPS) ISI YALITIM MALZEMELERİNDE GÖZENEKLİLİĞİN ISIL İLETKENLİĞE ETKİSİNİN DENEYSSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

YEŞİLYURT, Murat Kadir

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Prof. Dr. İbrahim UZUN

Temmuz 2013, 169 sayfa

Sürekli artan enerji kullanımı ve bu kullanım sırasında oluşan kayıpları önlemek açısından yalıtım uygulamaları kaçınılmaz bir hale gelmektedir. Özellikle enerji kayıplarının çok fazla olduğu yerler olan binalara uygulanacak yalıtım uygulamalarında düşük ısı iletkenlik, yüksek mukavemet ve kolay uygulanabilirliği açısından sentetik bir yalıtım malzemesi olan Expanded Polystyrene Styrofoam (EPS) büyük oranda tercih edilmektedir. EPS üretim aşamasında içyapısında oluşan gözenekler sayesinde mükemmel bir ısı yalıtımı sağlamaktadır. Yalıtım malzemelerinin efektif ısı iletkenlik değerleri gözeneklilik oranına ve gözeneklerin dağılımına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle ısı transferi hesaplamalarında gerçek mikro ve makro görüntülerin kullanılması ısı geçişinin açıklanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada gerçek mikro ve makro görüntüler kullanılarak EPS'nin efektif ısı iletkenlik değeri Fluent 6.3.26 paket programı ile tespit edilmiştir. Sayısal olarak bulunan bu değerler deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sayısal olarak elde edilen efektif ısı iletkenlik değerleri deneysel sonuçlara göre 18, 22 ve 32 kg/m<sup>3</sup> için sırasıyla %8,1, %10,7 ve %11,6 hata payı göstermiştir. Bu hata oranı da malzemenin içyapısının homojen olmayışı ve modelin 3 boyutlu olarak tasarlanamamasından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma ile EPS yalıtım

malzemelerinin efektif ısı iletkenlik değeri mikro ve makro görüntüleri kullanılarak sayısal olarak tespit edilebileceği, ayrıca EPS ısı yalıtım malzemelerinde gözeneklerinde ısı geçişinin hangi yollar ile gerçekleştiği bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** EPS, Efektif Isıl İletkenlik, Gözeneklilik

## ABSTRACT

### THE STUDY ABOUT NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION HOW THE EFFECT OF POROSITY THROUGH THERMAL CONDUCTIVITY IN EXPANDED POLYSTYRENE STYROFOAM (EPS) HEAT INSULATION MATERIALS

YESILYURT, Murat Kadir

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Machine, Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ibrahim UZUN

July 2013, 169 pages

The ever increasing use of energy and in order to avoid these losses that occur during the use of insulation applications are becoming inevitable. In particular, there is a lot of energy losses in the buildings insulation to be applied in low thermal conductivity, high strength and easy in terms of the applicability of a synthetic Expanded Polystyrene Styrofoam insulation material (EPS) is highly preferred. EPS's production stage, through the pores of the internal structure provides excellent thermal insulation. Effective thermal conductivity of insulation materials varies depending on the porosity ratio and the distribution of pores. Therefore the use of heat transfer calculations real micro and macro images play an important role. In this study, using real images of micro and macro effective thermal conductivity of EPS were determined by quantitative Fluent 6.3.26 software package. Also this values have been compared with experimental studies. Numerical experimental results of the effective thermal conductivity values showed for densities of 18, 22, 32 kg/m<sup>3</sup> respectively 8,1%, 10,7% and 11,6% margin of error. This error is caused by the lack of homogeneous in the internal structure of the material and the lack of designing three dimensional the model. In this study, the effective thermal conductivity value

of EPS insulation materials by using micro and macro images can be identified numerically, as well as ways in which heat transfer through the pores of EPS heat insulation materials has occurred.

**Key Words:** EPS, Effective Thermal Conductivity, Porosity.

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanması esnasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve biz genç araştırmacılara büyük destek olan, bilimsel deney imkânlarını sonuna kadar bizlerin hizmetine veren, tez yöneticisi hocam, Sayın Prof. Dr. İbrahim UZUN'a, tez çalışmalarım esnasında, bilimsel konularda daima yardımını gördüğüm hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Zühtü PEHLİVANLI'ya, Sayın Yrd. Doç. Dr. Battal DOĞAN'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Tanzer ERYILMAZ'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Tarık DANIŞMAN'a, büyük fedakârlıklarla bana destek olan değerli eşim Sebanur YEŞİLYURT'a ve son olarak bana birçok konuda olduğu gibi, tezimi hazırlamam esnasında da maddi manevi desteklerini esirgemeyen anneme, babama ve canım kardeşim Betül'e sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

2013, KIRIKKALE

Mak. Müh. Murat Kadir YEŞİLYURT

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>SİMGELER DİZİNİ</b> .....	xix
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xxi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	9
2.1. Isı Yalıtımı .....	9
2.1.1. Isı Yalıtım Malzemeleri .....	10
2.1.1.1. Mantar .....	14
2.1.1.2. Keçe .....	15
2.1.1.3. Odun Talaşı Levhalar .....	15
2.1.1.4. Koyunyünü .....	15
2.1.1.5. Perlit .....	16
2.1.1.6. Cam Yünü .....	16
2.1.1.7. Taş Yünü .....	18
2.1.1.8. Cam Köpüğü .....	19
2.1.1.9. Alüminyum Silis .....	20



2.1.1.10. Kalsiyum Silikat .....	21
2.1.1.11. Asbest .....	21
2.1.1.12. Vermikülit .....	22
2.1.1.13. Poliüretan Köpük .....	23
2.1.1.14. Elastomerik Kauçuk .....	24
2.1.1.15. Polietilen Köpük .....	25
2.1.1.16. Fenol Köpüğü .....	26
2.1.1.17. Melamin Köpük .....	27
2.1.1.18. Polivinilklorür Köpük .....	27
2.1.1.19. Extrude Polistiren Sert Köpük (XPS) .....	28
2.1.1.20. Expande Polistiren Sert Köpük (EPS) .....	29
2.2. Isıl İletkenlik Değeri .....	37
2.2.1. Isı İletkenlik Değerinin Belirlenmesi .....	42
2.2.1.1. Isıl İletkenlik Değerinin Teorik Olarak Belirlenmesi .....	43
2.2.1.2. Isıl İletkenlik Değerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi .....	52
2.2.1.2.1. Kararlı Rejimde Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi ..	53
2.2.1.2.2. Geçici Rejimde Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi ...	56
<b>3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR .....</b>	<b>62</b>
3.1. Sayısal Çalışmalar .....	62
3.1.1. Isıl İletkenlik Değerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi .....	63
3.1.1.1. Matlab Görüntü Analizi .....	68
3.1.1.2. Sınır Şartlarının Belirlenmesi .....	72
3.1.1.3. Sabit Sıcaklık Sınır Şartı Çözümleri .....	75
3.1.2. Isı Transferi Denklemlerinin Sayısal Olarak Çözümü .....	85
3.2. Deneysel Çalışmalar .....	100
<b>4. SONUÇ VE TARTIŞMA.....</b>	<b>105</b>

<b>KAYNAKLAR</b> .....	108
<b>EKLER</b> .....	116
EK A.1. Makro Yapılara Ait Işık Mikroskobu Görüntüleri .....	116
EK B.1. Mikro Yapılara Ait Elektron Mikroskobu Görüntüleri .....	122
EK C.1. Görüntü Analizi İle Gözeneklilik Tespiti Ve Gambit Modelleri ...	132
EK D.1. Havanın Termofiziksel Özellikleri .....	138
EK D.2. Polistirenin Termofiziksel Özellikleri .....	139
EK E1.1. 18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Analizi.....	140
EK E1.2. 18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Makro Yapı Analizi .....	144
EK E2.1. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Analizi .....	149
EK E2.2. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Makro Yapı Analizi .....	153
EK E3.1. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Analizi.....	158
EK E3.2. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Makro Yapı Analizi .....	162
EK F1. 18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Sayısal Sonuçlar .....	167
EK F2. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Sayısal Sonuçlar .....	168
EK F3. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Sayısal Sonuçlar .....	169

# ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bakalitli Cam Yünü İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri .....	17
2.2. Düşük Yoğunluklu Taş Yünü İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri .....	19
2.3. Alüminyum Oksit Miktarlarına Göre Maksimum İşletme Sıcaklıkları .....	20
2.4. Alüminyum Silis İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri.....	21
2.5. Vermikülit İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri.	23
2.6. Poliüretanlar İçin Çeşitli Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri.....	24
2.7. Elastomerik Kauçuk Köpüğü İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri .....	25
2.8. Polietilen Köpük İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri.....	26
2.9. Fenol Köpük İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri	26
2.10. Melamin Köpük İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri.....	27
2.11. PVC Köpük İçin 10 °C Sıcaklığa Ait Isıl İletkenlik Değerleri .....	28
2.12. Extrude Polistiren İçin Isıl İletkenlik Değerleri .....	29
2.13. EPS İçin Mekanik Özellikler .....	37
2.14. Çeşitli Sistemler İçin A Değerleri .....	48
2.15. Çeşitli Sistemler İçin $\Phi_m$ Değerleri.....	49

2.16. Kullanımı Yaygın Kararlı Rejim Teknikleri .....	54
2.17. Kullanımı Yaygın Optik Esasa Dayalı Yöntemler .....	57
2.18. Kullanımı Yaygın Optik Esasa Dayalı Yöntemler .....	58
3.1. Yoğunluğa Göre Gözeneklilik Oranları .....	72
3.2. Mikro Yapıda Oluşturulan Hücre Sayıları, Düğüm Noktaları ve Boyutları	73
3.3. Makro Yapıda Oluşturulan Hücre Sayıları, Düğüm Noktaları ve Boyutları	75
3.4. EPS'nin TS EN 13163 Standardına Göre Hesaplanan Isıl İletkenlik Değerleri.....	95
3.5. 18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Makro Yapı Analiz Sonuçları.....	96
3.6. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Makro Yapı Analiz Sonuçları.....	97
3.7. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Makro Yapı Analiz Sonuçları.....	98
F.1. 18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Mikro Yapı Analiz Sonuçları .....	167
F.2. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Mikro Yapı Analiz Sonuçları .....	168
F.3. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Mikro Yapı Analiz Sonuçları .....	169

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bazı Malzemelerin Isıl İletkenlik Değerleri.....	12
2.2. Bazı Malzemelerin Su Buharı Difüzyon Direnç Katsayıları .....	13
2.3. Mantar Yalıtım Malzemesi .....	14
2.4. Çeşitli Koyunyünü Malzemeler .....	16
2.5. Çeşitli Cam Yünü Malzemeler (Levha, Şilte, Boru).....	17
2.6. Taş Yününden Elde Edilmiş Yalıtım Levhası.....	18
2.7. Cam Köpüğünden Elde Edilmiş Çeşitli Malzemeler .....	19
2.8. Vermikülit Madeni ve Yalıtım Levhası .....	22
2.9. Poliüretan Malzeme Örnekleri .....	24
2.10. XPS Yalıtım Malzemesinin 50X Resmi ve Modellemesi.....	28
2.11. 33 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip XPS'nin SEM Görüntüsü .....	29
2.12. Çeşitli Genleştirilmiş Polistiren Levha Örnekleri .....	30
2.13. Monomer Haldeki Stirenin Polimerizasyonu.....	30
2.14. EPS Kalıp Basma Yöntemiyle Üretilmiş Ürünler.....	31
2.15. Blok Kalıplama Tekniğiyle Üretilmiş Ürün.....	32
2.16. EPS Üretim Aşaması.....	33
2.17. EPS Ürünlerinde ve Isı Yalıtım Levhalarında Isıl İletkenlik Değerinin Yoğunluk İle Değişimi .....	34
2.18. Maddelerin Değişik Fazları İçin Isıl İletkenlik Değerleri .....	38
2.19. Bazı Gazların Isıl İletkenlik Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi .....	38

2.20. Sıvı Maddelerin Isıl İletkenlik Değerleri .....	39
2.21. Bazı Metallerin Isıl İletkenlik Değerleri .....	40
2.22. Bazı Yalıtım Malzemelerinin Isıl İletkenlik Değerleri .....	41
2.23. Bazı Yalıtım Malzemelerinin Isıl İletkenlik Değerleri.....	42
2.24. Açık Hücreli Yalıtım Malzemelerinin SEM Görüntüsü .....	43
2.25. EPS'lerde Makro ve Mikro Gözeneklerin SEM Görüntüsü .....	44
2.26. Hücreler Arası Boşluğun Kesit Görüntüsü .....	45
2.27. Russel Efektif Isıl İletkenlik Modelleri.....	50
2.28. Klasik Isı Akısı Ölçer.....	55
2.29. Muhafazalı Levha Deney Sisteminin Genel Görünüşü.....	55
2.30. Kalibreli Sıcak Kutu Yöntemi.....	56
2.31. LFA – 457 Lazer Flaş Deney Düzeneği.....	59
2.32. Kızgın Tel Metodu .....	60
2.33. Disk Isı Kaynaklı Ölçüm Cihazı .....	61
3.1. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS SEM Görüntüsü .....	63
3.2. Üretilen Bazı EPS Yalıtım Levhaları .....	64
3.3. Çalışma İçin EPS Numunelerinin Kesilmesi .....	64
3.4. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluk Değerine Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü .....	65
3.5. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluk Değerine Sahip EPS' nin Mikro Görüntüsü .....	66
3.6. 18 kg/m <sup>3</sup> ve 22 kg/m <sup>3</sup> X1000 Mikro Yapı Görüntüsü .....	67
3.7. Sayısal Çalışmalar Kapsamında Uygulanacak Aşamalar .....	69
3.8. EPS Yalıtım Malzemesinin Matlab Görüntü Analizi.....	70
3.9. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Ait Makro Yapının Görüntü Analizi.....	71
3.10. Gambit Programında Oluşturulan Bölgeler .....	73
3.11. Makro Yapıya Ait Gambit Görüntüsü.....	74
3.12. Daire Gözeneğe Sahip Numunenin Isı İletimi Çözümü.....	75

3.13. Daire Gözeneğe Sahip Numunenin Bousinesq Yaklaşımı Çözümü .....	75
3.14. Daire Gözeneğe Sahip Numunenin Hız Vektörleri.....	76
3.15. Rastgele Gözeneğe Sahip Numunenin Isı İletimi Çözümü.....	77
3.16. Rastgele Gözeneğe Sahip Numunenin Bousinesq Yaklaşımı Çözümü .....	77
3.17. Rastgele Gözeneğe Sahip Numunenin Hız Vektörleri.....	78
3.18. Doğal Taşınımında Hız ve Sıcaklık Sınır Tabakalarının Gösterimi .....	81
3.19. Çözüm İçin Gerekli Sınır Koşulları .....	83
3.20. Makro Görüntünün Sınır Şartları .....	84
3.21. 278 K Ortalama Sıcaklığa Ait Isı İletimi Çözümü.....	86
3.22. Mikro Gözenekli Yeni Malzemenin Isıl İletkenlik Değerinin Sıcaklık İle Değişimi.....	86
3.23. Makro Gözeneğe Sahip Modelin Isı İletimi Çözümü .....	87
3.24. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Efektif Isıl İletkenlik Değeri.....	88
3.25. Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Mikro Modelin Hız Şiddetleri.....	89
3.26. Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Mikro Modelin Akım Fonksiyonları.....	89
3.27. Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Makro Modelin Hız Şiddetleri.....	90
3.28. Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Makro Modelin Hız Şiddetleri.....	90
3.29. Karbon Takviyeli EPS Baloncukları ve Isıl İletkenlik Değerleri.....	92
3.30. 14 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Karbon Takviyeli EPS'nin Makro Görüntüsü	92
3.31. Beyaz ve Karbonlu EPS Örnekleri.....	93
3.32. 18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması	96
3.33. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması	97

3.34.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması	98
3.35.	Farklı Üreticilerden Alınan Numunelerin Deneysel Analiz Sonuçları.....	99
3.36.	Farklı EPS Türlerinin Karşılaştırılması.....	99
3.37.	FOX 314 Çalışma Prensibi Şematik Gösterimi .....	100
3.38.	Beyaz ve Karbon Takviyeli Numune Örnekleri.....	101
3.39.	Deneysel İçin Kullanılan Fox 314 Cihazı .....	101
3.40.	Karbonlu 14 kg/m <sup>3</sup> Numunesi.....	103
3.41.	18 kg/m <sup>3</sup> EPS Numunesi.....	103
3.42.	22 kg/m <sup>3</sup> EPS Numunesi.....	103
3.43.	28 kg/m <sup>3</sup> EPS Numunesi.....	103
3.44.	32 kg/m <sup>3</sup> EPS Numunesi.....	104
3.45.	Isıl İletkenliğin Yoğunluk İle Değişimi .....	104
3.46.	Deneysel ve Hesap Değerlerinin Karşılaştırılması .....	104
3.47.	Ortalama 10 °C Sıcaklıkta Deneysel ve Sayısal Çözüm Sonuçları.....	104
A.1.	14 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Karbon Takviyeli EPS'nin Makro Görüntüsü	116
A.2.	16 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü.....	117
A.3.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü.....	118
A.4.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü.....	119
A.5.	24 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü.....	120
A.6.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü.....	121
B.1.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X35 Mikro Görüntüsü .....	122
B.2.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü .....	122
B.3.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü .....	123
B.4.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü .....	123
B.5.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü .....	124
B.6.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X600 Mikro Görüntüsü .....	124



B.7.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1000 Mikro Görüntüsü .....	125
B.8.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü .....	125
B.9.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X35 Mikro Görüntüsü .....	126
B.10.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü .....	126
B.11.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü .....	127
B.12.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü .....	127
B.13.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1000 Mikro Görüntüsü .....	128
B.14.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü .....	128
B.15.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X35 Mikro Görüntüsü .....	129
B.16.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü .....	129
B.17.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü .....	130
B.18.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü .....	130
B.19.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X600 Mikro Görüntüsü .....	131
B.20.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü .....	131
C.1.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntü Analizi .....	132
C.2.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Gambit Modeli.....	132
C.3.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü .....	133
C.4.	18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Mikro Görüntü Analizi ve Gambit Modeli .....	133
C.5.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntü Analizi .....	134
C.6.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Gambit Modeli.....	134
C.7.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1000 Mikro Görüntüsü .....	135
C.8.	22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Mikro Görüntü Analizi ve Gambit Modeli .....	135
C.9.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntü Analizi .....	136
C.10.	32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Gambit Modeli.....	136

C.11. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü .....	137
C.12. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Mikro Görüntü Analizi ve Gambit Modeli .....	137
D2.1. Isıl İletkenlik Değerinin Sıcaklık İle Değişimi .....	139
D2.2. Yoğunluğun Sıcaklık İle Değişimi .....	139
D2.3. Özgül Isının Sıcaklık İle Değişimi .....	139
E1.1. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü .....	140
E1.2. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü.....	140
E1.3. Ortalama 278 K sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri .....	141
E1.4. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri.....	141
E1.5. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	142
E1.6. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri .....	142
E1.7. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri .....	143
E1.8. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü.....	143
E1.9. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	144
E1.10.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü .....	144
E1.11.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü.....	145
E1.12.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri.....	145
E1.13.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri.....	146
E1.14.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	146
E1.15.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri .....	147
E1.16.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri .....	147
E1.17.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü.....	148
E1.18.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	148
E2.1. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü .....	149
E2.2. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü.....	149

E2.3. Ortalama 278 K sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri .....	150
E2.4. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri.....	150
E2.5. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	151
E2.6. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri .....	151
E2.7. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri .....	152
E2.8. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü.....	152
E2.9. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	153
E2.10.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü .....	153
E2.11.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü.....	154
E2.12.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri.....	154
E2.13.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri.....	155
E2.14.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	155
E2.15.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri .....	156
E2.16.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri .....	156
E2.17.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü.....	157
E2.18.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	157
E3.1. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı iletimi Çözümü .....	158
E3.2. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü.....	158
E3.3. Ortalama 278 K sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri .....	159
E3.4. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri.....	159
E3.5. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	160
E3.6. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri .....	160
E3.7. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri .....	161
E3.8. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü.....	161
E3.9. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	162
E3.10.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü .....	162

E3.11.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü.....	163
E3.12.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri.....	163
E3.13.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri.....	164
E3.14.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	164
E3.15.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri .....	165
E3.16.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri.....	165
E3.17.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü.....	166
E3.18.Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri .....	166
F.1. 18 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması .....	167
F.2. 22 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması .....	168
F.3. 32 kg/m <sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması .....	169

## SİMGELER DİZİNİ

$r_k$	Kritik Yarıçap
$h, t$	Kalınlık
$k, k_x, k_{yt}, \lambda$	Isıl İletkenlik Değeri
$k_{eff}$	Efektif Isıl İletkenlik Değeri
$\mu$	Su Buharı Difüzyon Direnç Katsayısı
$\dot{q}$	Isı Akısı
$r$	Yarıçap
$x, y, z$	Kartezyen Koordinatlar
$T$	Sıcaklık
$\rho$	Yoğunluk
$t_{1/2}$	Isı Transfer Yarı Süresi
$t$	Zaman
$u, v, w$	Kartezyen Koordinatlar Hız Bileşenleri
$pH$	Asit Miktarı
$F_x$	Dış Kuvvet
$R$	Genel Gaz Sabiti
$\chi$	Adyabatik Üst
$N_L$	Losschmidt Sayısı
$d$	Molekül Çapı
$c_v$	Sabit Hacimde Özgül Isı
$\eta$	Dinamik Viskozite
$k_e$	Elektronik Bileşen
$n$	Boyut

$k_l$	Kafes Bileşeni
$\phi, \phi_m$	Gözeneklilik Oranı
$k_f, \lambda_f$	Gözenek Isıl İletkenliği
$k_m, \lambda_s$	Malzeme Isıl İletkenliği
F	Ortalama Sıcaklık Gradyeni Oranı
$g_i$	Elips Yarı Asal Ekseni
$R_d$	Isıl Direnç
$K_E$	Einstein Sabiti
$k_m$	Sürekli Fazın Isıl İletkenlik Değeri
$k_f$	Süreksiz Fazın Isıl İletkenlik Değeri
Q	Isı Transfer Miktarı
h	Entalpi
$S_h$	Kimyasal Reaksiyon Isısı
J	Difüzyon Akısı
A	Alan
$T_{ref}$	Referans Sıcaklık
h	Isı Taşınım Katsayısı
$\sigma$	Stefan – Boltzman Sayısı
$\varepsilon$	Emissivite Değeri
$\beta$	Isıl Genleşme Katsayısı
P	Basınç
$\dot{q}$	Isı Üretimi
$\Delta T$	Sıcaklık Farkı
$T_{alt}, T_{üst}, T_{sol}, T_{sağ}$	Yüzey Sıcaklıkları
$\gamma_e$	Euler Sabiti

## KISALTMALAR DİZİNİ

EPS	Expanded Polystyrene Styrofoam
EMT	Efektif Ortalama Teorisi
ISO	Uluslararası Standartlar Örgütü
CEN	Avrupa Standardizasyon Komitesi
PVC	Polivinilklorür
XPS	Extrude Polystyrene Styropor
SEM	Scanning Electron Microscope
EMPT	Efektif Ortalama Süzülme Teorisi
AC	Alternatif Akım
DO	Discrete Ordinates
DİE	Devlet İstatistik Enstitüsü

# 1. GİRİŞ

Ülkelerin enerjiye olan gereksinimleri; nüfus artışı, sanayileşme ve daha fazla enerji tüketen aletlerin ortaya çıkmasının bir sonucu olarak sürekli artış göstermektedir. Sınırlı seviyede bulunan enerji kaynakları da hızlı bir şekilde tüketildiğinden enerjinin verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Ülkemizde 1999 yılından günümüze kadar enerji krizi yaşanmaktadır. Yerli kaynaklı enerji üretimimizin tüketimi karşılama oranı ise %30 olup, 2020'de %25'e düşeceği tahmin edilmektedir. DİE 1999 verilerine göre enerji tüketimi dağılımı, % 37 sanayi, % 32 konut, %23 ulaşım, %5 tarım ve %3 diğer sektörlerinde olmuştur. DİE 2009 verilerine göre ise enerji tüketimi dağılımı, ortalama %41'i konutların ve yapıların ısıtılmasında, %33'ü sanayide, %20'si ulaşımda, %5'i tarımda ve %1'i diğer alanlarda kullanıldığı düşünülürse konutlarda yapılacak tasarruf büyük önem kazanmaktadır. On yıllık veriler göz önüne alındığında konutlarda tüketilen enerji oranındaki yükseliş dikkatle incelenmesi gerekmektedir. Konutlardaki enerji sarfiyatının %80'i ısıtma gayesiyle harcanması yanında sanayide lojmanların, sosyal tesislerin ve idare binalarının ısıtılmaları da göz önüne alındığında ısıtma amaçlı ısı yalıtımı daha da önem kazanmaktadır.

Yalıtım, herhangi bir yalıtım malzemesi kullanılarak, ortamdan dışarı olan enerji akışının azaltılmasıdır. Yalıtım malzemeleri kullanım alanlarına göre elektrik akışını önlemek için, ses dalgalarını önlemek için ve ısı akışını önlemek için kullanılırlar. Isı yalıtımı, enerji ve çevre ile olan ilişkisinden dolayı, en yaygın ve önemli yalıtım konusudur. Yaygınlığı; uygulamadan hemen sonra tasarruf sağlaması, dolayısıyla ekonomik katkısından kaynaklanmaktadır. Teknik olarak ısı yalıtımı; farklı sıcaklıktaki iki ortam arasında, ısı geçişini azaltmak için yapılan işlemlerdir. Isı; yüksek sıcaklıklı ortamdan, düşük sıcaklıklı ortama doğru hareket eder. Binalar söz konusu olduğunda, yalıtımsız veya eksik yalıtımlı mekânlarda, duvar ve pencere gibi binaların yüzey sıcaklıkları düşüktür ve sıcak hava soğuk yüzeylere doğru hareket eder. İçeride yeterli konfor ortamının sağlanabilmesi için ya kaybolan ısının bir ısıtma sistemi ile karşılanması ya da ısı kaybının azaltılması gerekir. Isı kaybını azaltmak ancak ısı yalıtımı ile mümkün olmaktadır. Buradan hareketle ısı yalıtımı; sıcak ortamlarda ısı kaybını, soğuk ortamlarda ise ısı kazancını sınırlandıran direnç



olarak adlandırılabilir. Isı yalıtımı yaparak binanın ömrünü uzatmak, kullanıcıya sağlıklı, konforlu mekânlar sunabilmek ve bina kullanım aşamasında yakıt ve soğutma giderlerinde büyük kazanım sağlamak mümkün olmaktadır.

Enerji kaynakları tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de büyük bir bölümü ısıtma ve soğutma ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan binaların en önemli amaçlarından biri ısı konforu sağlamalarıdır. Buna karşın büyük bir sorun olmaya başlayan enerji krizi konforlu bir yaşam sağlamaya engel teşkil etmektedir. Bu nedenle ısı konfor şartlarını sağlama açısından minimum ısıtma enerjisi kullanımı en ideal çözüm olacaktır. Binaların yaklaşık enerji tüketimi toplam enerji tüketiminin üçte birini oluşturduğu düşünülürse bu oranın düşmesi için alınacak en iyi önlemin yalıtım olacağı kaçınılmazdır.

Toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmını kapsayan binalar için yalıtım konusundaki çalışmalar hız kazanmış ve büyük bir pazar oluşmuştur. Bununla beraber enerji tüketimindeki düşüş insanlar açısından da yalıtıma bakış açılarını değiştirmiştir. Yalıtımın temel amaçlarından birisi binaların dış ortamla temas içinde olduğu yerlerden gerçekleşen ısı kayıplarını önlemek ve ısıyı bina içerisinde tutabilmektir. Bu amaçla kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı özellikleri kesin olarak bilinmesi gerekmektedir. Yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği ne kadar düşük olursa ısı geçişi o kadar az gerçekleşecek ve bu duruma bağlı olarak enerji ihtiyacı minimum seviyeye inecektir. Isı iletkenliğinin düşük olduğu malzemelerin enerji tüketimi konusunda ne kadar önemli bir rol oynadığı ortaya çıkmaktadır.

Yalıtım malzemeleri kökeni bakımından organik, inorganik ve sentetik olmak üzere çeşitli sınıflara ayrılırlar. Bu tez kapsamında sentetik bir ısı yalıtım malzemesi olan EPS (Expanded Polystyrene Styrofoam) kullanılacaktır. Bu malzemenin yapısı gereği ihtiva ettiği gözenekleri incelemek için elektron mikroskobu ve ışık mikroskobu yardımı ile mikro ve makro görüntüler elde edilecektir. EPS'nin içyapısı incelenecek ve ısı iletkenliği doğrudan etkileyen bir faktör olan gözenekliliğin ısı iletkenliğe olan etkileri araştırılacaktır. Gözenekli malzemelerde gözenek miktarına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri düşmekte ve daha iyi bir yalıtım özelliği sağlanmaktadır. Bunun asıl nedeni gözenek yapısında bulunan kuru havanın ısı iletkenlik değerinin oldukça düşük olmasıdır.

EPS malzemesinin içyapısında bulunan gözenekler uygun tekniklerle tespit edilecek ve ısı iletkenliğinin gözenekliliğe göre değişimi deneysel olarak bulunacaktır.

Aynı zamanda gözenek boyutuna ve şekline bağlı olarak bilgisayar ortamında analiz çalışmaları yapılacaktır. Analiz çalışmaları farklı gözeneklilik değerlerine sahip numuneler için 6 farklı sıcaklık değerinde tekrar edilecektir. Böylece ısı iletkenliğin yoğunluk ve sıcaklık ile nasıl değiştiği tespit edilecektir. Bununla beraber literatürde bulunan çalışmalar ile deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılacaktır. EPS yalıtım malzemeleri konusunda yapılan çalışmaların yetersiz kalması ve bu malzemelerin modelleme zorlukları göz önünde bulundurulacak ve çeşitli indirgemeler yapılarak model basitleştirilecektir. Bu kapsamda yapılan çalışma EPS'nin içyapısı hakkında bilgi vermesi, modellenmesi, ısı iletkenliğinin belirlenmesi ve kullanılabilirliğini artırmak için büyük önem arz etmektedir. Literatürde bulunan çalışmalarda EPS ısı yalıtım malzemelerinin çok fazla çalışılmadığı bu nedenden dolayı da bu konuda eksikliklerin olduğu görülmektedir. Literatürde bulunan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir:

Deniz [1]; çalışmasında yaygın olarak kullanılmakta olan dolgu malzemelerine alternatif olabilecek ve daha önce iç dolgu malzemesi olarak kullanılmamış bir malzeme belirleyerek bu malzemenin ısı iletkenlik değeri, yoğunluğu, gözenekliliği, gözenek dağılımı, pH değeri, malzemeyi oluşturan bileşenlerin miktarı gibi özelliklerini incelemiştir. Bununla beraber gözeneklilik için bir model oluşturarak literatürdeki modellerle karşılaştırmasını yapmıştır.

Akbulut [2]; öncelikle gözeneklilik hakkında teorik bilgi vermiş, daha sonra gözenekli ortamda etkin ısı iletkenliğinin tespiti konusunda yapılan çalışmaları özetlemiştir. Daha sonra suni olarak elde edilen gözenekli ortamlar ve piyasada hazır olarak bulunan sert polistiren köpük levhalar üzerinde ölçümler yapmıştır. Bu ölçümleri kartezyen koordinatlarda, ısı üretimi olmayan, sürekli rejim halindeki sistemler için ısı iletimi denkleminde faydalanarak değerlendirmiştir. Ayrıca deneylerle elde edilen sonuçları daha önce önerilmiş matematik modelleri kullanarak karşılaştırmıştır.

Baysal [3]; yaptığı tez çalışmasında silindirik elyaf ve tanecik katkılı karma malzemelerin efektif ısı iletkenlik değerlerini incelemiştir. Düşük hacim oranlarında silindirik lif takviyeli ve küresel tanecik katkılı, izotropik sürekli bir matristen oluşan karma malzemelerde, matris–elyaf ara yüzeyinde ara yüzey temassızlık direncinin de göz önüne alındığı durumda, efektif ısı iletkenlik değerinin hesaplanması için yeni bir matematik model geliştirmiştir. Verilen herhangi bir karma malzeme için, belirli

ısı iletkenlik ve elyaf hacim oranı değerleri göz önünde bulundurularak geliştirilen matematik modelde elde edilen efektif ısı iletkenlik değerleri ile problemi aynı ısı iletkenlik ve elyaf hacim oranı değerleri için üç boyutlu sayısal olarak çözen bir bilgisayar paket programında elde edilen efektif ısı iletkenlik değerleriyle karşılaştırmıştır. Aradaki farkın  $\% \pm 5$ 'i geçmediği aralıkları, bir boyutlu ısı iletimi kabulünün geçerli olduğu durum olarak belirlemiştir.

Devecioğlu [4]; Anadolu'nun birçok yöresinde bina yapı elemanı olarak kullanılan gözenekli yapı taşlarında ısı iletkenlik değerinin teorik ve deneysel olarak tespiti için çalışmalar yapmıştır. Teorik alışma bölümünde, gözenekli taşın ısı iletkenlik değerinin hesaplanmasında kullanılacak matematiksel bir model geliştirerek taş içerisinde rast gele dizilmiş ve karmaşık geometriye sahip gözeneklerin, küp şeklinde olduğunu kabul ederek, yapıdaki gözeneklerin hacimsel olarak toplam büyüklükleri gözeneklilik parametresi olarak tanımlamıştır. Gözeneklilik parametresinin hesabında yoğunluk yöntemini kullanarak çözüme gitmiştir. Deneysel alışma bölümünde, geliştirilen matematiksel bağıntının kullanılabilirliğini araştırmak üzere, ısı iletkenlik değerinin teorik ve deneysel sonuçlarını karşılaştırarak matematiksel modelin kullanılabilirliğini incelemiştir.

Altun ve Gürkan [5]; yaptıkları çalışmada gözenekli malzemelerde ısı transfer katsayısının ve kritik yarıçapın değişimini literatürdeki çalışmaları dikkate alarak incelemişlerdir. alışmalarında gözenekli malzeme ile yalıtılmış, çapraz akışa maruz yatay silindirde ısı transferinin doğal taşınım yoluyla olduğu kabul ederek sıcaklığın ve ısı transfer katsayısının hem radyal hem de teğetsel yöndeki değişimlerini tespiti üzerine araştırmalar yapmışlardır. Ayrıca silindirin etrafını kuşatan havadaki doğal taşınım ve yalıtım katmanındaki ısı iletim problemini aynı anda çözmüşlerdir. Elde ettikleri sonuçlardan klasik hesaplamalardan bulunan  $r_k = k_{yl}/h$  şartının dış yarıçapın ve yüzey evre sıcaklık farkının her ikisinin de doğal taşınım ısı transfer katsayısına bağlılığı ihmal edildiği için daima gerçek kritik yarıçap değerinden daha büyük değerler verdiğini gözlemlemişlerdir.

Yüksel ve Avcı [6]; gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenliğinin modellenmesine ve/veya tahminine yönelik literatürde mevcut çalışmaları incelemişlerdir. Bu alışmaları, literatürde tespit edilen ve farklı uygulamaları kapsayan bazı deneysel sonuçları dikkate alarak analiz etmişlerdir. Sonuçları tablo halinde vermişler ve modeller, uygulanabilirlik aralığı, kullanım kolaylığı ile değişik

parametrelerin etkileri açısından değerlendirmişlerdir. Sonuçta genel olarak kullanılabilir bağıntılar elde etmek yerine belirli yapılarda ve belirli gözeneklilik aralığında sınırlı bir hata toleransı ile kullanılabilir bağıntıları seçmenin önem kazandığı ve özellikle yüksek sıcaklığın efektif ısı iletkenliğine etkisinin çalışılması gerektiği sonucuna varmışlardır.

Demir ve arkadaşları [7]; çalışmalarında ponza agregalı hafif beton blok özelliklerine uçucu kül ve taneli polistiren köpük katkısının etkilerini araştırmışlardır. Hazırlanan karışımlarda TS 802 standardına göre, çimento dozajı 300 olacak şekilde malzeme miktarlarını belirleyerek örnekleri 100 x 100 x 100 mm<sup>3</sup> lük metal kalıplara vibrasyon yöntemiyle yerleştirmişler ve 24 saat sonra kalıptan çıkarmışlardır. Örneklere atmosferik buhar basıncında 6 saat süre ile buhar kürü uygulamışlardır. Strafor tanesi katkılı pomza blok örneklerde uçucu kül ikame oranının artması örneklerin basınç dayanımını arttırıcı bir etki oluşturmuştur. Karışımlara katılan taneli strafor katkının örneklerin birim hacim ağırlık değerlerini azalttığı ve buna bağlı olarak ısı iletkenlik değerlerinde azalma gerçekleştirdiğini gözlemlemişlerdir. Strafor katkı ile üretilen örneklerin bina enerji tüketimine dikkate değer katkı sağlayacağını bu sayede enerjinin daha verimli kullanılarak çevreye olan zararın azaltılacağını bildirmişlerdir.

Mıhlayanlar ve arkadaşları [8]; piyasalarda EPS ısı yalıtım levhaları yoğunluklarıyla anılmalarına rağmen standartlarda yoğunluktan bağımsız sınıflandırdıklarını göstermişlerdir. Çalışmalarında EPS ısı yalıtım levhalarının üretim parametrelerinin ısı iletkenlik üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Öncelikle genleştirilmiş polistiren köpüğün üretim sürecindeki üretim parametrelerini tespit etmişlerdir. Bu amaçla, ilk olarak üretim aşamalarında meydana gelen fiziksel olaylar tanımlanmış ve ilgili özeliği etkileyecek içyapının fiziksel özelliklerini belirlemişlerdir. Daha sonra, bu içyapının fiziksel özelliklerini etkileyebilecek üretim sürecindeki fiziksel olayları ve etki derecelerini yorumlamışlardır. Bu yorumlar çerçevesinde üretim parametrelerinin önem sırası belirlenmiş ve hangi büyüklüklerin öncelikle incelenmesi gerekeceği ve değerlerinin hangi aralıkta değiştirilmesinin uygun olacağı irdelenmiştir. Yapılan deneyler ve istatistiksel değerlendirmeler EPS ısı yalıtım levhalarında yoğunluğun ısı iletkenlik üzerinde yaklaşık olarak %90 oranında etkili olduğunu, üretim parametrelerinin etkisinin ise %10 mertebesinde kaldığını göstermişlerdir.

Durmaz [9]; fiber ve tanecik katkılı kompozit levhaların ısı iletkenlik değerlerini sonlu elemanlar programı kullanarak hesaplamıştır. Dolgu malzemesinin değişik yoğunlaşma oranları, matris malzeme içindeki dağılımları ve geometrilerini araştırmıştır. Sayısal analizlerden bulduğu ısı iletkenlik değerini literatürdeki değerlerle karşılaştırmıştır. Sonuçta Hamilton ve Tsai'nin modellerinin 2 boyutlu sayısal çalışmalarından bulduğu sonuçlara yakın olduğunu ve Hamilton, Lewis ve Meredith'in geliştirmiş oldukları modellerin ise 3 boyutlu sayısal çalışmalara yakın olduğunu tespit etmiştir.

Fiedler ve arkadaşları [10]; gözenekli malzemeler üzerine yaptıkları çalışmada geometrik ısı iletkenlik değerini temel olarak iki farklı yolla araştırmışlardır. Sayısal yaklaşım metodu için sonlu eleman yönteminin kullandıkları ve sınır değer problemlerinin çözümüne temel olan iki boyutlu homojen model için ise analitik yöntemleri kullandıklarıdır. Isı iletimiyle ilgili olarak pratikte özel Őekillerin bağımsızlığını bulmuşlardır. Sadece yapıların morfolojisi yani açık ya da kapalı gözenekli oluşunun iletme etkisinin çok az olduğunu bulmuşlardır. Bununla beraber iki boyutlu modellerde dairesel küçük düzensiz yapıların efektif ısı iletkenlik değerini artırdığını gözlemlemişlerdir.

Wang ve arkadaşları [11]; literatürde kullanılan efektif ısı iletkenlik değeri hesaplama yöntemlerinden en çok kullanılan beş tanesi olan seri model, paralel model, Maxwell – Eucken'in iki yapısı ve Efektif Ortalama Teorisini (EMT) bir denkleme birleştirmeye çalışmışlardır. Temel olarak bu beş modelin birleşiminden oluşan denklem karmaşık malzemelerin efektif ısı iletkenlik değerlerini belirlemek için kullandıklarıdır. Yeni geliştirilen yöntemin diğer başka yöntemlere karşı belirli avantajları olduğunu belirtmişlerdir.

Paek ve arkadaşları [12]; alüminyum tabanlı yalıtım malzemelerinin termo – fiziksel özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır. Efektif ısı iletkenlik ve geçirgenliği detaylı Şekilde araştırmışlardır. Bu özellikleri belirlemede deneysel düzenekler ve ölçüm yöntemi geliştirmişlerdir. Efektif ısı iletkenlik değerini belirlemek için bir boyutlu ısı iletimini kullandıkları ve deney sonuçlarında gözenek miktarındaki düşüşle birlikte efektif ısı iletkenlik değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Fakat sabit gözeneklilik oranında yalıtım malzemesinin hücre yapısındaki çeşitliliğin efektif ısı iletkenlik üzerine fazla bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir. Aynı durumu

geçirgenlik için göz önünde bulundurdıklarında geçirgenlik değeri hem gözeneklilik oranından hem de hücre yapısından oldukça etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Carson ve arkadaşları [13]; efektif ısı iletkenlik modellemelerinde potansiyel yanlış uygulamalardan kaçınmak için boşluklu diye isimlendirilen malzemeleri iki alt başlığa bölmüşlerdir. Bunlardan ilki sürekli yoğunlaşmış faz içerisindeki gözenekler olan iç gözeneklilik diğeri ise malzeme içerisinde taneli yapıların gözleendiği dış gözenekliliktir. Yaptıkları bu çalışmada Hashin–Shtrikman sınırları ile sınırlanan efektif ısı iletkenlik bölgesinin Efektif Ortalama Teorisi (EMT) denklemi ile iç gözeneklilik ve dış gözeneklilik isimli iki bölgeye ayrılabilir olabileceğini göstermişlerdir. Hashin–Shtrikman ve EMT denklemlerinin gözenekler için kullanılabilirliğini literatürdeki deneysel verilerle desteklemişlerdir.

Schellenberg ve arkadaşları [14]; EPS parçacıklarının termal özelliklerinin hücre yoğunluğuna ve şekline bağımlılığı konusunda yaptıkları çalışmada ısı iletkenlik değerinin düşürülmesi için ışınimsal iletkenliğin düşürülmesi gerektiğini göstermişlerdir. Bu ilişkiyi hücre şeklinin ve ısı iletkenliğin bağımlılığını belirlemek için detaylı şekilde araştırmışlar ve yalıtım parçacıklarının yoğunluğu üzerine çalışma yapabilmek için geniş bir yelpazede kullanılan EPS numunelerindeki küçük ve genişletilmiş hücre yapılarını göstermişlerdir. EPS'nin yoğunluğunun küçük hücre boyutlarının bağımlılığına temel olarak geniş hücre boyutlarını da içerisinde kapsayan bir denklem ortaya koymuşlardır. Köpük hücrelerinin aynı ortalama çaplarında EPS'nin ısı iletkenlik değeri yoğunluğun azalmasıyla artmaktadır. Aynı yüksek köpük yoğunluğu değerlerinde ısı iletkenlik değeri genel olarak ortalama hücre çapından bağımsız olmakla birlikte düşük köpük yoğunluğu değerlerinde ısı iletkenlik değeri ortalama hücre çapının artmasıyla azalmaktadır. Sonuç olarak EPS'nin ısı iletkenlik değerinin hücre yapısına ve yoğunluğa bağılı olduğuna dair sonuçlar çerçevesinde pratik bir model önermişlerdir.

Placido ve arkadaşları [15]; yaptıkları çalışmada yalıtım malzemelerinin termal özelliklerinin belirlenmesinde ve tahmininde kullanılabilir bir model geliştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında malzeme içerisindeki gözenekleri belirlemek için yüksek çözünürlüklü mikroskop ile görüntüler elde etmişler ve bu malzemelerin yüksek miktarda hava içerdiklerini ve bu sayede katı kısmın ısıyı iletimle gaz kısmının ise radyasyon ile geçirdiğini kabul etmişlerdir. Elde edilen görüntüler ışığında termal özelliklerin tahminine bağılı uygulanabilir bir geometrik

hücre modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modelin geçerliliği konusunu bilgisayar ortamında yapılan çalışmalarla karşılaştırmışlar ve optimizasyon işlemlerini uygulamışlardır.

Gnip ve arkadaşları [16]; yapmış oldukları çalışmada EPS yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliğini 0 ve 50 °C sıcaklık aralığında ölçmüşlerdir. Çalışmaları kapsamında 14 kg/m<sup>3</sup>'ten 38 kg/m<sup>3</sup>'e kadar örnekler kullanmışlardır. Ölçümleri yapmak için hazırladıkları numuneler 50 mm ve 100 mm boyutlarında olmakla birlikte ölçümler ISO 8301, EN 12667 ve EN 12939 standartlarına uygun olarak FOX 304 cihazında yapmışlardır. Bu çalışma sonucunda belirledikleri ısı iletkenlik değerlerine bağlı deneysel bir denklem geliştirmişlerdir.

Munóz ve arkadaşları [17]; model doğrulama ve termal sistemlerin benzetim için belirsizlik ve duyarlılık analizi yöntemlerinin uygulamasını artırmayı amaçlamışlardır. Kullanıcıların model girdi verileri için belirsizlik aralığı uygulamaları gerektiği düşüncesini vurgulamışlardır ki bu da daha sonra benzetim sonuçlarının aralıklarını belirlemek için modele uygulamışlardır. Uygulayıcı için temel zorluklardan bir tanesi tipik girdi değişkenlerini etkileyen belirsizlik hakkında bilgi eksikliğidir. Yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik değerlerinin tahmin edilememesindeki belirsizlik özellikle deneysel ölçümlerin eksikliğinden kaynaklanmaktadır. Çalışmalarında ayrıca belirsizlik aralığını nasıl kullanılabileceğini göstermek için örnek olarak bir güneş kolektörünün matematiksel modelinin geçerliliği üzerinde durmuşlardır.

Coquard ve arkadaşları [18]; binalarda yaygın olarak kullanılan yalıtım malzemelerinden EPS ısı yalıtım malzemesinde ısı transferinin nasıl gerçekleştiğini açıklamışlardır. Çalışmalarında düşük yoğunluklu EPS ısı yalıtım malzemeleri kullanarak içyapılarında oluşan iletim ve ışı nım mekanizmasının tahminine yönelik denklemler geliştirmişlerdir. Bu denklemlerden elde ettikleri efektif ısı iletkenlik değerlerini ise teorik olarak buldukları ısı iletkenlik değerleri ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kübik hücre yapısından elde edilen denklemlerin efektif ısı iletkenlik tahmininde en doğru sonucu verdiğini tespit etmişlerdir.

Bu tez çalışmasında özetleri verilen literatür çalışmalarından farklı olarak EPS ısı yalıtım malzemelerinin gerçek mikro ve makro görüntüleri kullanılarak bilgisayar ortamında efektif ısı iletkenlik değeri tespit edilmiştir. Bulunan bu değerler ise deneysel sonuçlar ve hesap değerleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. Isı Yalıtımı

Isı yalıtımı; sıcak ve soğuk boru hatlarına, ısı kaybı ya da ısı kazancı olan tesislere ve binalara uygulanabilen, çok fazla yatırım maliyeti gerektirmemekle birlikte, oldukça önemli miktarlarda enerji tasarrufu sağlayabilen ve sağladığı tasarruflarla kendisini kısa sayılabilen sürelerde geri ödeyebilen enerji tasarrufu yöntemlerinden birisidir. Isı yalıtımının iki amacından birisi; ya sıcak bir kaynaktan ortama ya da ortamdan soğuk süreçlere olan ısı akışlarını azaltmaktır. Bunun için temel prensip; düşük ısıl iletkenlik ya da bunun tersi olan yüksek ısıl direncin meydana getirilmesidir. Kullanılacak olan yalıtım malzemesi fazla değişikliklere ihtiyaç duymaksızın soğukluğun veya sıcaklığın korunmasında kullanılabilir [19,20,49].

Farklı açılardan değerlendirildiğinde ısı yalıtımının sağladığı kazançlar şu şekilde sıralanabilir [20]:

- Prensip olarak; bina konfor koşullarının elde edilebilmesi için mekanik ve elektrik sistemlerin kurulmasını en aza indirgeyerek doğal kaynak kullanımına bağlı enerji korunumuna yardım eder.
- Ekonomik kazanç olarak; toplam bina yapım maliyetinin sadece %5'i ilk yatırım için harcanarak, ısıtma–havalandırma–iklimlendirme donanımları ile binada kullanılan işletme enerjisinden %50–70 oranında tasarruf edilmesini sağlar.
- Çevresel kazanç olarak; işletme enerjisinden tasarruf edilmesi dolayısıyla, işletme sistemlerinden doğacak hava kirliliğini azaltır.
- Kullanıcı memnuniyeti olarak; ısıtma–havalandırma–iklimlendirme masraflarını azaltır, enerjinin daha verimli kullanılmasına bağlı olarak enerji kesintileri azalır, kısıtlı enerji kaynaklarının daha uzun süre kullanılabilmesini sağlayarak gelecek nesillere korunmuş kaynaklar bırakmayı mümkün kılar.
- Isıl konfor olarak; mevsim değişikliklerinde iç hava kalitesini sürekli kılar.
- İşitsel konfor olarak; dış ortamdan ve komşu birimlerden gelen gürültüyü engelleyerek akustik yalıtım sağlanmasına yardımcı olur.



- Yapı strüktürüne katkı olarak; sıcaklık değişimlerinin ve kontrolsüz buharlaşmanın yaratacağı etkilerin, yapı bileşenlerine zarar vermesini önleyerek binanın ömrünü uzatır.
- Yangın emniyeti olarak; uygun malzemenin gereken detaylandırma ile kurgulanmasıyla yangının geciktirilmesini sağlar ve büyümesine engel olur.

Yalıtım uygulamalarının ekonomik faydaları uygulamadan uygulamaya değişmektedir. Yalıtımın ekonomik avantajı sadece yakıt ya da enerji tasarrufu ile sınırlı değildir. Aynı zamanda enerji üretiminde kullanılan donanımların kapasitelerindeki azalmaya paralel olarak, daha küçük boyutlarda alanlara ihtiyaç duyulacak ve yardımcı işletmelerin boyutlarındaki küçülmeden dolayı da, ilk yatırım sırasında ekonomik olarak bir kazanç sağlayacaktır. Buna ilave olarak; yalıtım uygulamaları ile iletim dağıtım sisteminin yatırımında ve yoğunlaşma kayıpları ve pompa sistemlerinin işletilmesi gibi iletim dağıtım sistemi işletme maliyetlerinde de azalma sağlanmış olacaktır. Mevcut bir işletmede yapılan yalıtım uygulamaları bu avantajların tamamına sahip olmayabilir. Ancak; yalıtım uygulamaları, buralarda da kapasite artırımları sebebiyle tesisin yükü arttığında, enerji üretim sistemlerinin ilave yatırım maliyetlerinde tasarruf sağlayacağı gibi, daha az enerji tüketileceğinden mevcut duruma göre önemli miktarda yakıt tasarrufu sağlayacaktır [8,14,19,20].

### **2.1.1. Isı Yalıtım Malzemeleri**


Farklı sıcaklıktaki iki ortam arasında ısı transferini azaltmak için yapılan işleme ısı yalıtımı denir ve bunu sağlayan malzemelere ısı yalıtım malzemesi adı verilir. Isı yalıtım malzemelerinin en temel özelliği ısı iletkenlik değerlerinin düşük olmasıdır. ISO (Uluslararası Standartlar Örgütü) ve CEN (Avrupa Standardizasyon Komitesi) standartlarına göre ısı iletkenlik 0,065 W/mK değerinden küçük olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak tanımlanırlar. Diğer malzemeler ise yapı malzemesi olarak kabul edilirler [21,22].

Yalıtım malzemelerinin seçiminde göz önüne alınması gereken hususlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir [8,14,19,22,49]:

- Değişik İşletme Sıcaklıklarına Dayanım: Yalıtım malzemeleri değişik işletme sıcaklıklarında fiziksel özelliklerinin yanı sıra ısıl özelliklerini de korumalıdır.
- Fiziksel Mukavemet: Yalıtım malzemeleri fiziksel mukavemet yönünden taşıma, depolama, işleme ve uygulama gibi konular açısından yeterli olmalıdır. Bu işlemler sırasında malzeme orijinal özelliklerini yitirmemelidir.
- Basma Mukavemeti: Üzerinde yük taşınması gereken yerlerde, yapılan yüklemelere karşı koyabilecek dirençte olmalıdır. Buralarda ayrıca yalıtım malzemesinin korunması için gerekli önlemler de alınmalıdır.
- Mekanik Mukavemet: Mekanik yönden dayanıklılıkta diğer bahsedilen maddelerle aynı olmalı ilave olarak yalıtım malzemeleri genişleme ve büzülme durumlarında bozulmamalı, titreşimlere karşı dirençli olmalıdır.
- Zararlı Emisyon Yaymama: Yalıtım malzemeleri taşıma, kullanım ya da uygulama sırasında insan sağlığına zararlı emisyon yaymamalıdır. İnce toz taneciklerinin solunum yolu ile alınması insan sağlığı açısından oldukça tehlikeli olabilir. Yalıtım malzemelerinin asbest içermesi istenmeyen bir durumdur. Çünkü asbest solunum yolu ile insan sağlığına önemli ölçüde zarar verdiği bilinmektedir.
- Yanma Direnci: Yalıtım malzemelerinin yanma direnci de dikkate alınmalıdır. Yalıtım malzemeleri yanmayan özelliklere sahip olsa dahi; uygun kaplama teknikleri yine de kullanılmalıdır. Bu yanma riskini daha da düşürmüş olacaktır. Ayrıca bazı yalıtım malzemelerinin yanması durumunda çıkan gaz emisyonları çok tehlikeli olabilir.
- Korozyon Etkilere Dayanım: Yalıtım malzemesinin su–buhar v.b. kaçaklara ya da yoğuşmaya maruz kalması durumunda korozyon tehlikesi ortaya çıkabilir. Yalıtım malzemelerinin kendi içindeki çözülebilir bileşiklerden dolayı da korozyon riski ortaya çıkabilir. Basma, çarpma, vurma v.b. gibi olayların olabileceği yerlerde yalıtım uygulamaları uygun şekilde kaplanarak korunmalıdır.
- Yalıtım Kalınlığı ve Ağırlığı: İlave yalıtımın ağırlığı bazen ilave destek ya da tutma elemanları gerektirebilir. Ayrıca; baca v.b. gibi kapalı alanlardaki yalıtım ilavesi daha fazla yer kaplayacaktır. Bu hususlar ve

ekonomik esaslara dayanan değerlendirmeler dikkate alınarak, dūşūnūlen yalıtımın özellikleri belirlenmelidir. Buna karşılık; hafif ve gevşek dolgu malzemelerinin kullanılması gerekirse yeteri düzeyde mekanik mukavemetin sağlanması da aranmalıdır.

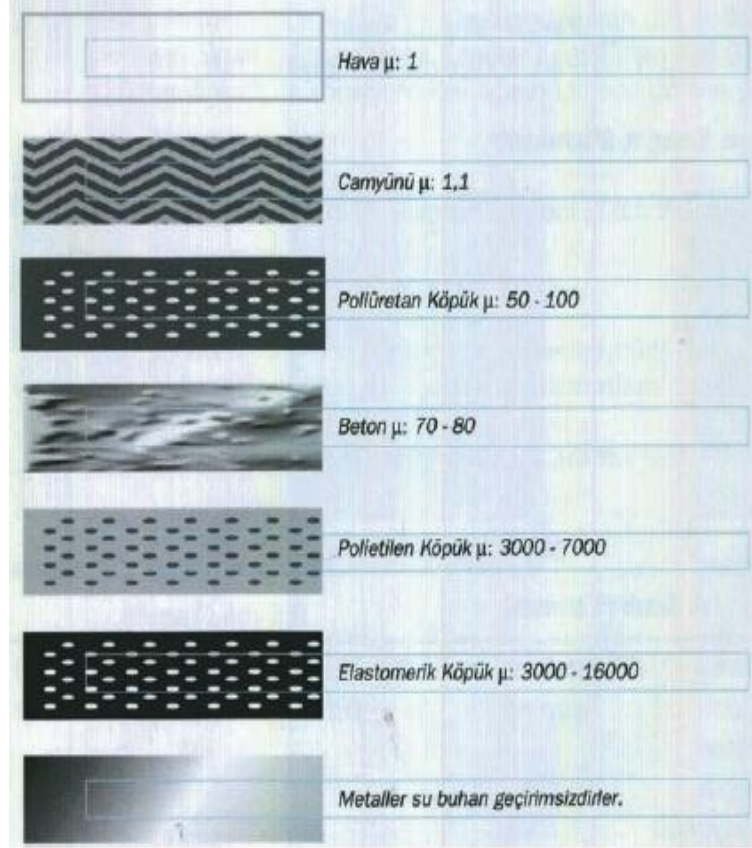
- Kimyasal Etkilere Karşı Direnç: Özellikle buhar v.b. gibi proses akışkanı ya da kimyasal maddelere maruz kalma ihtimalinin olduğu yerlerde kimyasal etkilere karşı dirençli olma özelliği önemlidir.
- Isıl İletkenlik Değeri: Yalıtım malzemelerinden istenilen en önemli özelliktir. Isıl iletkenlik değerinin ( $k$ ) olabildiğince küçük olması ısıyı o kadar az geçirdiğini gösterir. Düşük ısı iletkenlik değerine sahip malzemeler yüksek ısı iletim direncine sahiptirler. Dolayısıyla bu tür malzemeler yüksek ısı yalıtım performansı gösterirler. Bazı malzemelerin ısı iletkenlik değerleri Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.








	Alüminyum: 204 W/mK		Elastomerik Kauçuk Köpüğü: 0,036 W/mK
	Su: 0,8 W/mK		Poliyeten: 0,040 W/mK
	Donatılı Beton: 2,1 W/mK		Camyünü: 0,040 W/mK
	Yatay Delikli Tuğla: 0,45 W/mK		Taşyünü: 0,040 W/mK
	Ahşap: 1,2 W/mK		Poliüretan: 0,035 W/mK

Şekil 2.1. Bazı Malzemelerin Isıl İletkenlik Değerleri [22]

- Su Buharı Difüzyon Direnci: Nasıl ki ısı sıcak taraftan soğuk tarafa geçerse, su buharı da sıcaklığa ve neme bağlı olarak, kısmi buhar basıncı yüksek taraftan düşük tarafa doğru ilerler. İlerlerken de buhar difüzyon direnci ile karşılaşır. Her yapı malzemesi, kalınlığına bağlı olarak buhar difüzyonuna karşı koyar. İçinden düşük sıcaklıkta akışkan geçen boru hatlarının dış yüzey sıcaklığı genelde ortam sıcaklığının çok altındadır.

Boru hattının bulunduğu ortamın sıcaklığına ve nemine göre bulunan öyle bir sıcaklık vardır ki, bu sıcaklığa terleme sıcaklığı denir ve boru hattının dış yüzey sıcaklığı bu sıcaklığın altına düştüğü durumda terleme gerçekleşir. Bazı malzemelerin su buharı difüzyon direnç katsayıları Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



	Hava $\mu$ : 1
	Camyünü $\mu$ : 1,1
	Poliüretan Köpük $\mu$ : 50 - 100
	Beton $\mu$ : 70 - 80
	Poliyeten Köpük $\mu$ : 3000 - 7000
	Elastomerik Köpük $\mu$ : 3000 - 16000
	Metaller su buharı geçirimsizdirler.

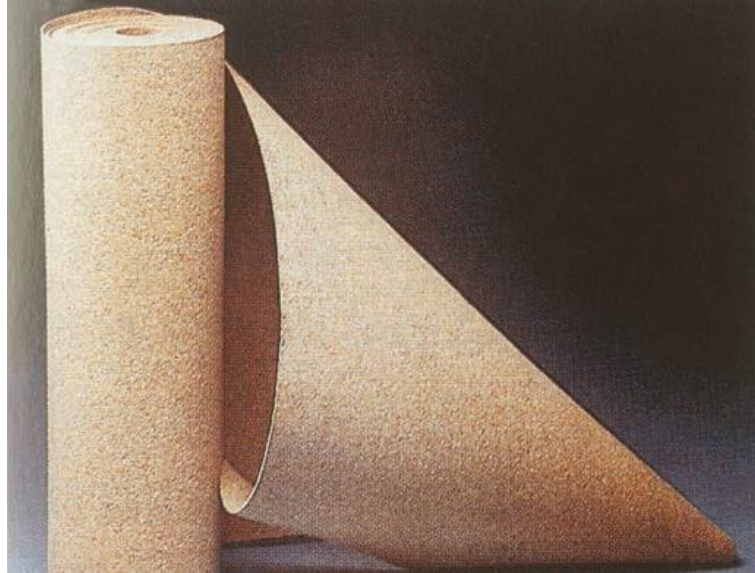
**Şekil 2.2.** Bazı Malzemelerin Su Buharı Difüzyon Direnç Katsayıları [22]

Yukarıda maddeler halinde sıralanan özelliklerin yanı sıra yalıtım malzemelerinin; kolay ve ucuz olarak piyasadan bulunabilme, kolay uygulanabilme özelliği ile işçilikten avantaj sağlama gibi bazı genel özelliklere sahip olmaları istenir.

### 2.1.1.1.Mantar

Tabaka, levha, toz ve un halinde satılan ve mantar ağacının kabuğundan elde edilen bir yalıtım malzemesidir. Dekorasyon amacı ile de kullanılabilen bu organik malzeme küçük tanecikler haline getirilmek üzere öğütülür ve oksijensiz bir ortamda ısı verilerek genişmesi sağlanır. Bu işlem sonucunda yoğunluk yaklaşık 340 kg/m<sup>3</sup>'ten 110 kg/m<sup>3</sup>'e düşürülür ve daha iyi bir yalıtım malzemesi elde edilmiş olur. Mantar homojen gözenekli bir yapıya sahiptir. Kimyevi maddelere dayanıklıdır fakat halojenlere, amonyağa, eter yağlarına dayanıksızdır. Yanıcı olup, is çıkararak yanar.

Tanelenmiş hali dökme mantarı oluşturur. Dökme mantar higroskopiktir. Haşarat barındırmaya müsaittir ve küflenebilir. En çok 80 °C'ye kadar kullanılabilir. Mantarın yapısındaki yapıştırıcı özelliği taneciklerin sıkıştırılarak bloklar haline getirilmesini ve levha şeklinde kesilebilmesini sağlamaktadır. Şekil 2.3.'te rulo halinde sarılmış mantar yalıtım malzemesi gösterilmiştir. -250 ile +120 °C sıcaklık aralığında kullanılabilir. Kullanım yerleri arasında bira fabrikaları, gemiler, soğutma ve buz üretim tesisleri ve ısıtma amaçlı uygulamalar sayılabilir [19,23]. Mantar yalıtım levhaları doğal bir ürün olduğu için tamamen zararsızdır.



Şekil 2.3. Mantar Yalıtım Malzemesi [22]

### **2.1.1.2.Keçe**

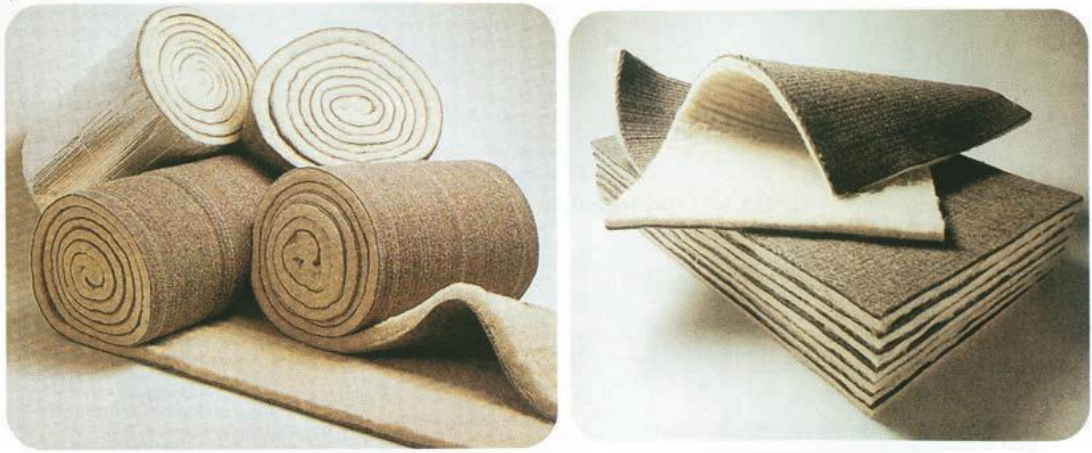
Keçe ya da yalıtım keçesi olarak bilinen dokunan liflerin sıkıştırılması ile üretilen malzemelerdir. Doğal bir ürün olan keçe hayvan kıllarından imal edilir. Genellikle bina yalıtımında ve basınçlı dağıtım hatlarının yalıtımında kullanılır. Isıl iletkenlik değeri 0,04 W/mK'dir [19].

### **2.1.1.3.Odun Talaşı Levhalar**

Odun talaşı levhalar ahşap talaşının manyezit bağlayıcı ile sıkıştırılarak levha halinde üretilmesi ile oluşan bir ısı yalıtım malzemesidir. Basınç ve bükülmeye karşı dayanımı olan bu levhalar, aynı zamanda ses yalıtımı da sağlamaktadırlar. Güneşin ultraviyole ışınlarından etkilenmezler, ancak organik kökenli bir malzeme olması sebebiyle çeşitli böcek ve organizmalardan zarar görebilmektedirler. Odun talaşı levhalarının kullanım sıcaklığı maksimum +110 °C'dir. Isıl iletkenlik hesap değeri 0,09–0,15 W/mK, su buharı difüzyon direnç faktörü 2–5 arasındadır. Yoğunluğu 360–570 kg/m<sup>3</sup> aralığında değişmektedir [24].

### **2.1.1.4.Koyunyünü**

Koyunyünü doğal bir yalıtım malzemesidir. Koyunyününden yapılmış malzemeler değişik kalınlıklarda yalıtım malzemesi olarak kullanıma sunulmaktadır. Liflerin dikey olarak yerleştirilmesi durumunda yoğunluğu 13 kg/m<sup>3</sup>'e kadar indirilebilmiştir. Koyunyününden oluşan yalıtım şiltelerinin ısı iletkenliği, kalınlık ve imalat durumuna göre 0,037–0,044 W/mK arasında değişmektedir [22]. Koyunyünü yalıtım malzemelerinden bir kaçı Şekil 2.4.'te verilmiştir.



**Şekil 2.4.** Çeşitli Koyunyünü Malzemeler [22]

#### **2.1.1.5.Perlit**

Volkanik bir kaya olan perlit ince kum zerrecikleri elde edilecek şekilde pülverize edilir ve sonra tanecikler haline getirilmek üzere bir fırında genişletilir. Bu işlemden sonra hacmi 12 kat artırılmış olur. Isıl iletkenlik değeri 0,06 W/mK'dir [19].

#### **2.1.1.6.Cam Yünü**

Kuvars silisinden ve değişik stabilizörlerden elde edilir. Karıştırılan hammaddeler 1400 °C civarında bir fırında kaynatılır. Eriyik dönel delikli bir silindire gönderilir ve silindirin deliklerinden dışarı doğru atılır. Bu oluşturulan iplikler levha, şilte gibi değişik formların imali için esas malzeme olarak kullanılır.

Camın kendisi kırılğan bir madde olduğu halde ince lifli türleri esnek, bükülebilen ve çok yönlü amaçlara hizmet edebilecek niteliktedir. Bakalitli (sarı) ve bakalitsiz (beyaz) türleri vardır. Bakalit; lifleri birbirine yapıştırarak malzemeye form vermeye (rulo, levha) yarar. Bakalitli olanlar en çok 250 °C'ye kadar kullanılır. Bakalitsiz (beyaz) olanlara form verebilmek için kümes teline veya oluklu mukavva

gibi malzemelere dikmek gerekir (şilte v.b.) ve maksimum 550 °C'ye kadar, genellikle sanayi yalıtımlarında (kazan, tank, boru v.b.) kullanılır.



**Şekil 2.5.** Çeşitli Cam Yünü Malzemeler (Levha, Şilte, Boru) [22]

TS-825'e göre inşaatlarda kullanılacak camyünü için ısı iletkenlik değeri 0,040 W/mK verilmiştir. Tesisat hesabında ısı geçirme direncini hesaplayabilmek için yalıtım malzemesinin ortasındaki sıcaklığa tekabül eden ortalama ısı iletkenlik değeri esas alınmaktadır [49]. Bakalitli cam yünü için çeşitli ortalama sıcaklıklara ait ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Bakalitli Cam Yünü İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)		
	16 kg/m <sup>3</sup>	48 kg/m <sup>3</sup>	80 kg/m <sup>3</sup>
-20	0,031	0,028	0,028
10	0,037	0,030	0,031
20	0,040	0,032	0,032
50	0,047	0,035	0,035
100	0,065	0,044	0,042



### 2.1.1.7.Taş Yünü

Taş yünü volkanik kayadan elde edilir. Hammadde kireçtaşı ile karıştırılır ve 1600 °C’de kaynatılır. Eriyik kaya çok hızlı dönen disklerin üzerine damlatılır ve buradan uzun iplikler halinde çıkar. İplikler toplandıktan sonra yapıştırıcı özellikleri sentetik reçine ve yağ ilavesi ile taş yünü malzemeleri şilte şekline getirilir. Koyu gri rengi olan taş yünü bugün Avrupa’nın hemen hemen her ülkesinde üretilmektedir. Lif çapları 5 mikron civarında olup, yoğunlukları 20–200 kg/m<sup>3</sup> arasındadır. Ancak genellikle 30–100 kg/m<sup>3</sup> yoğunlukları kullanılır. Cam yününe olduğu gibi düşük yoğunluklar rulo şeklinde, yüksek yoğunluklar levha şeklindedir.

Şekil 2.6.’da taş yününden elde edilmiş yalıtım levhası görülmektedir. Taş yünlerinin optimum ısı iletkenlik değeri 100–120 kg/m<sup>3</sup> arasındaki yoğunluklarda elde edilir. Kümes teline veya oluklu mukavvaya dikili olan şilteleri genelde sanayi donanımlarının yalıtımında kullanılır. Cam yününe lifler yatay olarak yer alırken, taş yününe her doğrultuda yer alır. Bu nedenle basınç mukavemeti cam yününden daha fazladır.



**Şekil 2.6.** Taş Yününden Elde Edilmiş Yalıtım Levhası [21]

Taş yününe ısı iletkenlik değeri TS–825’e göre 0,040 W/mK olup cam yünü ile aynıdır [19,22]. Düşük yoğunluklu taş yünü için çeşitli ortalama sıcaklıklara ait ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.2.’verilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere taş yünü için yoğunluk değeri arttıkça ısı iletkenlik değeri azalmasına karşın sıcaklığa bağlı olarak ısı iletkenlik değeri artmaktadır.

**Çizelge 2.2.** Düşük Yoğunluklu Taş Yünü İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değeri (W/mK)				
	23 kg/m <sup>3</sup>	33 kg/m <sup>3</sup>	45 kg/m <sup>3</sup>	60 kg/m <sup>3</sup>	80 kg/m <sup>3</sup>
10	0.037	0,035	0,033	0,033	0,033
50	-	0,043	0,040	0,039	0,038
100	-	0,055	0,050	0,047	0,045
200	-	-	-	0,070	0,066
300	-	-	-	-	-

### 2.1.1.8.Cam Köpüğü

Cam köpüğü borlu silis camında üretilen bir yalıtım malzemesidir. Cam köpüğü levhaları çok sert, basınca çok dayanıklı, kolay kırılabilen, sürtünmeye dayanıksız, yüzeyi sürtünmeyle kolay tozlaşabilen, buharı hiç geçirmeyen yalıtım malzemesidirler. Yoğunlukları 100–500 kg/m<sup>3</sup>, ısı iletkenlikleri 0,045–0,06 W/mK, işletme sıcaklıkları -260–+430 °C aralığındadır.



**Şekil 2.7.** Cam Köpüğünden Elde Edilmiş Çeşitli Malzemeler [22]

Kapalı gözenekli olan cam köpüğü su almaz, sadece yüzeydeki girintilere su dolabilir. Higroskopik ve kapilar değildir. Ancak devamlı olarak suya maruz kalması halinde malzemeyi az miktarda korozyona uğratar. Çürümez, küflenmez ve haşarat barındırmaz. Malzemenin gözenek yapısı %93–94 dolayındadır. Levhalar küçük boyutlu olabildiği gibi büyük panolar şeklinde de üretilebilmektedirler. Levhalara çeşitli yardımcı malzemeler kaplanarak (Alüminyum folyo, cam, alçı–karton levha v.b.) kullanılabilirler [19].

#### 2.1.1.9. Alüminyum Silis

Seramik fiber yalıtım malzemesi olarak ta bilinen ve çok yüksek işletme sıcaklıklarında kullanılabilen bir yalıtım malzemesi çeşididir. Alüminyum oksit miktarına göre işletme sıcaklıkları Çizelge 2.3.'teki gibidir.

**Çizelge 2.3.** Alüminyum Oksit Miktarlarına Göre Maksimum İşletme Sıcaklıkları

<b>%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Maksimum sıcaklık °C</b>
<b>45</b>	1250
<b>60</b>	1450
<b>30</b>	900

Taş yününün kullanılmadığı 1200–1400 °C sıcaklıklar için kullanılır. Rulo, levha, dökme şekillerinde bulunur. Beyaz renklidir. Yoğunluğu malzemenin şekline göre 100–150 kg/m<sup>3</sup> arasında değişir. Yumuşak bir malzeme olup, levha tiplerinin dahi basınca dayanımı fazla değildir. En önemli özelliği yüksek sıcaklığa dayanabilmesidir [26]. Alüminyum Silisin çeşitli ortalama sıcaklıklardaki ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.4.'te verilmiştir.

**Çizelge 2.4.** Alüminyum Silis İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait  
Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)		
	64 kg/m <sup>3</sup>	96 kg/m <sup>3</sup>	128 kg/m <sup>3</sup>
100	-	0,041	0,030
300	-	0,079	0,060
600	0,180	0,140	0,120
800	0,270	0,220	0,180
1000	0,420	0,360	0,280

#### 2.1.1.10.Kalsiyum Silikat

Kimyasal bir bileşim olan kalsiyum silikat yüksek sıcaklıklara ve kötü hava şartlarına dayanıklı bir yalıtım malzemesidir. Fakat bu malzemenin dezavantajı kolay kırılır olmasıdır. Yoğunluğu 190–220 kg/m<sup>3</sup>, ısı iletkenliği 20 °C’ de 0,049 W/mK ve 500 °C’ de 0,10 W/mK’ dir [19,49].

#### 2.1.1.11.Asbest

Yalıtım malzemesi olarak kullanılan en eski malzemelerden biriside asbesttir. Ayrıca yanmaya karşı direnci en önemli özelliklerinden birisidir [49]. Asbest fiziksel yapı olarak düz (amfibol) ve eğri lifli (chrysotile) iki türü vardır. Amfibol asbestin, kimyasal yapısına göre, crocidolite (mavi asbest), amosite (kahverengi asbest), tremolite, anthophollite ve actinolite gibi çeşitleri vardır. Endüstride en çok kullanılan chrysotile, crocidolite ve amosite cinsleridir. Bunlardan sağlık için en tehlikelileri olan crocidolite ve amosite’nin kullanımı birçok ülkede yasaklanmıştır. Endüstride kullanılan asbestin %90’ını kapsayan chrysotile de birçok ülkede yasaklanmış olmasına karşın daha az karsinogenisitesi tartışmalı olduğu için bazı ülkelerde sıkı kontrol altında kullanılmaktadır [27].

### 2.1.1.12.Vermikülit

Vermikülit doğal bir alüminyum–magnezyum silikası olup, mika madeninden elde edilir. Mika artıkları ısıtılarak genişletilir. Genleşmeden önce yoğunluğu 1400–1500 kg/m<sup>3</sup> iken sonradan 17–60 kg/m<sup>3</sup>'e düşer. Tane çapları 0–15 mm arasında değişir. Vermikülit, camsuyu ve silikofluorid ilavesi ile ve basınçla levha haline getirilir [53]. Vermikülit hammaddesi ve bu hammaddeden üretilen yalıtım levhası Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.8.** Vermikülit Madeni ve Yalıtım Levhası

Levhalar maksimum 5–6 kg/cm<sup>2</sup> basınca dayanır. Dökme vermikülit 1200–1400 °C'ye kadar dayanır. Çimento katılarak yapılan levhalar ısı yalıtımlı hafif betonlar kategorisine girer ve 800 °C'ye kadar dayanırlar. Isıl iletkenlik değeri yoğunluğa göre değişir. 300 kg/m<sup>3</sup> yoğunluktaki hafif betonun ısıl iletkenlik değeri 0,08 W/mK iken, 600 kg/m<sup>3</sup> yoğunluktakinin ısıl iletkenlik değeri değeri 0,15'e ulaşır. Diğer yoğunluk değerlerine ait ısıl iletkenlikler ise Çizelge 2.5.'te verilmiştir. Görüldüğü üzere yoğunluk değeri arttıkça ısıl iletkenlik değeri kademeli olarak düşmektedir. Vermikülit nem alır. Asit ve alkalilere dayanıklı olup yanmaz özelliğe sahiptir [25,28].

**Çizelge 2.5.** Vermikülit İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)			
	96 kg/m <sup>3</sup>	101 kg/m <sup>3</sup>	104 kg/m <sup>3</sup>	109 kg/m <sup>3</sup>
10	-	-	-	0,066
30	-	-	0,067	-
60	-	0,075	-	-
150	0,083	-	-	-

### 2.1.1.13.Poliüretan Köpük

Poliüretan köpük; NCO grubuna sahip izosiyanatlar ile OH grubuna sahip poliollerin reaksiyonları sonucu oluşan polimerlerdir. Katılım reaksiyonu, tamamen bir polimerizasyon reaksiyonudur. Poliüretanlar, plastik ailesinin bir alt grubudur. İzosiyanatlar, NCO yüzde içeriğine ve fonksiyonuna ya da bir moleküldeki NCO sayısına bakılarak adlandırılırlar. NCO sayıları izosiyanatların ayırt edici bir özelliğidir. MDI (difenilmetandiizosiyanat–NCO %31,5) ve TDI (toluendiizosiyanat–NCO %48,2) en çok bilinen iki hoş kokulu izosiyanat çeşididir. Polioller, serbest OH (hidroksil) sayısı ya da molekül ağırlıklarına göre tanımlanırlar. Poliollerde OH sayısı molekül ağırlığı ile ters orantılıdır. Polioller, polieterler ve poliesterler olmak üzere iki çeşittir. Günümüzde kullanılan poliollerin %80–90’ı polieter poliollerdir [29].

Geniş sertlik yelpazesi; yüksek elastikiyet; mükemmel aşınma mukavemeti; darbeye, kopmaya, yırtılmaya, yorulmaya mukavemet; yağlara, solventlere, suya ve ozona karşı dayanıklılık; şeffaf ve metalden daha hafif olmaları poliüretan köpüklerin başlıca özellikleridir. Şekil 2.9.’da poliüretan yalıtım malzeme örnekleri ve bu malzeme ile yapılmış bir çatı izolasyonu görülmektedir. Poliüretan malzemeler dış ortam koşullarına oldukça dayanıklı malzemelerdir.



**Şekil 2.9.** Poliüretan Malzeme Örnekleri [22]

Poliüretan sarı renklidir. Hücrelerin %95'i kapalı gözeneklidir.  $30\text{--}200\text{ kg/m}^3$  arasındaki yoğunluklarda, çeşitli maksatlar için üretilebilirler. Yapı yalıtımları için  $30\text{--}40\text{ kg/m}^3$  yoğunluklarda olanı kullanılır [26]. Çeşitli ortalama sıcaklıklarda poliüretan köpükler için ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.6.'da verilmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere poliüretan köpükler için ısı iletkenlik değeri yoğunluktan bağımsızdır. Fakat sıcaklığın artması ile artış göstermektedir.

**Çizelge 2.6.** Poliüretanlar İçin Çeşitli Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)		
	35 kg/m <sup>3</sup>	40 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>
-150	0,016	0,016	0,016
-50	0,022	0,022	0,022
0	0,021	0,021	0,021
10	0,023	0,023	0,023
50	0,026	0,026	0,026
100	0,032	0,032	0,032

### 2.1.1.13.Elastomerik Kauçuk Köpüğü

Kauçuk köpüğü esaslı bir malzeme olan elastomerik kauçuk köpüğü tamamen esnek, kapalı gözenekli, genişletilmiş siyah sentetik kauçuk boru ve levhalardır.

Bünyesindeki yüksek orandaki sentetik kauçuğun sayesinde farklı uygulama alanlarında kullanılabilen elastikiyet ve esnekliği sağlar. Isıl iletkenlik değeri 0,036 W/mK'dir. Yoğunluk değeri ise 60–80 kg/m<sup>3</sup> olmakla birlikte kimyasallara karşı dayanıklı bir yalıtım malzemesidir. Elastomerik kauçuk köpüğü için çeşitli yoğunluklardaki ısıl iletkenlik değerleri Çizelge 2.7.'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.7.** Elastomerik Kauçuk Köpüğü İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısıl iletkenlik değerleri (W/mK)	
	60 kg/m <sup>3</sup>	90 kg/m <sup>3</sup>
-20	0,033	0,036
0	0,035	0,038
20	0,037	0,040
50	0,040	0,044

#### 2.1.1.15. Polietilen Köpük

Polietilen esaslı malzemeler, etilen ve propilenden hazırlanan polimerlerden imal edilen esnek ve yarı esnek, gözenekli, plastik esaslı malzemelerdir. Polietilen köpük ürünü, kalıptan ekstrüzyon yöntemiyle çekilerek boru ve levha halinde üretilmektedir. Kapalı hücre yapılı, ekstrüzyon ile üretilmiş polietilen köpük mamul, dayanıklı, güvenilir, ekonomik, kullanımı kolay bir yalıtım malzemesidir [33].

Bu malzemeler; ısı yalıtımında, döşemelerde, darbe sesi yalıtımında, su yalıtımında yardımcı malzeme olarak birçok yalıtım alanında kullanılacağı gibi aynı zamanda koruma amaçlı, ambalajlama veya yalıtımı tamamlayıcı ürün olarak çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler [34]. Farklı yoğunluklarda polietilen köpük için çeşitli ortalama sıcaklıklara ait ısıl iletkenlik değerleri Çizelge 2.8.'de verilmiştir.



**Çizelge 2.8.** Polietilen Köpük İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)	
	60 kg/m <sup>3</sup>	90 kg/m <sup>3</sup>
-20	0,033	0,036
0	0,035	0,038
20	0,037	0,040
50	0,040	0,044

#### 2.1.1.16.Fenol Köpüğü

Fenol köpüğü, Fenol–Formaldehit bakalitine anorganik şişirici ve sertleştirici katılarak elde edilen bir malzemedir. Fenol köpüğü levhaları muhtelif yoğunluklarda, sert fakat kırılğan, küçük gözenekli ve yüzeyi sürtünmeyle tozlaşan bir yapıya sahiptir. Daha çok açık gözenekli olup kapalı gözeneklere de sahiptir [22]. Farklı yoğunluklarda fenol köpük için çeşitli ortalama sıcaklıklara ait ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.9.'da verilmiştir.

**Çizelge 2.9.** Fenol Köpük İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)
	35 kg/m <sup>3</sup> , 40 kg/m <sup>3</sup> ve 60 kg/m <sup>3</sup>
-100	0,014 – 0,016
-50	0,017 – 0,020
-25	0,018 – 0,022
10	0,018 – 0,022
50	0,021 – 0,025
100	0,027 – 0,031

### 2.1.1.17.Melamin Köpük

Melamin köpüğü yüksek ses yutuculuğu olan, mükemmel ısı yalıtım özelliğine sahip bir malzemedir. Hafif ve kolay uygulanabilmesi, dekoratifliğiyle günümüzde bu alanda kullanılan bir malzemedir [35].  $11 \text{ kg/m}^3$  yoğunluktaki melamin köpük için çeşitli ortalama sıcaklıklara ait ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.10.'da verilmiştir.

Beyaz ve gri renkli olan bu akustik süngerler standart olarak  $10\text{--}11 \text{ kg/m}^3$  yoğunluklu imal edilmektedirler. Stüdyo, ses kayıt odaları, bar, disko, sinema salonları, konferans salonları, call center uygulamalarında kullanım alanlarından bazılarıdır. Uygulama şekli, dekoratiflik ve istenen ses yutma katsayılarına göre farklı kalınlık ve şekillerde işlenebilmektedir.

**Çizelge 2.10.** Melamin Köpük İçin Çeşitli Ortalama Sıcaklıklara Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)	
	11 kg/m <sup>3</sup>	
10	0,034	
20	0,035	
40	0,039	
50	0,040	
80	0,046	

### 2.1.1.18.Polivinilklorür Köpük

PVC köpük, polivinilklorid esaslı termoplastik bir malzemedir ve sert, yarı–sert veya yumuşak olarak üretilebilirler. Gözenek yapısı üretim metoduna göre değişim göstermektedir. Yüksek basınç sistemi ile üretimde kapalı gözenekli, alçak basınç sistemi ile üretimde ise karışık gözenekli veya açık gözenekli, basınçsız üretimde ise açık gözenekli malzeme elde edilir. Yoğunluk değeri  $30\text{--}300 \text{ kg/m}^3$  değerleri arasında olabilir fakat yapı sektöründe genellikle  $30\text{--}40 \text{ kg/m}^3$  olanı kullanılmaktadır

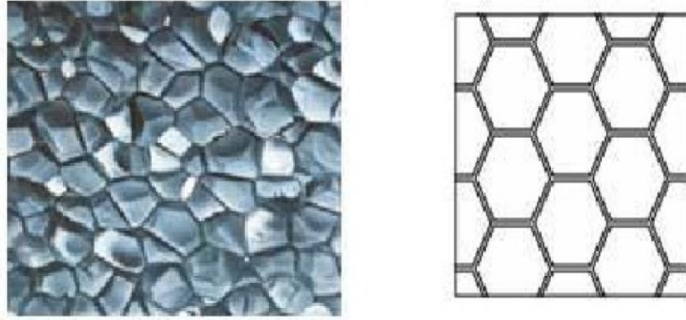
[22]. Farklı yoğunluklarda PVC köpük için 10 °C sıcaklığa ait ısı iletkenlik değerleri Çizelge 2.11.'de verilmiştir.

**Çizelge 2.11.** PVC Köpük İçin 10 °C Sıcaklığa Ait Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)		
	40 kg/m <sup>3</sup>	100 kg/m <sup>3</sup>	300 kg/m <sup>3</sup>
10	0,029	0,030	0,048

#### 2.1.1.19.Extrude Polistiren Sert Köpük (XPS)

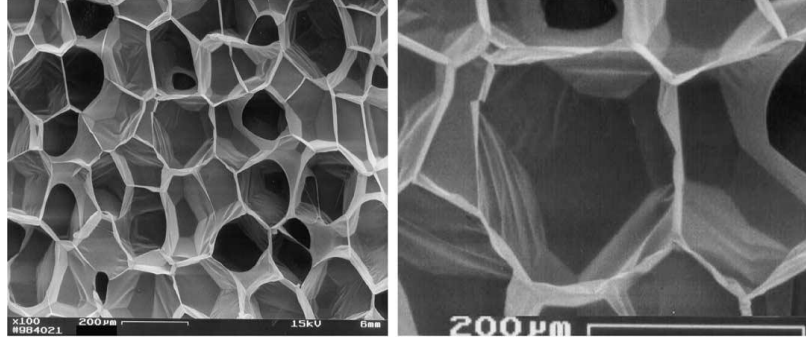
Extrude polistiren (XPS) polistiren veya polistirenin kopolimerlerinden birinden, genleştirilerek ve banttandır çekilerek imal edilen, zırlı veya zırlsız, kapalı hücre yapısında olan sert gözenekli plastik yalıtım malzemesidir. Dikdörtgen şeklidede ve dikdörtgen kesitli, kalınlığı tekdüze ve diğer boyutlarından oldukça küçük olan rijit veya yarı – rijit yalıtım malzemeleridir [36].



**Şekil 2.10.** XPS Yalıtım Malzemesinin 50X Resmi ve Modellemesi [37]

Sürekli bilgisayar kontrolünde yapılan üretim sayesinde homojen bal peteği görünümünde, kararlı bir hücre yapısı elde edilir. Bu bal peteği yapısı Şekil 2.11.'de ki SEM görüntüsüyle görülmektedir. Hücreler bütün yüzlerinden birbirine bağlıdır.

Bu yapı sayesinde XPS malzemeler bünyesine su almaz ve nemden etkilenmezler. Yoğunluğu ne olursa olsun su alma yüzdesi hacminin yüzde biri kadardır [37].



**Şekil 2.11.** 33 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip XPS'nin SEM Görüntüsü [15]

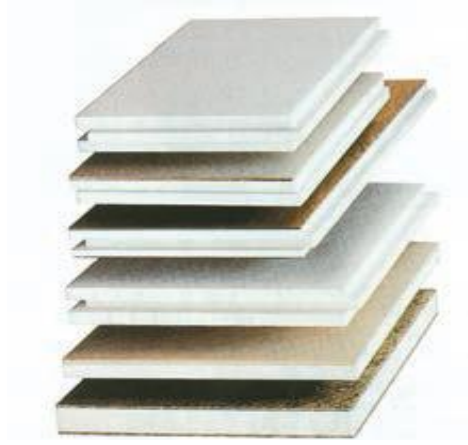
Isıl iletkenlik değerleri EPS'ye oranla biraz daha düşüktür. Yoğunlukları 25–50 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. En önemli özelliklerinden biri de basınca olan mukavemetinin fazlalığıdır. Ayrıca buhar geçirimsizlik faktörü de yüksektir [22].

**Çizelge 2.12.** Extrude Polistiren İçin Isıl İletkenlik Değerleri [25]

Ortalama sıcaklık °C	Yoğunluğa göre ısı iletkenlik değerleri (W/mK)			
	28 kg/m <sup>3</sup>	32 kg/m <sup>3</sup>	38 kg/m <sup>3</sup>	45 kg/m <sup>3</sup>
10	0.027	0.028	0.025	0.026

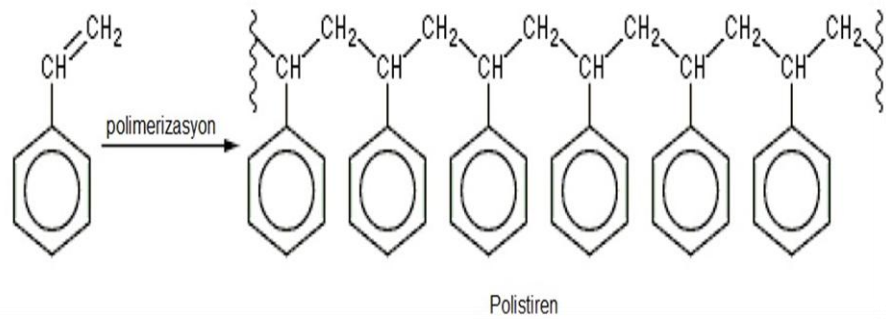
#### 2.1.1.20. Expande Polistiren Sert Köpük (EPS)

Expande polistiren (EPS); yapay organik bir ısı yalıtım malzemesi olup, ilk kez 1952 yılında Alman BASF firması tarafından üretilmiş ve 'Styropor' adı altında dünyaya yayılmıştır. Zamanla Shell, Höchst, CdF Chemie gibi diğer firmalar tarafından da üretilerek değişik marka adları almasına karşılık Türkiye'deki adı Strafor (Styropor) olarak kalmıştır.



**Şekil 2.12.** Çeşitli Genleştirilmiş Polistiren Levha Örnekleri [22]

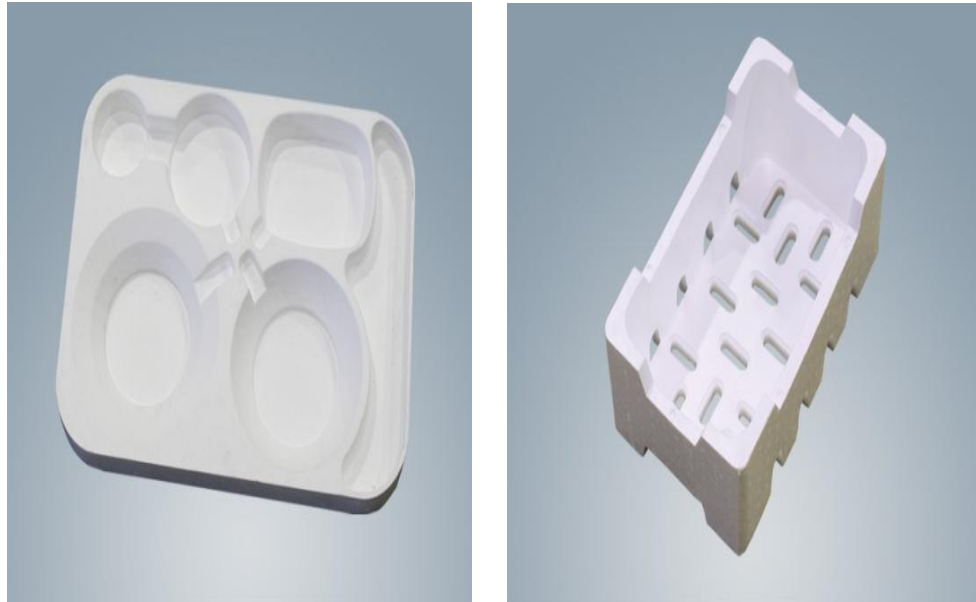
Styropor termo–plastik bir malzemedir. Ülkemizde ilk olarak 1960’lı yılların başında soğuk hava depoları ile ticari buzdolabı üreticilerinin ihtiyacını karşılamak üzere üretilmeye başlanmış ve çok uzun yıllar kullanılmıştır. Diğer ülkelerde başlangıcından itibaren inşaatlarda da kullanılan bu malzeme, Türkiye’de ancak 1986’dan sonra inşaatlara girebilmiştir. Bugün diğer ülkelerde olsun, Türkiye’de olsun inşaatlarda en çok kullanılan yalıtım malzemelerinin öncülerindedir. Bunun nedeni, her türlü ısı yalıtım malzemesinin en ucuzu oluşu ve sahip olduğu teknik özelliklerdir [30]. Şekil 2.13.’te gösterildiği gibi genleştirilmiş polistiren sert köpük stiren monomerinin polimerizasyonu ile petrolden elde edilen, köpük haldeki, kapalı gözenekli ve tipik olarak beyaz renkli bir termoplastik malzemedir.



**Şekil 2.13.** Monomer Haldeki Stirenin Polimerizasyonu [31]

Polistiren taneciklerin genişmesi (şişirilmesi) ve birbirine kaynaşması ile elde edilen EPS ürünlerde, taneciklerin şişirilmesi ve köpük elde edilmesi için kullanılan gaz pentandır. Tanecik içindeki pentan hava ile yer değiştirir. Açığa çıkan pentan  $C_5H_{12}$  gazı atmosferde bulunan karbondioksit ( $CO_2$ ) ve su buharına ( $H_2O$ ) dönüşür. Bu sayede malzeme içerisinde hareketsiz halde havanın hapsoldüğü gözenekli bir yapı çıkmış olur. Malzemenin %98'i kuru ve hareketsiz hava, %2'si ise polistirendir. Hareketsiz ve kuru hava, bilinen en ekonomik, en çevre dostu ve en mükemmel ısı yalıtım malzemesidir [32].

EPS yalıtım malzemelerinin üretim aşamasında hammadde olarak kullanılacak ürünler seçilerek üretim aşamasına geçilmektedir. Şekil verme kısmında ise kullanılabilir iki yöntem vardır. İlki bir kalıba uygun şekilde şişirme gerçekleştirilir ve üretim sonucunda ekstra bir kesme işlemine gerek duyulmaz. Bu yöntem genellikle köpük bardak ve türevleri yapımında, darbe emiş özelliğinden dolayı ve mekanik özelliğinden dolayı birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.14.'te kalıba uygun şekilde şişirilen polistiren köpükler verilmiştir.



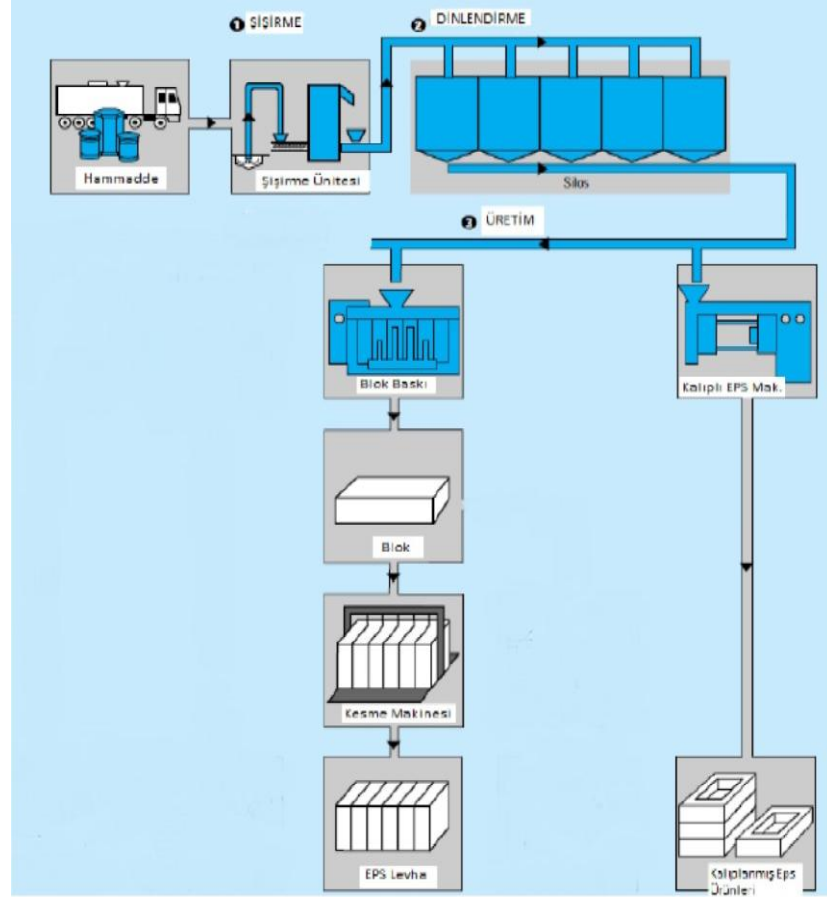
**Şekil 2.14.** EPS Kalıp Basma Yöntemiyle Üretilmiş Ürünler [37]

İkincisi ise büyük bir kalıba şişirme yapılır ve sonuç olarak çıkan ürün istenilen kalınlık ve boyutlarda kesilerek ambalajlanır. Bu işlemler sonucu çıkan ürünler kullanıma hazır hale gelmektedir. EPS malzemeler tamamen geri dönüşümlü ve doğaya zarar vermeyen ürünlerdir. Üretim aşamasında çıkan hurda malzemeler tekrar öğütme işlemine tabi tutularak kullanılabilirler. Şekil 2.15.'te levha olarak kesilmeye hazır büyük kalıp görülmektedir.



**Şekil 2.15.** Blok Kalıplama Tekniğiyle Üretilmiş Ürün [38]

Şişirici gaz olarak kullanılan pentan gazı ise organik bir gaz olduğu için insana ve çevreye zarar vermediği gibi içerisinde kloroflorokarbon ve türevleri gibi gazlar bulunmaz. EPS üretim aşamasının şematik resmi Şekil 2.16.'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.16.** EPS Üretim Aşaması [32]

Üretim aşaması 5 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar kısaca [39]:

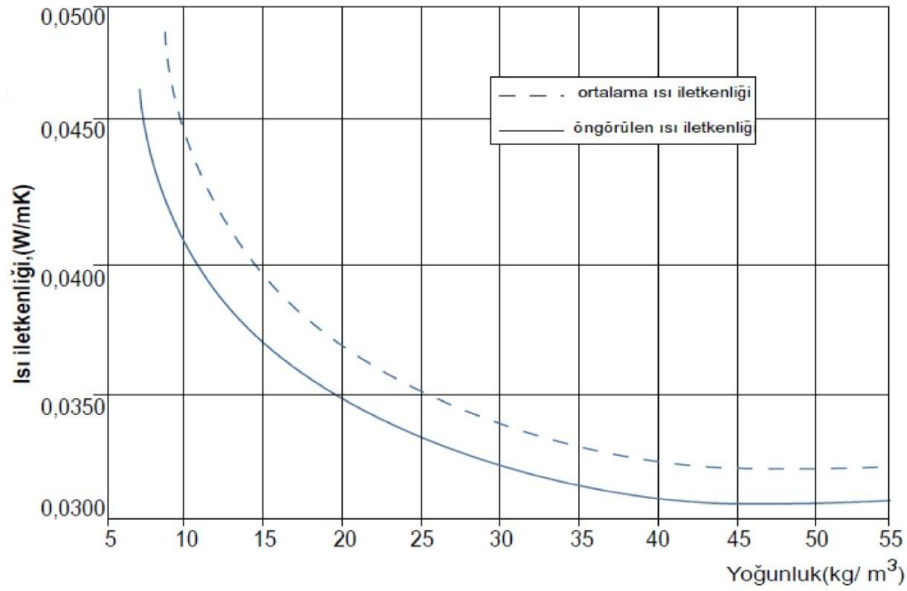
- Ön–genleşme: Polistiren granülleri her biri birbiri ile bağlantılı olmayan hücreler serisinden oluşan daha büyük tanecikler oluşturmak üzere serbest bir şekilde buhara maruz bırakılarak genişletilmektedir.
- Dinlendirme: Genleşme sonrasında tanecikler halen yoğunlaşmış buhar ve pentan gazının küçük miktarlarını içermektedir. Soğuduklarında hava kısmen diğer öğelerin yerini alarak aşamalı olarak gözeneklere nüfuz eder.
- Kalıplama: Bu tanecikler panolar, bloklar veya isteğe bağlı ürünler oluşturmak üzere kalıplanmaktadır. Kalıp ön–köpüğü şekillendirme ve muhafaza etmeye yaramaktadır ve buhar genişlemeyi teşvik etmek için tekrar kullanılmaktadır. Kalıplama sırasında buhar her bir taneciğin



komşuları ile birleşmesine yol açar, böylece de homojen bir ürün oluşturulur.

- Şekillendirme: Kısa bir soğuma döneminden sonra, kalıplanmış blok makineden çıkartılır ve ayrıca bir dinlendirme sonrasında sıcak tel elementlerinin veya başka uygun tekniklerin kullanılması suretiyle istenilen şekilde kesilip şekillendirilebilirler.
- Üretim sonrası işleme: Bitmiş ürün folyolar, plastikler, çatı keçesi, fiber-pano veya çatı ya da duvar giydirmeye malzemeleri gibi diğer kaplamalar ile lamine edilebilir.

EPS'nin en önemli özelliği ısı iletkenlik değerinin oldukça düşük oluşudur. TS 7316'ya göre yoğunluğun değişmesi ile ısı iletkenlik değerinde küçük değişiklikler vardır. EPS yalıtım levhalarının yoğunluğa bağlı olarak ısı iletkenlik değeri Şekil 2.17.'de verilmiştir [22]. Burada verilen değerler ortalama ve öngörülen hesap değerlerdir. Grafikten de anlaşılacağı üzere EPS ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik değeri yoğunluk ile ters orantılıdır.



**Şekil 2.17.** EPS Ürünlerinde ve Isı Yalıtım Levhalarında Isıl İletkenlik Değerinin Yoğunluk İle Değişimi [32]

Bazı ısı yalıtım malzemelerinin, uzun süreli yük altında kalması sonucu kalınlıklarında azalma gösterirler ve bu sebeple ısı dirençleri azalır. Bazı ısı yalıtım malzemelerinde ise köpük oluşturmak için kullanılan ve ısı iletkenliği düşük olan şişirici gazın malzemeden yavaş bir şekilde uzaklaşması sonucu, başlangıçta düşük olan ısı iletkenliği zamanla artar ve bu sebepten dolayı bu malzemelerin ısı dirençleri kullanım sırasında zamanla azalır. EPS ısı yalıtım levhalarının üretiminde kullanılan şişirici gaz, hava ile çok hızlı yer değiştirdiği için, EPS ısı yalıtım levhalarının ısı iletkenlik değeri üretimi takiben nihai değerlerine ulaşır ve zamanla kötüleşmezler. Uygulamanın gerektirdiği yoğunluklarda kullanıldıkları zaman ise kalınlıklarında da ısı direnci etkileyecek bir değişim gözlenmez [30].

EPS yalıtım malzemelerinde yoğunluklar 10–30 kg/m<sup>3</sup> arasındadır. İstenirse 60 kg/ m<sup>3</sup> yoğunluğa kadar çıkılabilir. Yoğunluğun artmasıyla basınç dayanımı, buhar geçirimsizliği ve fiyatları artar. EPS yanıcı bir malzemedir. Ancak içine özel maddeler karıştırılarak zor alev alıcı veya kendi kendine sönen tipleri de mevcuttur. EPS'nin yanabilmesi için 800 MJ/m<sup>3</sup>'lük ısı ve kendi hacminin 130 katı hava gerekir. Yapı elemanlarında sıva, şap, alçı, pano v.b. malzeme ile kaplanmış haldeki EPS levhaların yukarıda belirtilen yanma şartlarına ulaşması beklenmez. Ancak tüm polimer esaslı ve polimer katkılı malzemelerin havalandırma kanalları veya giydirme cephe sistemleri gibi hava sirkülasyonunun çok yüksek olduğu uygulamalarda uygulanması uygun değildir. Diğer yandan, EPS'nin yanması halinde çıkan gazların miktarı, ahşap gibi B2 sınıfı ve her bina bünyesine girmiş olan malzemelerin yanmasından çıkan gazlarda daha azdır. EPS bir hidrokarbon olup parlama noktası 360–370 °C'dir [40]. Kendiliğinden yanabilmesi için ortam sıcaklığının 490 °C'ye ulaşması gerekir [41].

Alevlenmeyi geciktirici olarak kullanılan kimyasallar, yanmayı önleyen veya geciktiren maddelerdir. Yanma olayı esnasında gerçekleşen malzemenin ısınması, bozunması, tutuşması ve alevin büyümesi adımlarından birisinde etki ederler. Alev geciktiriciler yanma için gerekli olan ısı, oksijen ve yakıt faktörlerinden birisini veya birkaçını sınırlayarak yanmayı durdurur veya yavaşlatırlar.

Alev geciktiriciler 3 ana gruba ayrılabilir: Bunlar halojenli alev geciktiriciler, fosforlu alev geciktiriciler ve hidrat (sulu) alev geciktiricilerdir [29].

- Halojenli alev geciktiriciler; yapılarında brom (Br), klor (Cl) ve flor (F) gibi halojen içeren alev geciktiricilerdir. Örnek olarak; dekabrom difenil eter  $C_{12}Br_{10}O$ , okta brom difenil eter  $C_{12}H_2Br_8O$ , penta brom difenil eter  $C_{12}H_5Br_5O$ , poliklor bifenil  $C_{12}H_{10} - xCl_x$  verilebilir. Halojenli alev geciktiriciler; yanma için gerekli küçük moleküllerin oluşumunu engellerler, alev üzerinde yanmayan gazlardan bir örtü oluştururlar ve bunların parçalanması endotermik olduğu için ısıyı azaltırlar ve soğutma etkisi yaparlar.
- Fosforlu alev geciktiriciler; yapılarında fosfor (P) bulunduran alev geciktiricilerdir. Örnek olarak; amonyum polifosfat (APP), kırmızı fosfor, trifenil fosfat, 2-etilhekzil difenil fosfat verilebilir. Fosforlu alev geciktiriciler; yüzey üzerinde yanmayan bir katman oluştururlar, bu katman malzeme yüzeyi üzerindeki yanma bölgesine oksijen girmesini engeller. Ayrıca yanma ile açığa çıkan ısıyı absorbe ederek, yanmanın durmasına yardımcı olurlar. Malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinde az bir değişime sebep olurken, yanma direncini artırırlar.
- Hidrat (sulu) alev geciktiriciler; yapılarında su bulunduran inorganik bileşiklerdir. Örnek olarak; alüminyum trihidroksit  $Al(OH)_3$  ve magnezyum hidroksit  $Mg(OH)_2$  verilebilir. Bu tür alev geciktiricilerde; ısı altında, alev geciktirici bileşiklerinden ayrılan su molekülleri, soğutma etkisi ile yanmayı yavaşlatır. Alüminyum trihidroksit,  $350\text{ }^{\circ}C$ 'de kütlesinin %34,6'sını, magnezyum hidroksit ise  $450\text{ }^{\circ}C$ 'de kütlesinin %30,9'unu kaybeder ve su üretir. Hidrat (sulu) alev geciktiricilerin, fazla kullanılması nedeniyle, malzemenin mekanik özelliklerini kötü yönde etkilemesi en büyük dezavantajdır. İyi bir yanma geciktirici, malzemenin yanma direncini artırırken; fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde kötüleşmeye neden olmamalıdır.

EPS yalıtım malzemelerinin ısı özelliklerinin yanı sıra mekanik özellikleri de kullanılabilirliğini ve uygulama açısından avantajını göstermektedir. EPS ısı yalıtım levhalarının mekanik özellikleri, bir binada normal şartlarda karşılaşılabilecek mekanik etkilere başarı ile dayanabilecek yeterliliktedir. Isı yalıtım malzemelerinde

kalınlığın belli bir değerden fazla azalması, malzemenin ısı performansının kabul edilemez düzeyde bozulmasına sebep olur. Bu sırada malzeme yük taşıya bile, ana görevini yerine getiremez. Bu sebeple ısı yalıtım malzemelerinde basınç dayanımı değil %10 deformasyondaki basınç gerilmesi esas alınır. Mekanik özellikler TS EN 13163 EPS yalıtım levhaları için uygulanan yönetmelikteki değerler temel alınarak ve oradaki uygulama esasları kabul edilerek oluşturulmuştur [42]. EPS için mekanik özellikler Çizelge 2.13.'te gösterilmiştir. 18, 22 ve 32 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip EPS ısı yalıtım malzemelerinin mekanik özellikleri ise interpolasyon yöntemi ile bulunmuştur.

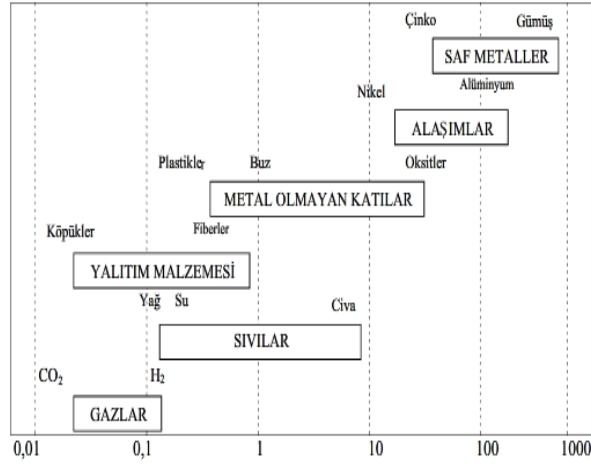
**Çizelge 2.13.** EPS İçin Mekanik Özellikler [26]

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	15	18*	20	22*	25	30	32*
<b>Basınç Dayanımı(N/mm<sup>2</sup>)</b> (%10 deformasyonda)	0,09	0,12	0,14	0,16	0,18	0,22	0,24
<b>Basınç Dayanımı(N/mm<sup>2</sup>)</b> (< %2 deformasyonda)	0,018	0,025	0,028	0,035	0,042	0,053	0,058
<b>Makaslama Dayanımı(N/mm<sup>2</sup>)</b>	0,10	0,12	0,14	0,15	0,18	0,20	0,22
<b>Bükülme Dayanımı(N/mm<sup>2</sup>)</b>	0,18	0,24	0,27	0,31	0,36	0,46	0,48
<b>Çekme Dayanımı(N/mm<sup>2</sup>)</b>	0,18	0,24	0,28	0,32	0,38	0,45	0,5

## 2.2.İsil İletkenlik Değeri

Birbirine paralel iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı 1 K = 1 °C olan homojen bir malzemenin, 1 m<sup>2</sup>'sinden 1 saatte ve 1 m kalınlıkta geçen ısı miktarıdır. Ancak ısı hesaplarında, laboratuarda ölçülen k değeri değil, 10 °C ortalama sıcaklık ve pratik nem miktarına göre çevrilen k<sub>hesap</sub> değeri kullanılmaktadır [26]. Isıl iletkenlik kısaca bir malzemenin ısıyı iletme kabiliyetinin ölçüsüdür. Malzemelerin ısı iletkenlik değeri sıcaklığa, neme, geometriye, gözenekliliğe ve malzemenin bileşimine bağlı olarak değişir.

Isıl iletkenlik değeri genel olarak, katı maddelerde en büyük ve gazlarda en küçük değerlere sahiptir. Sıvılardaki değerleri ise orta büyüklüktedir. Maddelerin değişik halleri için ısı iletkenlik değerleri Şekil 2.18.'de gösterilmiştir.



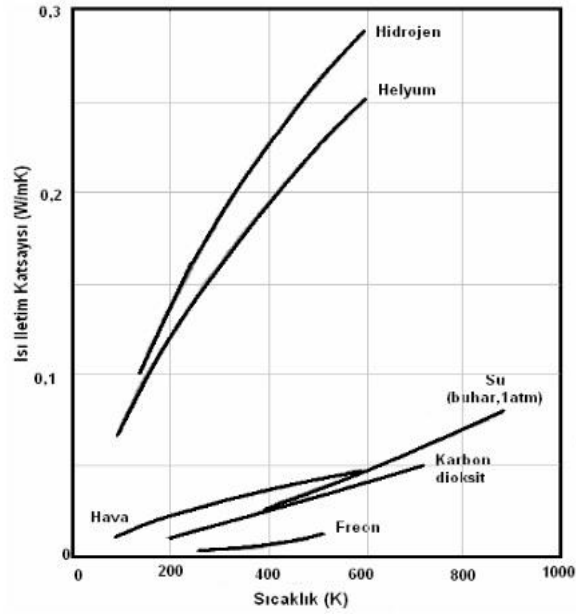
**Şekil 2.18.** Maddelerin Değişik Fazları İçin Isıl İletkenlik Değerleri [43]

İdeal gazlarda ısı iletkenlik değerini kinetik gaz teorisine göre hesaplamak mümkündür. Bu durumda ısı iletkenlik değeri;

$$k = \frac{R\sqrt{RT/\mu}}{(1 - \chi)8,65N_L d^2} = c_v \eta \quad (2.1)$$

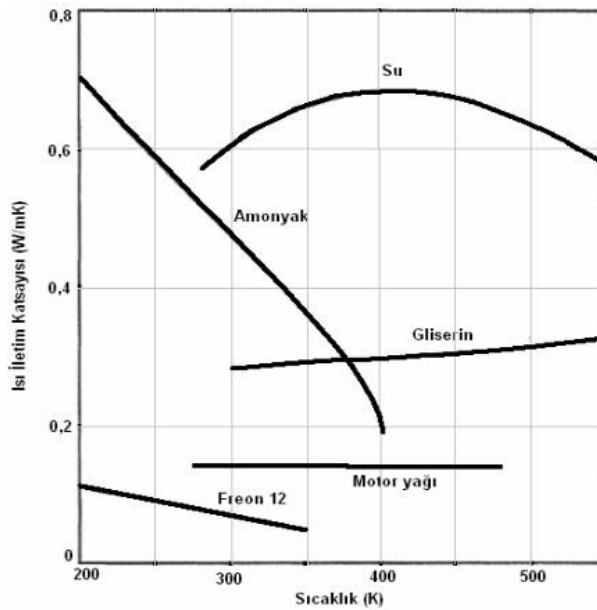
eşitliğinden hesaplanır. Burada  $c_v$  sabit hacimde özgül ısı,  $\mu$  molekül kütlesi,  $T$  mutlak sıcaklık,  $d$  molekül çapı,  $\eta$  dinamik viskozite,  $R$  genel gaz sabiti ve  $N_L = 6,023 \cdot 10^{26}$  1/kmol olarak da Losschmidt sayısı ve  $\chi$  adyabatik üstür [44].

Denklem 2.1'den de anlaşılacağı üzere ısı iletkenlik değerinin basınçla değişmediği ve mutlak sıcaklığın kareköküyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Fakat çok yüksek (200 atü'den fazla) ve çok düşük (20 mmHg'den az) basınç istisna teşkil etmektedir. Ayrıca moleküler ağırlığın azalması ve sıcaklık değerinin artması ısı iletkenlik değerinin artışına neden olmaktadır. Bazı gazlarda ısı iletkenlik değerinin sıcaklık ile değişimi Şekil 2.19.'da gösterilmiştir [43].



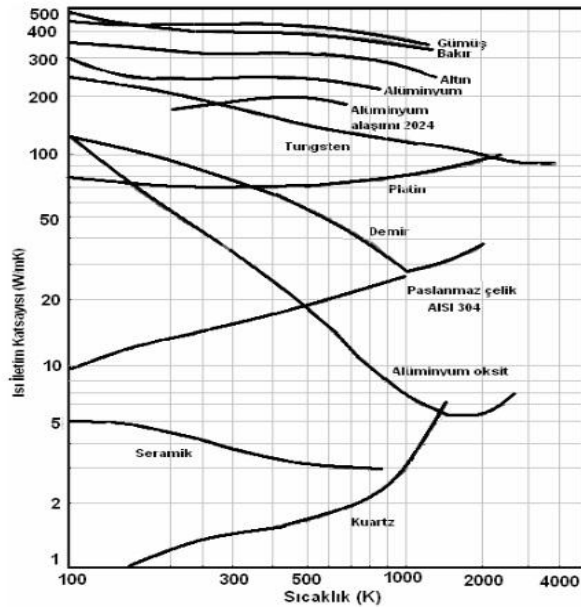
**Şekil 2.19.** Bazı Gazların Isıl İletkenlik Değerlerinin Sıcaklıkla Değişimi [43]

Sıvıların ısı iletkenlik değerleri genel olarak gazlarınkinden büyüktür. Ancak sıcaklık ile az değişirler ve genellikle azalır. Su, gliserin ve glikol maddelerinin ise bu duruma istisna oluşturlar. Bu durum ise Şekil 2.20.'de görülmektedir.



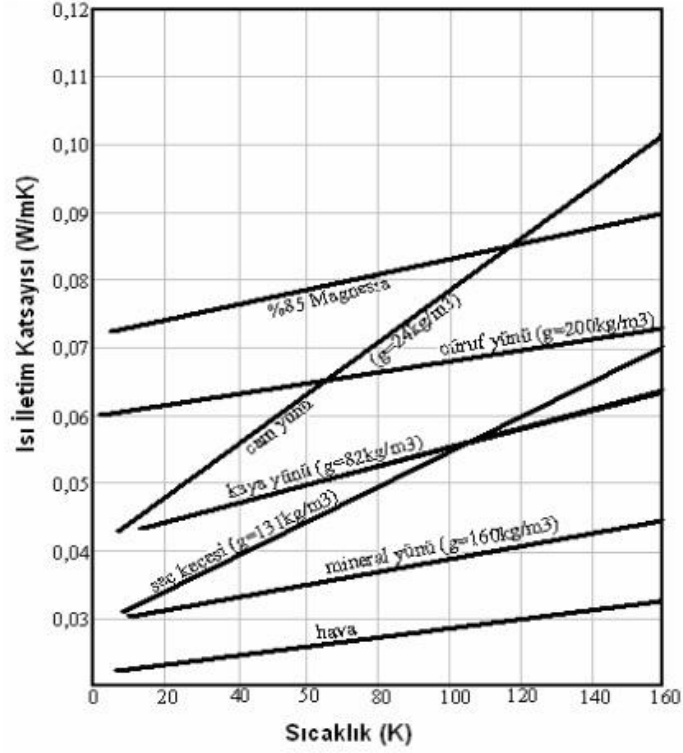
**Şekil 2.20.** Bazı Sıvı Maddelerin Isıl İletkenlik Değerleri [43]

Katılar için serbest elektron ve atomlar, kafes olarak adlandırılan bir yapının sınırları içinde kalırlar. Buna göre, ısı enerjisinin geçişi iki olgudan kaynaklanır; serbest elektronların yer değiştirmesi ve kafes titreşim dalgalarıdır. Bu etkiler sonucunda, ısıl iletkenlik değeri 'k', elektronik bileşen 'k<sub>e</sub>' ve kafes bileşeni 'k<sub>i</sub>'nin toplamı olacak biçimde yazılabilir. Bazı metallerin ısıl iletkenlik değerleri Şekil 2.21.'de gösterilmiştir [43].



**Şekil 2.21.** Bazı Metallerin Isıl İletkenlik Değerleri [43]

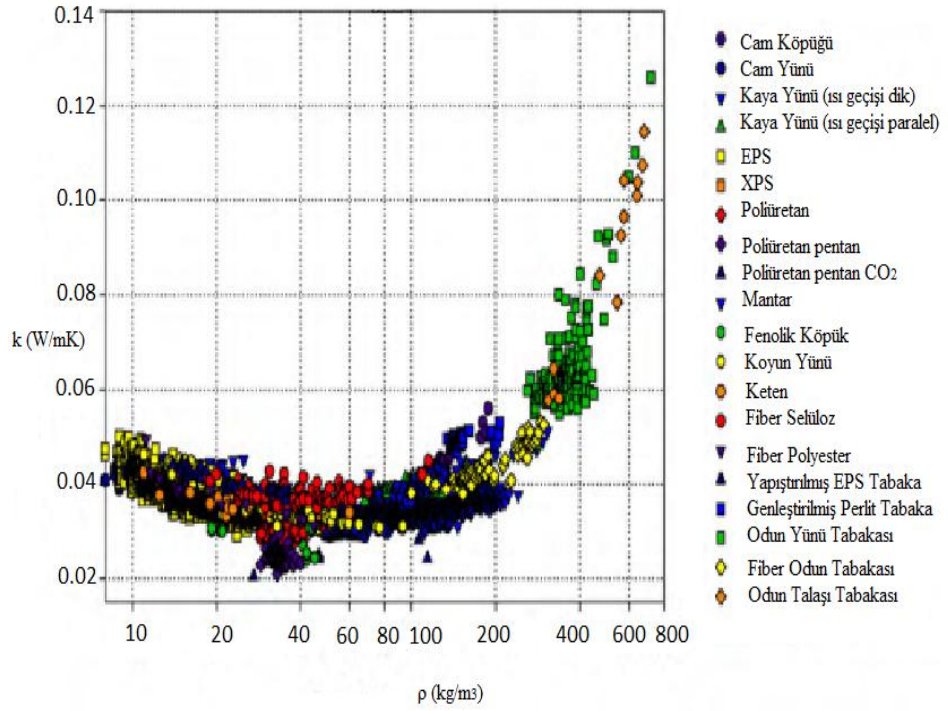
Yalıtım malzemelerinde ısı iletkenlik çok düşük değerlerdedir. Örneğin fırın ve kazan yanma odalarında kullanılan yansıtıcı yapı malzemeleri ile ısıl yalıtkan malzemelerin ısıl iletkenlik değerleri yaklaşık  $k = 0,02 \text{ W/mK}$  ile  $k = 2,5 \text{ W/mK}$  arasında değişir ve Şekil 2.22.'de görüldüğü gibi ısıl iletkenlik değeri sıcaklıkla artar.



**Şekil 2.22.** Bazı Yalıtım Malzemelerinin Isıl İletkenlik Değerleri [43]

Genellikle yoğunluk arttığı zaman ısıl iletkenlik değeri artar. Bu artış maddenin içyapısına, madde içerisinde bulunan gözeneklere ve nem derecesine bağlıdır. Nemli bir malzemenin ısıl iletkenlik değeri, kuru malzemenin ve suyun ayrı ayrı ısıl iletkenlik değerinden fazla olabilir.





**Şekil 2.23.** Bazı Yalıtım Malzemelerinin Isıl İletkenlik Değerleri [17]

Yalıtım malzemelerinin içyapısından dolayı ısı geçişi değişik yollar ile gerçekleşebilir. Bunlar katı yerlerde iletim, hava olan yerlerde iletim ve taşınım, yüksek sıcaklıklarda ise ışıınım iledir. Şekil 2.23.'te bazı yalıtım malzemelerinin 10 °C kuru havadaki ısı iletkenlik değerinin yoğunlukla değişimi gösterilmiştir [17].

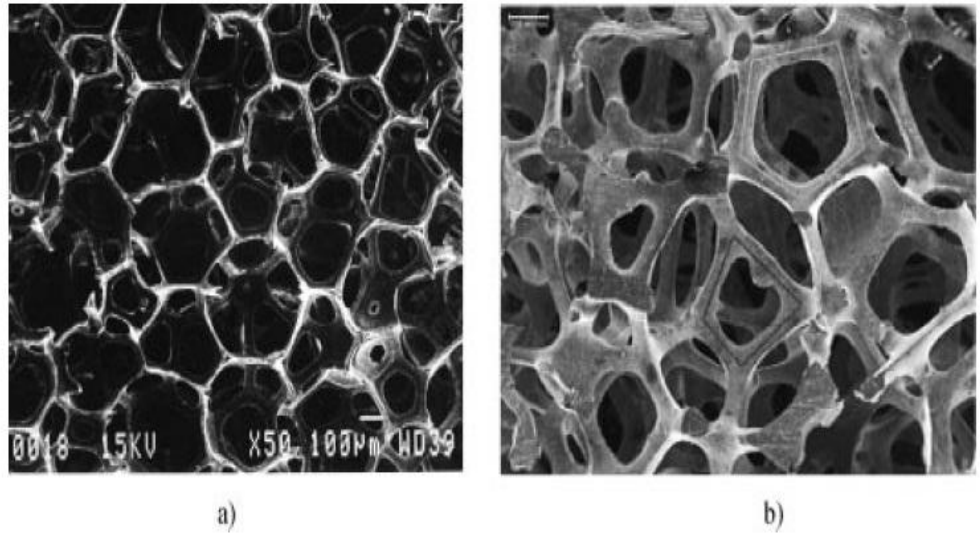
### 2.2.1. Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi

Isıl iletkenlik değerinin belirlenmesi için uygulanan yöntemleri analitik metodlar, sayısal metodlar ve deneysel metodlar olmak üzere gruplara ayırabiliriz. Isıl iletkenlik değeri malzemelerin fiziksel bir özelliği olup her malzeme için farklı değerler almaktadır. Bu değerleri alırken de malzemelerin sıcaklığına, malzemenin bileşimine, malzemenin nemine, geometriye ve malzemenin gözenekliliğine bağlıdır.

### 2.2.1.1. ısı İletkenlik Değerinin Teorik Olarak Belirlenmesi

Malzemelerin ısı iletkenliklerini belirlemede teorik olarak birçok model ortaya çıkmış ve çıkmaya devam etmektedir. Farklı modellerin ortaya çıkmasının nedeni günümüz ihtiyaçları ve yeni teknolojik gelişmelerin bir sonucudur. Gözenek yapısı, gözenekteki fazlar, gözenek büyüklüğü, açık veya kapalı olması durumu parametrelerin varlığı ve doğru olarak tanımlanmasının zorluğu ısı iletkenlik değerinin belirlenmesinin başlıca nedenidir. EPS malzemelerinin ısı iletkenliğinin belirlenmesinde literatürde birçok araştırma mevcuttur fakat burada yaygın olarak kullanılanları açıklanacaktır [6,10].

Gözenek yapısı bir başka deyişle gözenek miktarının malzeme hacmine oranı ( $\phi$ ), gözeneklerin büyüklükleri ve şekilleri çok önemlidir. Durgun hava hücresel kısımlarda çeşitli şekillerde yoğunlaşmaktadır. Bu nedenden dolayı hücre yapısına göre açık hücreli ve kapalı hücreli olmak üzere yapısal ayrıma uğramaktadır. Açık hücreli yapıda mikron seviyesinde Şekil 2.24.'te görüldüğü gibi ağ yapısına sahip bir form göze çarpmaktadır. Burada esas malzeme hücre duvarlarında yoğunlaşmıştır.



**Şekil 2.24.** Açık Hücreli Yalıtım Malzemelerinin SEM Görüntüsü

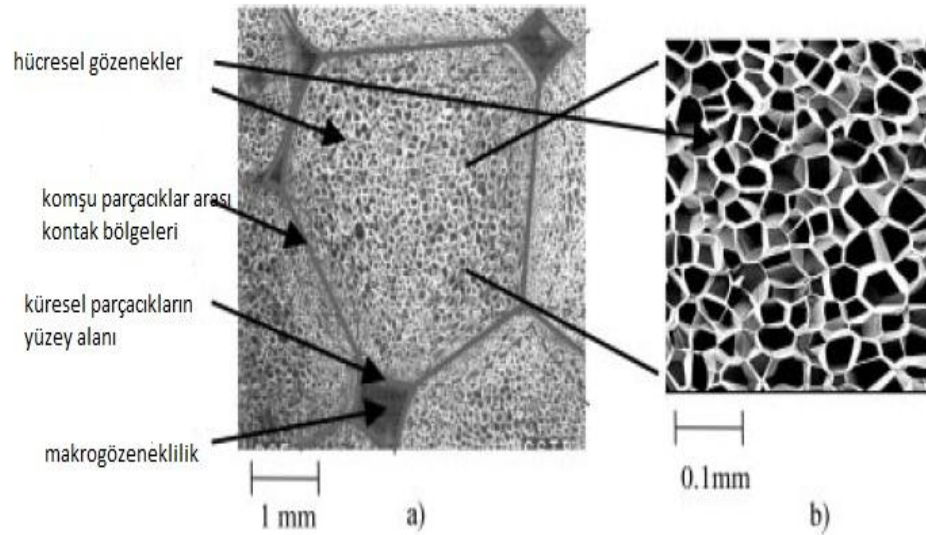
(a) Karbon Köpük (b) Alüminyum Köpük [46]

Dokular arasında bulunan boşluklarda tipik olarak hava bulunmaktadır. Bu yapının en önemli özelliği hücreler arasında kalan kısmın çapı her zaman hücre çapından küçük olmasıdır [10].

Kapalı hücre yapısında ise hücreler çok ince duvarlar tarafından sınırlanmıştır. En çok kullanım alanı polistiren ve poliüretan malzemelerdir. EPS malzemeler üretim sürecinden dolayı kendine özgü bir yapı göstermektedir. Kısaca bu yapı çift katlı gözeneklilik olarak adlandırılabilir.

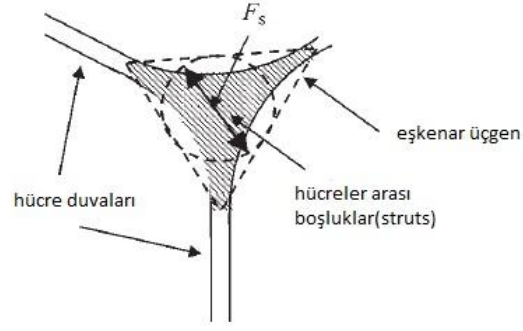
Genel olarak EPS yalıtım malzemelerinin gözenekleri iki farklı gözenek tipinden oluşur. Bunlardan birincisi yüzey analizinden geliştirilmiş polistiren yapıda birçok küçük parçacık birbirlerine kaynarlar. Böylece düzensiz şekilde ki gözenekler bu parçacıklar arasında kalır [46,47,48].

Diğer bir gözenek yapısı ise Şekil 2.25. ile gösterilen küresel küçük parçacığın SEM’de 100 kat daha büyütülmüş olarak görünen hücresel gözeneklerdir. Burada bulunan gözeneklerde hava bulunmaktadır. Kesinlikle hücreler arası boşluklar bulunmamaktadır [48]. Şekil 2.26.’da ise hücreler arası boşluklar görülmektedir.



**Şekil 2.25.** EPS’lerde Makro ve Mikro Gözeneklerin SEM Görüntüsü

(a) makroskopik (b) hücresel yapı [48]



**Şekil 2.26.** Hücreler Arası Boşluğun Kesit Görüntüsü [48]

Gözenekli malzemelerin efektif ısı iletkenlik değerini hesaplamak için literatürde birçok yöntem bulunmaktadır [48,72,73,74,75,76]. Bunlardan bazıları:

- Paralel modelde; eşdeğer plakaların yüzeyi ısı akış yönüne paraleldir. Paralel model efektif ısı iletkenliğinin maksimum değeri ile sonuçlanan minimum yalıtım sağlar. Paralel durumda efektif ısı iletkenlik aşağıdaki eşitlikle verilmiş olup burada gözenek ısı iletkenliği  $k_f$ , malzeme ısı iletkenliği  $k_m$ , hacimsel oranı  $\phi$  ve efektif ısı iletkenlik ise  $k$  ile gösterilmiştir.

$$k = [\phi k_f + (1 - \phi)k_m] \quad (2.2)$$

- Seri modelde; ısı akışının yönü plaka yüzeyine dik olduğunda, maksimum yalıtım ortaya çıkar ve efektif ısı iletkenlik değeri minimum olur. Bu durumda efektif ısı iletkenlik, oluşan kesimlerin iletkenliklerinin uyumluluk ortalaması ile verilir.

$$k = \left[ \frac{\phi}{k_f} + \frac{(1 - \phi)}{k_m} \right]^{-1} \quad (2.3)$$

- Geometrik ortalama modelde; iki bileşenli gözenekli bir malzeme efektif ısı iletkenlik bileşenlerin ısı iletkenliği ile hacim oranlarına bağlı olarak ağırlıklı geometrik ortalaması ile verilir.

$$k = [k_f^\phi \cdot k_m^{(1-\phi)}] \quad (2.4)$$

- Maxwell modelinde; bir kompozit ya da gözenekli yapıda dağınık haldeki fazların birbirleri ile temassız olduğu kabul edilir. Maxwell potansiyel enerji yaklaşımını kullanarak homojen bir ortamdaki rastgele dağılımlı ve birbirleriyle etkileşimsiz homojen kürelerden oluşan bir karma malzemenin ısı iletkenlik değerini aşağıdaki Denklem 2.5 ile açıklamıştır. Burada  $k_m$  sürekli fazın ısı iletkenliğini,  $k_f$  süreksiz fazın ısı iletkenliğini ve  $\phi$  ise süreksiz fazın hacim oranını göstermektedir.

$$k = k_m \left[ \frac{k_f + 2k_m - 2\phi(k_m - k_f)}{k_f + 2k_m + \phi(k_m - k_f)} \right] \quad (2.5)$$

- Fricke ve Burgers modelinde; Maxwell modelini yeniden düzenlemişler ve gözenek yapısının elips şeklini kullanmışlardır.

$$k = \frac{k_m \phi_m + k_f(1 - \phi_m)F}{\phi_m + (1 - \phi_m)F}, \quad F = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left[ 1 + \left\{ \left( \frac{k_f}{k_m} \right) - 1 \right\} g_i \right]^{-1} \quad (2.6)$$

ve  $\sum_{i=1}^3 g_i = 1$ . Bu modelde parçacıklar birbirlerinden etkilenmemektedirler. F iki faz arasındaki ortalama sıcaklık gradyanının oranı ve  $g_i$  elipsin yarı asal eksenidir.

- Rayleigh modelinde; gözenekler küre şeklinde ve kübik sırada yerleştirilmiştir. Rayleigh modeli o kadar sabit ve yapaydır ki pratik durumlarda karışımların ısı iletkenlik değerini belirlemeyebilir.

$$k = \frac{k_m [1 - 2\phi n - 1,65(\phi)^{10/3} An]}{[1 + \phi n - 1,65(\phi)^{10/3} An]}, \quad n = \frac{k_m - k_f}{2k_m + k_f}, \quad A = \frac{3k_m - 3k_f}{4k_m + 3k_f} \quad (2.7)$$

- Bruggeman modelinde; birbirine bağlanmış iki fazın efektif ısı iletkenlik katsayısını hesaplamada uygulanabilecek ve ‘efektif ortam’ kavramını kullanan bir denklem önermiştir. Bu yaklaşımda iki faz birbirinin yerine

geçebilir roller oynamaktadır. Landauer, gerçekte Bruggeman denkleminin çözümüne uygun denklemi pratik bir şekilde ifade etmiştir. Bu yaklaşım ‘Efektif Ortalama Süzülme Teorisi’ (Effective Medium Percolation Theory, EMPT) olarak adlandırılmaktadır. Burada  $\delta$ ;  $k_m$  ve  $k_f$ 'ye bağlı bir ifadedir ve değişik formlar için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$k = \frac{k_m \left[ 1 - \left( 1 - \frac{k_f}{k_m} \right) \frac{2}{3} \phi_f \delta \right]}{[1 + (\delta - 1) \phi_f]} \quad (2.8)$$

$$\text{küresel } \frac{3k_m}{2k_m + k_f}, \quad \text{silindirik } \frac{5k_m + k_f}{3(k_m + k_f)}, \quad \text{tabaka } \frac{k_m + 2k_f}{3k_f} \quad (2.9)$$

- Meredith ve Tobias modelinde; araştırmacılar Bruggeman'ın ifadesini geliştirerek aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir.

$$k = k_m \left[ \frac{\frac{2k_m + k_f}{k_m - k_f} - 2\phi + 0,409 \left[ \frac{6k_m + 3k_f}{4k_m + 3k_f} \right] \phi^{\frac{7}{3}} - 2,133 \left[ \frac{3k_m - 3k_f}{4k_m + 3k_f} \right] \phi^{\frac{10}{3}}}{\frac{2k_m + k_f}{k_m - k_f} + \phi + 0,409 \left[ \frac{6k_m + 3k_f}{4k_m + 3k_f} \right] \phi^{\frac{7}{3}} - 0,906 \left[ \frac{3k_m - 3k_f}{4k_m + 3k_f} \right] \phi^{\frac{10}{3}}} \right] \quad (2.10)$$

- Weiner modelinde; ilk defa elektrik direnç metodunu kullanarak gözenekli malzemelerde ısı iletkenlik değerini tespit etmiştir. Çalışmasında çözümünü kübik parçacıkların kübik bir düzende olduğunu varsayarak işlemlerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca çalışmasında kübik yapılara ek olarak küresel yapılara uygulamış ve diğer araştırmacıların çözümleriyle uyum içinde olduğunu ispatlamıştır.

$$k = k_m \left[ \frac{k_m + (n - 1)k_m - (n - 1)\phi(k_m - k_f)}{k_f + (n - 1)k_m + \phi(k_m - k_f)} \right] \quad (2.11)$$

Burada ifade edilen n değeri deneysel bir sabittir ve küresel yapı için 3 olarak alınabilir.

- Lewis ve Nielsen modelinde; araştırmacılar Halpin–Tsai denklemini düzenleyerek aşağıdaki formata dönüştürmüşlerdir.

$$k = k_m \left[ \frac{1 + AB\phi}{1 - B\phi} \right] \quad (2.12)$$

Denklemden verilen A değeri;

$$A = K_E - 1 \quad (2.13)$$

$K_E$  ile ifade edilen değer ise Einstein katsayısı olarak ifade edilir.

$$\beta = \frac{k_f/k_m - 1}{k_f/k_m + A} \quad (2.14)$$

$$\phi = 1 + \left( \frac{1 - \phi_m}{\phi_m^2} \right) \phi \quad (2.15)$$

A ve  $\Phi_m$  değerleri çeşitli şekil ve ısı geçişinin yönüne bağlı olarak aşağıdaki Çizelge 2.14. ve Çizelge 2.15.'ten bulunabilir.

**Çizelge 2.14.** Çeşitli Sistemler İçin A Değerleri [54]

Fazın Şekli	Isı Geçişinin Yönü	A
<b>Küp</b>	Herhangi	2,0
<b>Küresel</b>	Herhangi	1,50
<b>Dağınık Küresel</b>	Herhangi	3
<b>Rastgele Sıralanmış Çubuklar (En-Boy Oranı = 2)</b>	Herhangi	1,58
<b>Rastgele Sıralanmış Çubuklar (En-Boy Oranı = 4)</b>	Herhangi	2,08
<b>Rastgele Sıralanmış Çubuklar (En-Boy Oranı = 6)</b>	Herhangi	2,8
<b>Rastgele Sıralanmış Çubuklar (En-Boy Oranı = 10)</b>	Herhangi	4,93
<b>Rastgele Sıralanmış Çubuklar (En-Boy Oranı = 15)</b>	Herhangi	8,38
<b>Eksen Dışı Sıralanmış Fiberler</b>	Fiberlere Paralel	2L/D (L fiber uzunluğu, D fiber çapı)
<b>Eksen Dışı Sıralanmış Fiberler</b>	Fiberlere Dik	0,5

**Çizelge 2.15.** Çeşitli Sistemler İçin  $\Phi_m$  Değerleri [54]

Parçacıkların Şekli	İçerik Şekli	$\Phi_m$
<b>Küresel</b>	Kapalı Hekzagonal	0,7405
<b>Küresel</b>	Yüzeye Merkezlenmiş Kübik	0,7405
<b>Küresel</b>	Hacme Merkezlenmiş Kübik	0,60
<b>Küresel</b>	Basit Kübik	0,524
<b>Küresel</b>	Rastgele Kapalı	0,637
<b>Çubuk veya Fiber</b>	Eksen Dışı Hekzagonal Kapalı	0,907
<b>Çubuk veya Fiber</b>	Eksen Dışı Basit Kübik	0,785
<b>Çubuk veya Fiber</b>	Rastgele Eksen Dışı	0,82
<b>Çubuk veya Fiber</b>	3 Boyutlu Rastgele	0,52

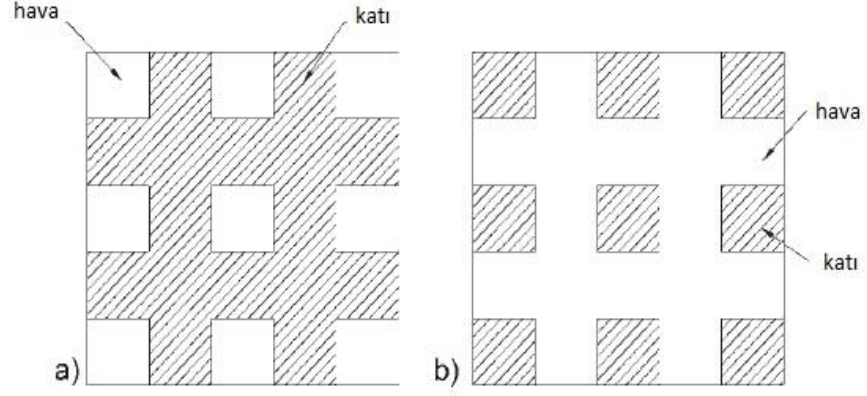
- Russel modelinde; efektif ısı iletkenlik sayısını tahmin etmek için bir fazdaki küplerin kübik bir yapıda olduğunu varsaymıştır. Bu faz şekilleri Şekil 2.27.'de verilmiştir. Eğer dağılmış olan faz katı sürekli faz akışkan ise efektif ısı iletkenlik değeri aşağıdaki eşitlikle verilmiştir.

$$k = \frac{k_f \left[ (\phi_m)^{\frac{2}{3}} + \left( \frac{k_f}{k_m} \right) \left( 1 - \phi_m^{\frac{2}{3}} \right) \right]}{\left[ (\phi_m)^{\frac{2}{3}} - \phi_m + \left( \frac{k_f}{k_m} \right) \left( 1 + \phi_m - \phi_m^{\frac{2}{3}} \right) \right]} \quad (2.16)$$

Burada katının ısı iletkenliği( $k_m$ ), akışkanın ısı iletkenliği( $k_f$ ), ve hacimsel oran( $\phi_m$ ) şeklindedir. Eğer bu durumu yani dağılmış yapı akışkan sürekli yapı katı ise Denklem 2.17 ile yazılabilir.

$$k = \frac{k_s \left[ (\phi_f)^{\frac{2}{3}} + \left( \frac{k_m}{k_f} \right) \left( 1 - \phi_f^{\frac{2}{3}} \right) \right]}{\left[ (\phi_f)^{\frac{2}{3}} - \phi_f + \left( \frac{k_m}{k_f} \right) \left( 1 + \phi_f - \phi_f^{\frac{2}{3}} \right) \right]} \quad (2.17)$$





Şekil 2.27. Russel Efektif Isıl İletkenlik Modelleri [48]

- Cheng ve Vachon modelinde; küresel parçacıklar için uygulamalı bir model geliştirmişlerdir.

Eğer  $k_m > k_f$  ise,

$$k = \left[ \frac{2}{\sqrt{C(k_f - k_m)(k_m + B)(k_f - k_m)}} \tan^{-1} \left[ \frac{B}{2} \sqrt{\frac{C(k_f - k_m)}{k_m + B(k_f - k_m)}} \right] + \frac{1 - B}{k_m} \right] \quad (2.18)$$

Eğer  $k_f > k_m$  ise,

$$k = \left[ \frac{1}{\sqrt{C(k_f - k_m)(k_m + B(k_f - k_m))}} \ln \frac{\sqrt{k_m + B(k_f - k_m)} + \frac{B}{2} \sqrt{C(k_f - k_m)}}{\sqrt{k_m + B(k_f - k_m)} - \frac{B}{2} \sqrt{C(k_f - k_m)}} + \frac{1 - B}{k_m} \right] \quad (2.19)$$

denklemlerdeki B ve C katsayıları ise,

$$B = \sqrt{\frac{3\phi}{2}} \text{ ve } C = -4 \sqrt{\frac{2}{3\phi}} \quad (2.20)$$

- Woodside ve Messmer modelinde; araştırmacılar ısı iletimini direnç yaklaşımını kullanarak üç farklı şekilde gerçekleştirdiğini varsaymışlardır. Bunlar katıdan katıya iletim, sıvıdan sıvıya iletim, katıdan sıvıya iletim ve bunun tam tersi şeklindedir. Burada  $\alpha + \beta + \gamma = 1$  ve  $\alpha\gamma + \beta = (1 - \theta)$ .  $\alpha$ ,  $\beta$  ve  $\gamma$  küp formasyonu için parametreler olup  $\delta$  ise F'nin karşıtı şeklinde ifade edilmiştir;

$$k = \alpha \left[ \frac{k_s k_f}{k_s(1-\gamma) + k_f \gamma} \right] + \beta k_s + \delta k_f, \quad \delta = \frac{1}{F} = \theta - 0,03 \quad (2.21)$$

- Brailsford ve Major modelinde; araştırmacılar Maxwell modelini geliştirmişler ve geniş bir aralıkta kullanımını sağlamışlardır. Bileşenleri oluşturan her bir fazın belirli oranlarda birleştiğini kabul etmişlerdir. Efektif ısı iletkenlik değeri üç fazlı sistemler için aşağıdaki şekilde tanımlanmış olup c ve d sırasıyla sürekli ve dağınık fazı simgelemektedirler.

$$k = \frac{\left[ k_c \theta_c + k_{d1} \theta_{d1} \left( \frac{3k_c}{2k_c + k_{d1}} \right) + k_{d2} \theta_{d2} \left( \frac{3k_c}{2k_c + k_{d1}} \right) \right]}{\left[ \theta_c + \theta_{d1} \left( \frac{3k_c}{2k_c + k_{d1}} \right) + \theta_{d2} \left( \frac{3k_c}{2k_c + k_{d1}} \right) \right]} \quad (2.22)$$

- Lichtenecker modelinde; iki fazlı sistemin özelliklerini ve davranışlarını tanımlamak için deneysel bir ifade ortaya atmıştır. Ortaya konulan bu ifade ise araştırmacı tarafından karışımların logaritmik kanunu ismiyle anılmıştır. Bu kanuna göre efektif ısı iletkenlik değeri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\log(\lambda_e) = \phi_f \log(\lambda_f) + \phi_s \log(\lambda_s) \quad (2.23)$$

Burada f ve s sırasıyla gözenek ve katı kısmı ifade etmekte ve e ise karışımın özelliklerini göstermektedir. Bu ifadeyi logaritmik ifadeden çıkararak aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\lambda_e = (\lambda_f)^{\phi_f} \cdot (\lambda_s)^{\phi_s} \quad (2.24)$$

Bruggeman [45] Lichtenecker'in tanımladığı ifadelerin kullanabilirliğini genişleterek aşağıdaki ifadeleri vermiştir.

$$\lambda_e = (\lambda_f)^{\phi_f(1+k\phi_s)} \cdot (\lambda_s)^{\phi_s(1+k\phi_f)}, \quad k = \frac{3}{2} \left( \frac{\lambda_s - \lambda_f}{(2\lambda_s + \lambda_f)(\lambda_s + \lambda_f)} \right) \quad (2.25)$$

- Springer ve Tsai modelinde;

$$k = k_m \left[ 1 - 2 \sqrt{\frac{\phi}{\pi}} + \frac{1}{2 \left( \frac{k_m}{k_f} - 1 \right)} \left( \pi - \frac{4}{\sqrt{1 - 4 \left( \frac{k_m}{k_f} - 1 \right)^2 \frac{\phi}{\pi}}} \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{1 - 4 \left( \frac{k_m}{k_f} - 1 \right)^2 \frac{\phi}{\pi}}}{1 + 2 \left( \frac{k_m}{k_f} - 1 \right) \sqrt{\frac{\phi}{\pi}}} \right) \right) \right] \quad (2.26)$$

- Baschirow ve Selenew modelinde;

$$k = k_m \left[ 1 - \frac{\left( \frac{6\phi}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} \pi}{4} + \frac{\left( \frac{6\phi}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \pi \frac{k_f}{k_m - k_f}}{2} \left[ 1 - \frac{k_f}{k_m - k_f} \ln \left( 1 + \frac{\left( \frac{6\phi}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}}{\frac{k_f}{k_m - k_f}} \right) \right] \right] \quad (2.27)$$

- Zehner ve Schlünder modelinde;

$$k = k_f \left[ 1 - (1 - \phi)^{\frac{1}{2}} + \frac{2(1 - \phi)^{\frac{1}{2}}}{1 - \frac{k_f}{k_m} 1,25 \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{\frac{10}{9}}} \left[ \frac{\left( 1 - \frac{k_f}{k_m} \right) 1,25 \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{\frac{10}{9}}}{\left( 1 - \frac{k_f}{k_m} 1,25 \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{\frac{10}{9}} \right)^2} \ln \left( \frac{1}{\frac{k_f}{k_m} 1,25 \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{\frac{10}{9}}} \right) - \frac{1,25 \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{\frac{10}{9}} + 1}{2} - \frac{1,25 \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{\frac{10}{9}} - 1}{1 - \frac{k_f}{k_m} 1,25 \left( \frac{1 - \phi}{\phi} \right)^{\frac{10}{9}}} \right] \right] \quad (2.28)$$

### 2.2.1.2. Isıl İletkenlik Değerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi

İki sistem arasında veya sistemle çevresi arasında bir sıcaklık farkı olduğu zaman enerji transfer edilmektedir. Yalnız sıcaklık farkından dolayı bir sisteme transfer edilen bu enerjiye, termodinamikte ısı enerjisi denilmektedir. Diğer taraftan termodinamiğin ikinci kanununa göre ısı, sıcak bir sistemden daha soğuk bir sisteme doğru akmaktadır. Isı doğrudan doğruya ölçülemez ve gözlenemez, ancak doğrudan tesirler gözlenebilir ve ölçülebilir. Belirli bir sıcaklık farkından dolayı birim zamanda

geçen ısı miktarının hesabı, mühendislik açısından çoğu zaman önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Isı, bir sistem ile sistemin çevresi arasında yalnız sıcaklık farkından dolayı geçen bir enerji şeklidir. Bu enerji miktarı; iletim, taşınım ve ışıınım ısı geçiş şekillerinden birisi, ikisi veya üçü birden kullanılarak belirlenebilir [43].

Yapı ve çeşitli ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenliğinin ölçümü, kararlı rejimde ve geçici rejimde olmak üzere iki yöntemle yapılmaktadır. Alışılmış yöntem, kararlı durumda ısıtılmış plaka yöntemidir. Bu metot ile ısıtılmış bir plakanın iki tarafına simetrik olarak yerleştirilen, levha biçiminde muayene örneğinin, ortalama ısı iletkenliği bulunur. Geçici rejimde ölçüm yapan cihazlar, daha ufak boyutlardaki malzemelerin ısı iletkenliğini daha kısa sürede saptayabilmektedirler. Geçici rejimde ısı iletkenlik tespit eden yöntemler arasında Angström yöntemi, Flash yöntemi ve Hot Wire yöntemi sayılabilir.

Üretilen yeni malzeme sayısının hızla arttığı günümüzde ısı iletkenlik değeri, önceden bilinmesi oldukça zor olduğundan deneysel olarak bulunması gereken fiziksel bir özelliktir. Yeni verilerin güvenilirliği için ısı iletkenlik değeri ölçümünde kullanılan deney aletlerinin sistematik hatalara karşı kontrol edilmesi gerekir. Bu kontrol için farklı deney koşullarında, örneğin numune boyutunu veya ısı akım şiddetini değiştirerek, ölçümler tekrarlanır. Sonra da deney aleti, ısı iletkenlik değeri bilinen birkaç malzemenin denenmesi ile kontrol edilir. Özel bir deney düzeneğini kontrol etmek için seçilen standart veya standartlar, bu deney aletinin ölçeceği bütün ısı iletkenlik değerleri için kullanılır.

Deney verilerini rapor ederken, malzemeyi tanımlamak için mümkün olduğu kadar çok bilgi verilmelidir. Bu bilgiler malzemenin alındığı kaynağını, kimyasal analizini, geçirdiği işlemleri, yoğunluğunu, tane büyüklüğünü, şekli ve boyutları ile ilgili ayrıntıları ve ısı akımının doğrultusunu içermelidir [56].

#### **2.2.1.2.1.Kararlı Rejimde Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi**

Isıl özelliklerin ölçümü için geliştirilen yöntemlerin en eskileri genellikle kararlı rejim yöntemleri kapsamındadır. Söz konusu yöntemlerin önemli bir kısmı standartlaştırılmış olup, halen yaygın olarak kullanılmaktadır [60,61]. Kararlı rejim

metodu sıvıların ve katıların ısı iletkenlik değerini ölçmede kullanılabilen bir yöntemdir. Bir boyutlu Fourier yasasının kullanımıyla;

$$q = kA\Delta T \quad (2.29)$$

elde edilir. Bu metot herhangi bir malzemenin ısı iletim katsayısını doğrudan ölçmek için kullanılan temel bir metottur. Bununla birlikte ısı kaybının ışıınım ve taşınım gibi farklı mekanizmalarda olduğu durumlar için düşük ısı iletkenlik değerli numunede kararlı rejimi sağlamak için uzun zaman geçmesi gerekmektedir. Bu nedenle örneğin adyabatik şartların uygulandığı durumda ısı akısının gerçek değeri dikkatli bir şekilde ölçülmelidir [55].

Kararlı rejim esasına göre ölçüm yapan tekniklerin en yaygın kullanılanları Çizelge 2.16.'da verildiği üzere; 'Isı Akısı Ölçme', 'Sıcak Levha', Sıcak Kutu' teknikleridir. Her bir aparat kendi içerisinde kontrol ve ölçümleme şekline göre farklı bileşenler içerebilmekte ve ek özelliklerine göre fiyatlandırılmaktadır.

**Çizelge 2.16.** Kullanımı Yaygın Kararlı Rejim Teknikleri

Ölçüm Tekniği	Malzeme Cinsi	Sıcaklık Aralığı (°C)	Isıl Özellik Aralığı (W/mK)
<b>Isı Akış Ölçme (Kalibreli veya Klasik)</b>	Yalıtım Malzemeleri	-100/200	0,007/1,0
<b>Sıcak Levha (Düz veya Silindirik)</b>	Katı, Opak, Kompozitler, Yalıtım Malzemeleri	-180/1000	0,0001/2
<b>Sıcak Kutu (Kalibreli veya İzoleli)</b>	Yalıtım, Mermer, Cam ve Diğer Katkı Malzemesi İçeren Yapı Kabuğu Elemanları	-20/40	Isıl Direnç Oranı 0,2 ile 5 (m <sup>2</sup> K)/W arasında

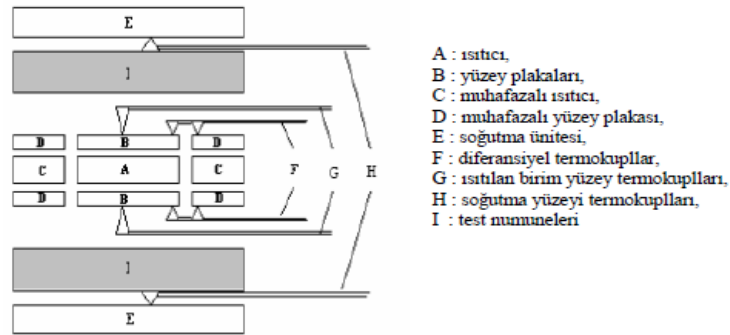
Isı akış ölçme tekniğinin ölçüm prensibi Şekil 2.28.'de gösterildiği gibi; karesel boyutlara sahip, belli kalınlıktaki ve farklı sıcaklıktaki iki levha arasına

yerleştirilmiş test numunesinden geçen eksenel ısı akısının ölçümüne dayanır. Isı akısının ölçümü, test numunesinin alt yüzeyi ile temasta olan ince bir plakaya üniform yerleştirilmiş kalibreli ısı akısı sensörleri vasıtası ile gerçekleştirilir. Isıl iletkenlik değeri, test numunesinin kalınlığı, sıcaklık gradyanı ve ölçülen ısı akısı yoluyla belirlenir. Daha büyük boyutlu numuneler veya daha yüksek ısıl iletkenlik değerine ve sıcaklık aralıklarında ölçüm için, aynı aparatın yanal yüzeyleri sıcaklık kalibreli levhalar ile kapatılarak yöntem aynen uygulanabilir [62]. Bu yöntemle ısıl iletkenlik değeri 2 kcal/mh°C (2,3 W/mK)'den küçük olan ve levha halindeki homojen numunelerin ısıl iletkenlik değerleri tayin edilir [56].



**Şekil 2.28.** Klasik Isı Akısı Ölçer [62]

Sıcak levha metodu ASTM C177, TSE EN 674 standartlarına uygun olarak ölçüm yapan bir yöntemdir ve şematik olarak Şekil 2.29.'da gösterilmiştir.

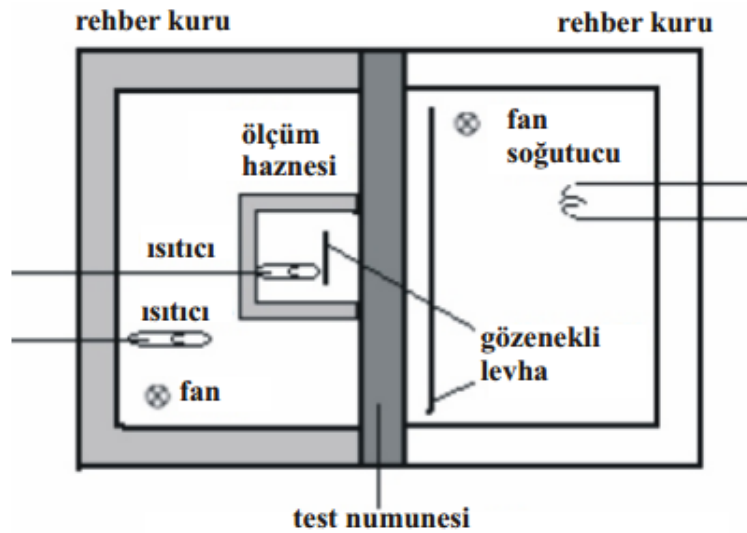


**Şekil 2.29.** Muhafazalı Levha Deney Sisteminin Genel Görünüşü [55]

Sistemdeki sıcaklık dağılımı sabitlendiğinde, ısı iletkenlik değeri;

$$k = \frac{Qd}{2\Delta TA} \quad (2.30)$$

Şekil 2.30.'da gösterilen kalibreli sıcak kutu tekniğinde ise, yukarıda açıklanan iki teknikten farklı olarak, ısı iletkenlik değeri yerine, toplam ısı transfer katsayısı belirlenir. Sıcak kutu aparatının diğer bir türü, sıcak hacmin dış yüzeylerine kalın yalıtım tabakası uygulanması suretiyle oluşturulur. Bu durumda dış yüzeylerden iletimle olan ısı transferi minimuma indirgenmiş olur.



Şekil 2.30. Kalibreli Sıcak Kutu Yöntemi [55]

#### 2.2.1.2.2. Geçici Rejimde Isıl İletkenlik Değerinin Belirlenmesi

Geçici rejim metodu, bir enerji girdisi ya da alternatif akım (AC) ile meydana gelen sıcaklık değişiminin ölçüldüğü genel bir metottur. Tam sıcaklık dengesinin sağlanmasına ve özel boyutlu numune grubuna ihtiyaç duyulmamakta, bu nedenle sıcaklığın hızlı değişebilmesi ve numunenin küçük ve ince olması bu metotta avantaj sağlamaktadır [55,58,59]. Buna ek olarak özellikle yapı malzemeleri gibi düşük ısı

iletkenlik değerlerine sahip malzemeler için sürekli rejim yöntemleri tercih edilmemesinin nedeni sürekli rejime ulaşma süresinin çok uzun olmasıdır [63]. Mühendislik malzeme teknolojisindeki hızlı gelişmeyi sürdüren ‘Temas Elemanlı Geçici Rejim Yöntemleri’ konusunda yoğun çalışmalar yapılmakta ve bu yöntemlerin en yaygın olanları Çizelge 2.18.’de geçici rejim yöntemleri kapsamına giren diğer yaygın tekniklerden olan ‘Optik Esasa Dayalı Yöntemler’ Çizelge 2.17.’de verilmiştir. Bu teknikler hassas ölçümler yapabilmekte fakat çok pahalı bileşenler içermektedirler ve bu tekniklerden en çok kullanılanları kısaca açıklanacaktır.

**Çizelge 2.17.** Kullanımı Yaygın Optik Esasa Dayalı Yöntemler

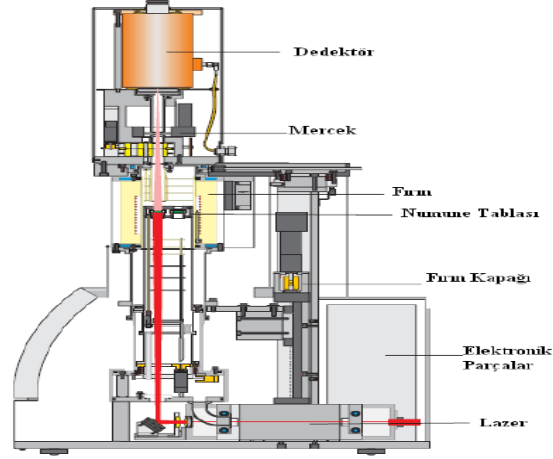
<b>Ölçüm Tekniği</b>	<b>Malzeme Cinsi</b>	<b>Sıcaklık Aralığı (°C)</b>	<b>Isıl Özellik Aralığı (W/mK)</b>
<b>Lazer Flash Tekniği</b>	Elmas, süper metaller, polimerler ve seramikler	-100/3000	0,1/1500
<b>Angström Tekniği</b>	Metal ve alaşımlar, elmas, yarı-iletkenler, çok tabakalı polimer ve seramik kompozitler	-100/1300	0,5 ve üzeri
<b>Ayarlı Işın Tekniği</b>	Metaller, polimerler, seramikler	300/2000	1/500
<b>Foto termal Teknikler</b>	Katı malzemelerden oluşan küçük numuneler	-50/500	0,1/200



**Çizelge 2.18.** Kullanımı Yaygın Temas Yüzeyle Geçici Rejim Teknikleri

<b>Ölçüm Tekniği</b>	<b>Malzeme Cinsi</b>	<b>Sıcaklık Aralığı (°C)</b>	<b>Isıl Özellik Aralığı (W/mK)</b>
<b>1)Çizgisel Isı Kaynağı</b>			
<b>a) Sıcak Şerit</b>	Cam, gıda maddesi, seramik	-50/500	0,1/5
<b>b) Sıcak Tel</b>	Fırın malzemeleri; mineral, cam, plastik, granül ve parçacık içeren katı, sıvı ve gazlar	-40/1600	0,001/20
<b>c) İğne Sensör</b>	Toprak, mineral, katı ve erimiş polimer ve gıda maddeleri, lastik tozu	-50/500	0,05/20
<b>2)Düzlemsel Isı Kaynağı</b>			
<b>a) Periyodik Sinyal</b>	Polimer, taş ve kaya, seramik, bazı alaşımlar, ısı yalıtkanlar, su ve yağ numuneleri, topraki	-40/400	0,05/50
<b>b) Doğrusal Sinyal</b>	mineral, lastik, parçacık, toz,		
<b>c) Sıcak Plaka - Doğrusal Sinyal</b>	bazı yapı malzemeleri, erimiş gıda maddesi ve erimiş polimerler		
<b>3)Disk Isı Kaynağı</b>			
<b>a) Gustafsson Sensörü</b>	Metaller, alaşımlar, seramikler, cam ve polimerler, fırın malzemeleri, kompozitler ve toz metalürji ürünleri	-70/700	0,05/200

Lazer flaş metodunda ani ısı sinyalleri lazer tarafından üretilmekte ve numunenin ön yüzeyinden emilmektedir. Bu ısı sinyali numunenin diğer yüzeyine iletilmekte ve sıcaklık artışı bir sensör ile izlenmektedir. Lazer flaş yöntemi ile ölçüm yapan test düzeneği Şekil 2.31.'de gösterilmiştir [57,58,59].



**Şekil 2.31.** LFA–457 Lazer Flaş Deney Düzenegi [55]

Lazer kaynağı vasıtasıyla ısıtılan numunenin arka yüzeyindeki sıcaklık değişimi cihaz tarafından zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir. Numune arka yüzeyindeki sıcaklık değişimi,

$$\Delta T(d, t) = \frac{Q}{\rho c_p D \pi r^2} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{d^2}\right) \right] \quad (2.31)$$

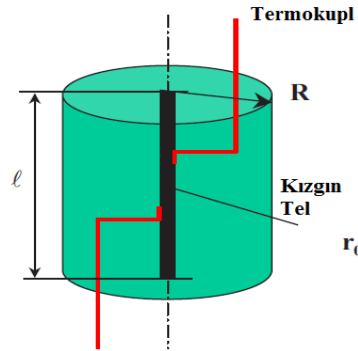
ile ifade edilir. Burada Q numunenin ön yüzeyinden emilen enerji, d ve r sırasıyla numunenin kalınlığı ve yarıçapıdır. Sistemde, ölçüm yapılacak sıcaklık değerlerine ulaşıncaya kadar numunenin sıcaklık değerleri bilgisayar sistemi tarafından sürekli analiz edilir ve veri tabanındaki standart eğri ile karşılaştırılarak ısı yayılım katsayısı değerleri elde edilir. Isıl yayılım katsayısı numune kalınlığı d ve ısı transfer yarı süresi  $t_{1/2}$  kullanılarak aşağıdaki Denklem 2.32 ile bulunur.

$$\alpha = \frac{1,37d^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (2.32)$$

Lazer flaş tekniğinde çok geniş sıcaklık aralığında (170 K–2900 K) ölçümler yapabilmektedirler [62]. Bu teknikte yüksek sıcaklık ölçümleri için numunede radyasyona bağlı hasara neden olmamak için önlem alınmalıdır. Yarı geçirgen bir

numune için yüzeyde siyah bir kaplamaya ihtiyaç duyulmakta olup, ince bir numune için sıcaklık artışı dikkatli bir şekilde kontrol edilmelidir.

Kızgın tel metodu ASTM C 1113, TSE EN 993 standardına göre akışkan ve katıların ısı iletkenlik değerini doğrudan ölçen tipik bir temaslı geçici rejim metodudur. Kızgın tel metodunun çalışma prensibi basit bir şekilde Şekil 2.32.'de verilmiştir.



Şekil 2.32. Kızgın Tel Metodu [64]

Kızgın tel metodunun çalışma prensibi, ısı iletkenlik değeri belirlenecek numune üzerinden sabit bir elektrik akımı geçirilerek ısıtılır. Isınan numunenin sıcaklık değişimi  $\Delta T$  çeşitli zaman değerlerinde ölçülür. Meydana gelen ısı tüm yönlerde ışıkmaktadır ve bu malzeme içindeki sıcaklığın zamanla artmasına neden olmaktadır [65,66]. Malzemenin ısı iletkenlik değeri basit bir formülle hesaplanabilir;

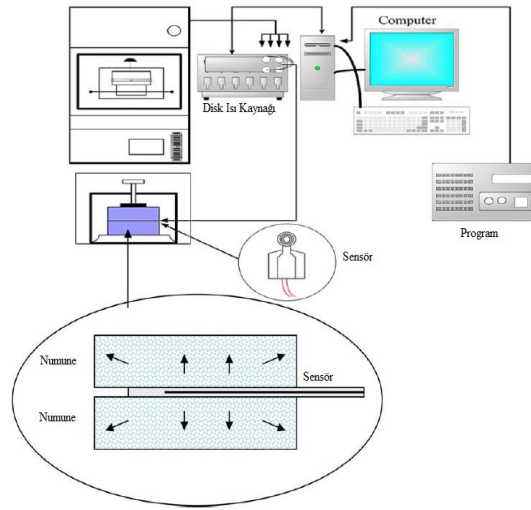
$$\theta_i(r_0, t) = \frac{\varphi}{4\pi kl} \ln(t) + C^{te} \quad (2.33)$$

Burada  $r_0$  ve  $t$  telin yarıçapı ve uzunluğu,  $k$  belirlenecek ısı iletkenlik değeri ve  $C^{te}$  ise;

$$C^{te} = \varphi_m R_T - \frac{\varphi_m}{4\pi kl} \gamma_e - \frac{\varphi_m}{4\pi kl} \ln\left(\frac{r_0^2}{4\alpha}\right) \quad (2.34)$$

Denklem 2.34'te verilen  $\gamma_e$  Euler sabitidir ve değeri yaklaşık olarak 0,57721'dir [64].

Disk ısı kaynağının kullanıldığı ısıl iletkenlik belirleme yönteminin şematik olarak şekli Şekil 2.33.'de gösterilmiştir. Bu yöntem numunelerin; ısıl iletkenlik, ısıl yayılım ve özgül ısı gibi termal özelliklerini belirlemede yardımcı olur. Bu yöntemin temeli geçici ısı tekniği temeline dayanmaktadır. Disk ısı kaynağı çift spiral şekline sahip olan bir sensör içerir. Bu sensör numunenin sıcaklığının artırılması için bir ısı kaynağı olarak görev yapar ve zamana bağlı sıcaklık artışını kaydederek ısıl iletkenlik değerini tespit eder [67].



**Şekil 2.33.** Disk Isı Kaynaklı Ölçüm Cihazı [67]

Her bir metot teknik avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Lazer flaş tekniği oda sıcaklığının altındaki sıcaklıklardan ana malzemenin erime sıcaklığına kadar kolayca kullanılabilir, oysa diğer teknikler sadece düşük sıcaklıklarda kullanışlıdır. Bununla birlikte flaş tekniği kaplama ve ana malzemenin kalınlığına kritik bir şekilde bağlıysen, diğer teknikler için bu söz konusu değildir. Deney metotlarının bu avantaj ve dezavantajlarını kullanarak oluşturulacak olan cazip bir yaklaşım, oda sıcaklığına yakın değerlerde diğer yöntemlerin her birini kullanarak ölçüm yapmak, daha sonra yüksek sıcaklık ölçümleri için lazer flaş tekniğinin kullanımınıdır [55,57].

### 3. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

#### 3.1.Sayısal Çalışmalar

Sonlu elemanlar yönteminin başlangıç tarihi geçen yüz yılın altmışlı yılları sayılsa da aslında temelini 1908 yılında Ritz'in öz eşlenik operatörlerle ilgili diferansiyel problemlerin çözümü için önerdiği varyasyonel yöntem oluşturmuştur. Daha sonra bu yöntem Galerkin tarafından diğer operatörler için geliştirilmiştir. Günümüzde diferansiyel denklemlerle ilgili matematiksel modellerin oluşturulması ve elde edilen problemin bilgisayarda çözümlenmesi açısından en kapsamlı ve evrensel yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Be nedenle sonlu elemanlar yöntemi bilimsel ve teknolojik problemlerin sayısal çözümlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Sonlu elemanlar yönteminin boyutlarını göstermek için, bunun hem matematiksel analiz, hem diferansiyel denklemler, hem sayısal yöntemler, hem bilgisayar bilimleri, hem de çeşitli mühendislik bilimleri dallarıyla iç içe olduğunu söylemek yeterlidir. Bu açıdan sadece 35 senelik geçmişi olup ta bu kadar çok yönlü gelişen benzeri bir yöntemin olmadığı söylenebilir.

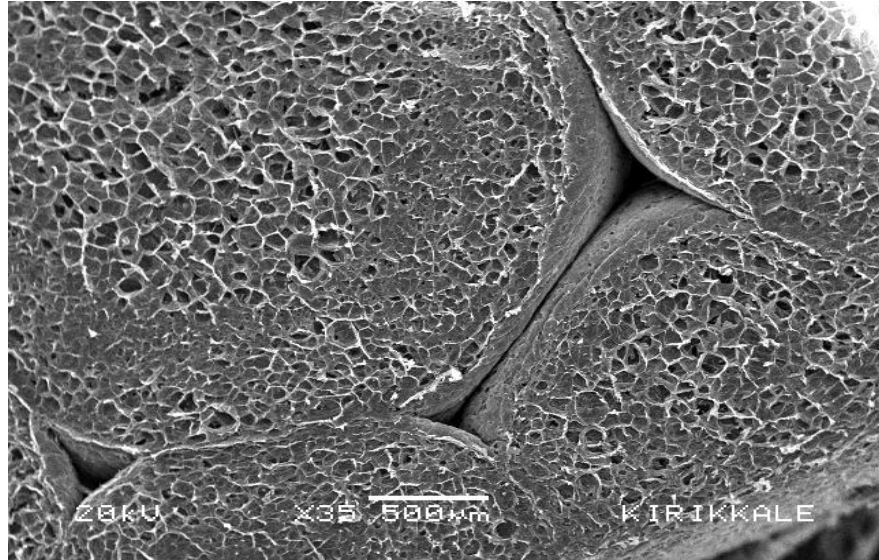
Sonlu elemanlar metodundaki temel düşünce, karmaşık bir probleme, problemi basite indirgeyerek bir çözüm bulmaktır. Esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmekte, ancak bu sonucun çözüm için daha fazla çaba harcayarak iyileştirilmesi ve kesin sonuca çok yaklaşılması, hatta kesin sonuca ulaşılması mümkün olmaktadır. Elde bulunan geleneksel matematik araçlarının kesin sonucu, hatta yaklaşık bir sonucu dahi bulmakta yetersiz kalması durumunda ise sonlu elemanlar metodu kullanılabilir tek metot olmaktadır.

Özel problemlerin çözümü için genel bir programın kullanılabilir olması, sonlu elemanlar metodunun güçlü ve çok amaçlı bir araç olmasına neden olmuş ve çok sayıda genel amaçlı sonlu elemanlar program paketi geliştirilmiştir. Bu paketlerden bazıları oldukça genel amaçlı olup, değişik mühendislik alanlarındaki problemlerin çözümü için çok az veya hiçbir değişikliğe gerek duyulmadan kullanılabilir.

### 3.1.1. Isıl İletkenlik Değerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi

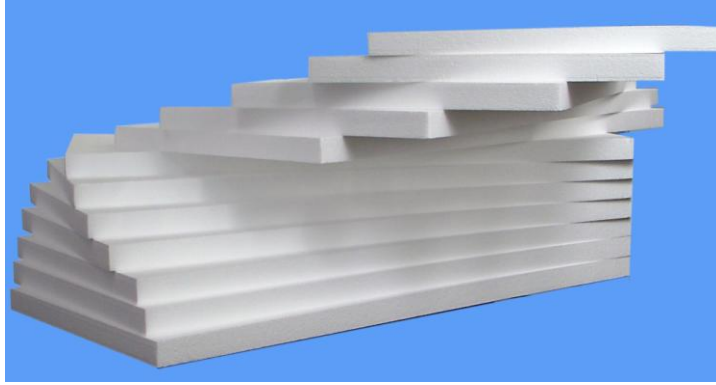
Isıl iletkenlik değerinin sayısal olarak tayin etmek için kullanılan çok çeşitli programlar bulunmaktadır. ANSYS, ASAS, ASKA, BERSAFE, MARC, NASTRAN, NEPSAP, PAFEC sonlu elemanlar metoduyla çözüm yapan programlardan bazılarıdır. Bunların dışında son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte mikrobilgisayarlar için geliştirilmiş veya adapte edilmiş sonlu elemanlar program paketlerinden bazıları ise COSMOS, LIBRA, NISA ve SUPESAP'tır [68].

Bu programların kendilerine göre avantaj ve dezavantajları olmakla birlikte bu çalışma kapsamında farklı gözeneklilik oranlarına sahip numunelerin ısı iletkenlik değerinin sayısal yöntemle tayininde ANSYS Fluent 6.3.26 paket programı kullanılmıştır. Programın modelleme kısmını oluşturan ANSYS Gambit 2.4.6 programı ise malzemelerin modellenmesi, ağ yapısının oluşturulması, sınır şartlarının girilmesi için kullanılmıştır. EPS yalıtım malzemelerinin imalat sürecinde oluşan gözenek miktarının belirlenebilmesi için ise Matlab R2007b paket programının kullanılması gerekmiştir. Matlab programında görüntü analizi çalışmaları ile mikro ve makro yapılara ait gözenekler bulunarak efektif ısı iletkenlik değeri tamamen bilgisayar ortamında tespit edilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.1.'de 22 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip EPS ısı yalıtım levhasının makro ve mikro gözenekleri görülmektedir.



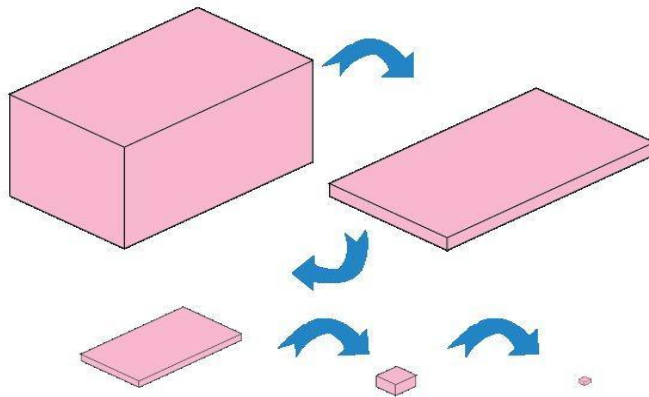
Şekil 3.1. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS SEM Görüntüsü

Araştırma kapsamında yapılacak olan çalışmalar için farklı yoğunluk değerlerinde numuneler Grofen Kırıkkale fabrikasından temin edilmiştir. Şekil 3.2.'de farklı yoğunluk değerlerine sahip EPS numuneleri verilmiştir.



**Şekil 3.2.** Üretilen Bazı EPS Yalıtım Levhaları

Şekil 3.3.'te uygulanan kesme işlemleri sonrasında numuneler ilk olarak Kırıkkale Üniversitesi Fen–Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümünde bulunan Leica S8APO stereo mikroskop ve Leica DC 160 dijital kamerası ile makro fotoğrafları çekilmiştir.



**Şekil 3.3.** Çalışma İçin EPS Numunelerinin Kesilmesi

Şekil 3.1. ve Şekil 3.4.'ten de anlaşılacağı üzere EPS yalıtım malzemesi 2 bölgeden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi polistiren ikincisi ise hava boşluklarıdır. Bu bölgeler üretim aşamasından kaynaklanan nedenlerden dolayı tam anlamıyla homojen bir yapıda değildir.  $22 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip olan numunenin katı gibi görünen baloncuklarının çapı birbirlerinden farklıdır ve yaklaşık olarak 1,5–3 mm arasında değişmektedir. Diğer yoğunluk değerlerine ait makro görüntüler EK A'da verilmiştir.

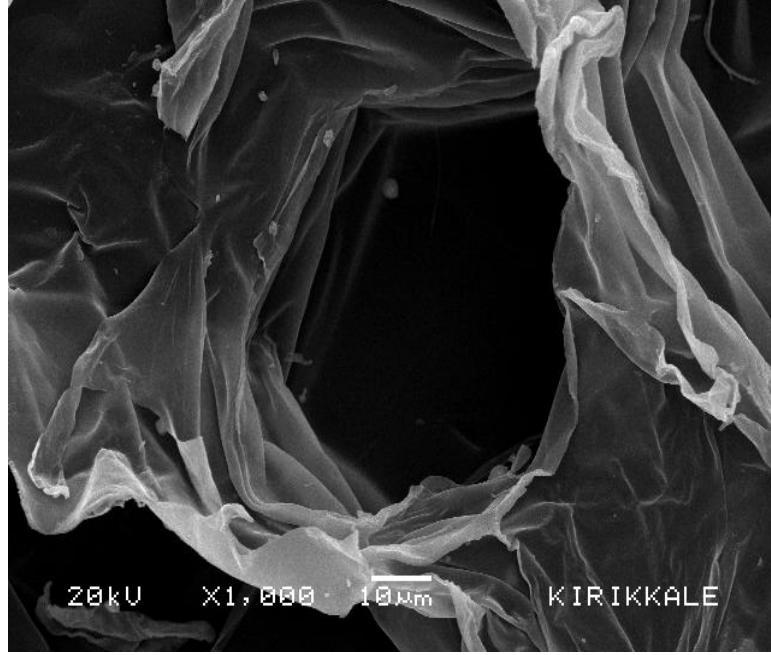


**Şekil 3.4.**  $22 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluk Değerine Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü

Bu numuneler ışık mikroskopundaki incelemelerinden sonra Kırıkkale Üniversitesi Fen–Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde bulunan altın kaplama aygıtında 5 dakika süre ile ince bir film tabakasıyla kaplanmıştır. Bu aşamadan sonra ise altın kaplanan numuneler aynı laboratuarda bulunan taramalı elektron mikroskobu ile (JEOL JSM–56) SEM (Scanning Electron Microscope) mikro görüntüleri elde edilmiştir. Bu cihaz ile yapılan görüntü elde etme işlemleri sırasında 3 adet numune kullanılmıştır. Bu numuneler farklı yoğunluk ( $18 \text{ kg/m}^3$ ,  $22 \text{ kg/m}^3$ ,  $32 \text{ kg/m}^3$ ) değerlerinde olup bu yoğunluk değerlerine ait gözenek miktarları ve içyapısı hakkında bilgi elde edilmiştir.



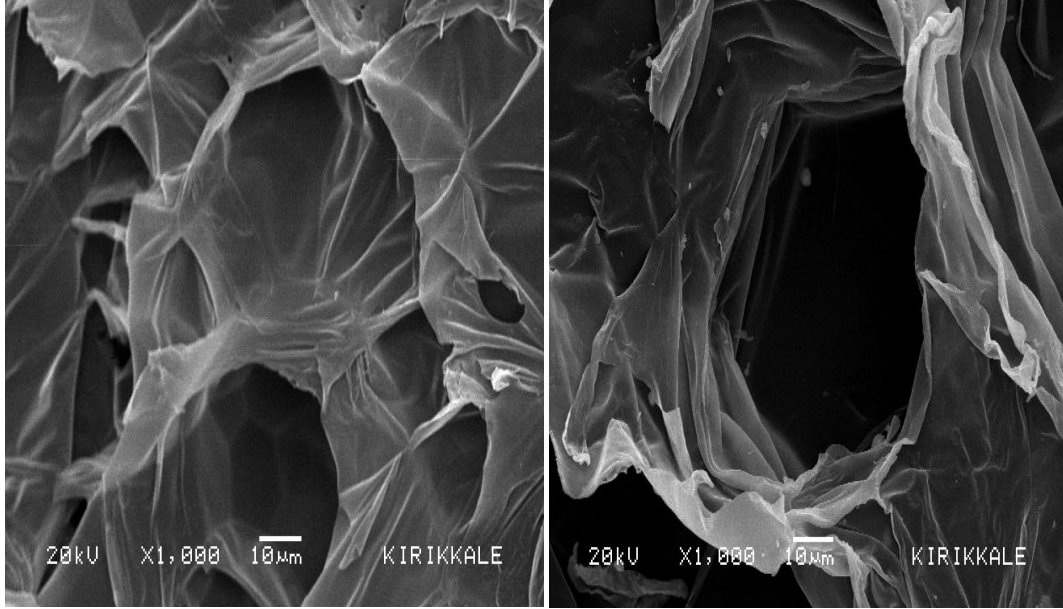
Şekil 3.5.'te  $22 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip bir EPS yalıtım malzemesinin SEM görüntüsüdür. Farklı büyütme ve yoğunluk değerlerine ait mikro görüntüler EK B'de verilmiştir.  $22 \text{ kg/m}^3$  yoğunluk değerine sahip olan numunenin üzerinde gerçekleştirilen işlemler sırasıyla gösterilecek diğer yoğunluklara ait görüntüler ve sonuçlar ise eklerde verilecektir.



**Şekil 3.5.**  $22 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluk Değerine Sahip EPS'nin Mikro Görüntüsü

Görüntüden de anlaşılacağı üzere malzemenin içyapısı büyük oranda havadan ve az miktarda katı malzeme olup EPS'nin hammaddesi olan polistirenden oluşmaktadır. Fakat resimler 2 boyutlu olduğu için arka kısımlarda ışık düşen yerlerde polistiren görünmekte bu nedenden dolayı da model aşaması ve gözeneklilik tespitinde hatalara neden olmaktadır. Bu tespitten sonra malzemenin en çok ışık alan yerlerini katı madde olarak düşünmek çalışmanın doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır. Malzeme büyük bir hassasiyetle mikroskoplara yerleştirilmiş ve basma kuvvetinden dolayı oluşabilecek ezilme miktarı en aza indirilmeye ve gözenek bölgelerinin korunması amaçlanmıştır.

Bu aşamadan sonra elde edilen görüntülerdeki gözenek miktarı bilgisayar ortamında Matlab paket programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Matlab programında bulunan gözeneklilik resimlerine ait modeller EK C’de verilmiştir.



**Şekil 3.6.** 18 kg/m<sup>3</sup> ve 22 kg/m<sup>3</sup> X1000 Mikro Yapı Görüntüsü

Şekil 3.6.’da ki görüntülerde gözenek yapıları ve oranları dikkat çekicidir. 2 boyutlu düşünüldüğünde yoğunluğu yüksek olanın gözenek boyutunun düşük olması yani katı malzeme oranının yüksek olması beklenir. Fakat bunun tam tersi olduğu görüntülerden anlaşılmaktadır. Bu durum EPS hammaddesi ile ilgili olabileceği gibi gözenek kabuk yapısı ile de ilgili olabilir. EPS birim yüzey alanı olarak ele alındığı zaman 18 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip malzeme ile 22 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip malzeme arasında gözenek boyutu farkı vardır. Bundan dolayı da yoğunluk arttıkça ısı iletkenlik değeri düşmektedir. Aynı zamanda literatürlerde verilen EPS’nin kapalı gözenekli oluşu düşüncesi kısmen yanlış olabilir. Çünkü görüntüler açık bir şekilde gözenekleri oluşturan polistiren kabukların bazı yerlerinde yırtık olduğunu göstermektedir. Bu durumdan dolayı da EPS yalıtım malzemeleri açık ve kapalı gözenek yapısına sahip olabilir.

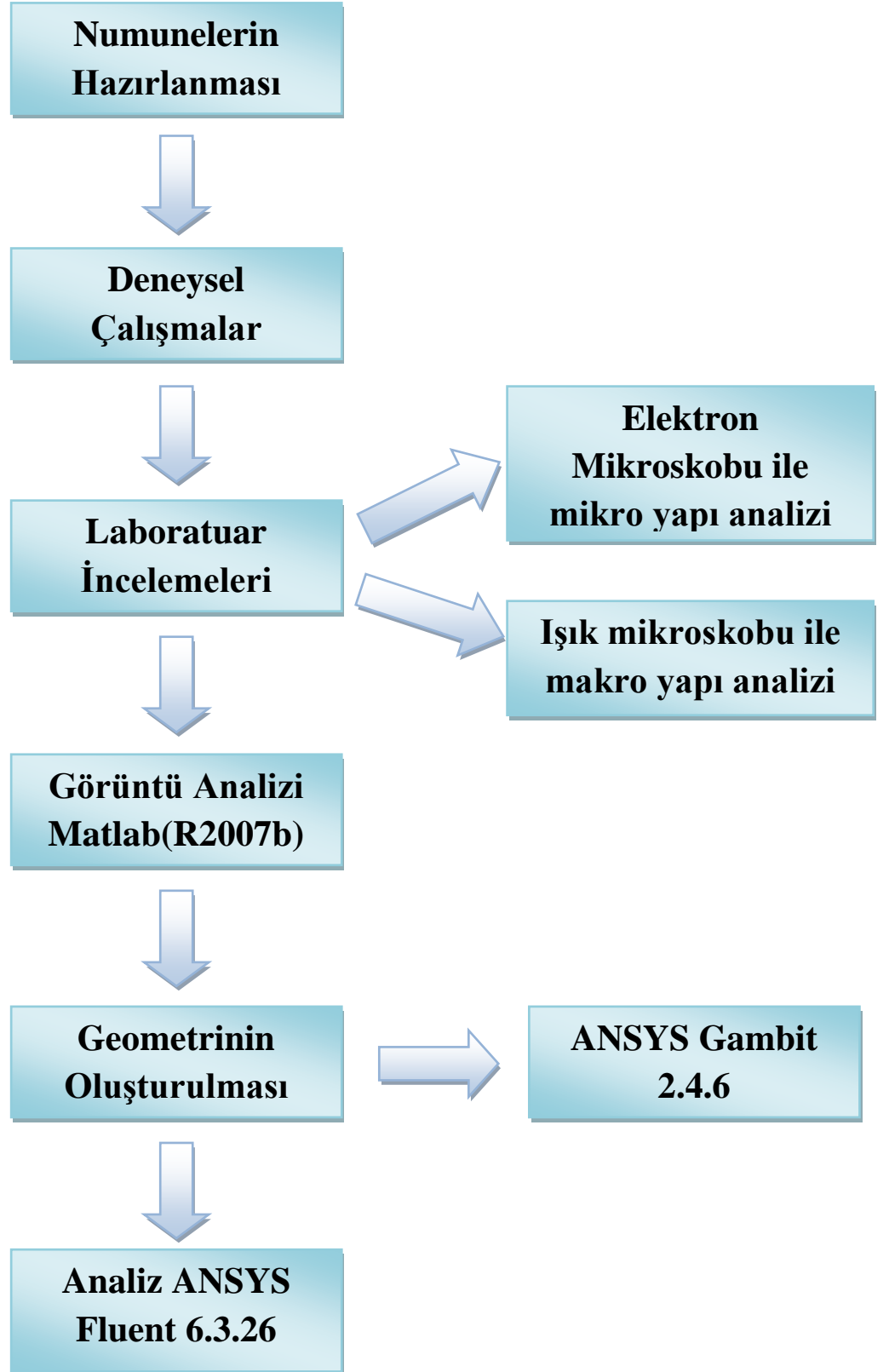
### 3.1.1.1. Matlab Görüntü Analizi

MATLAB, MATrix LABoratory sözcüklerinden gelir ve temelde sayısal ve analitik olarak matematiksel fonksiyonların ifadelerinin kullanıldığı başta mühendislik alanında olmak üzere sayısal analiz yöntemlerini kullanan bilimlerde son yıllarda oldukça sık kullanılan bir hazır yazılım paketidir. Özellikle yüksek performans gerektiren algoritma hazırlama ve geliştirme, sayısal analiz, benzetim, mühendislik problemlerinin sayısal ve grafik çözüm tekniklerinde son derece etkindir. Bunlara ek olarak Matlab programı görüntü işleme konusunda da uzman bir yazılımdır. Bilindiği üzere resimler farklı renklere sahip küçük küçük piksellerin (blokların) bir araya gelmesiyle oluşur. Bu pikselleri değerler olarak düşünersek resmi de bu değerlerden oluşan matris olarak düşünmeliyiz.

Matlab' da resim türlerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz. Bunlar;

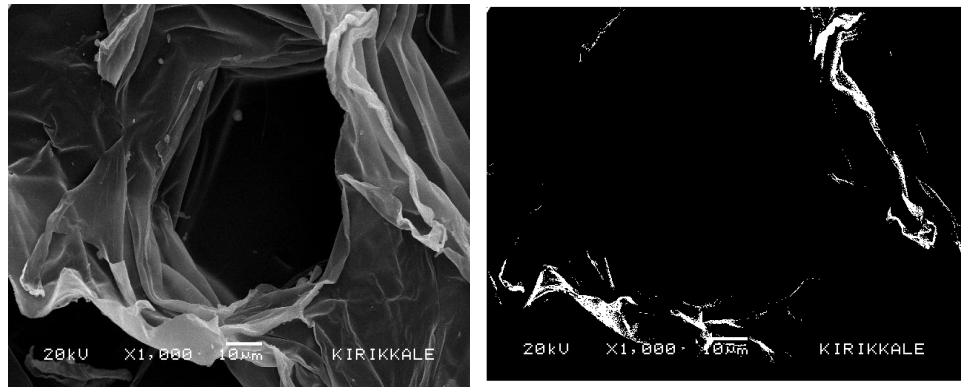
- İkilik resimler
- İndekslenmiş resimler
- Gri seviye resimler
- Gerçek - renkli resimler

Şekil 3.7.'de yapılan çalışmalar boyunca izlenen aşamaları gösteren akış şeması verilmiştir. Deneysel çalışmada EPS ısı yalıtım levhalarının farklı yoğunluk ve sıcaklıklarda ki ısı iletkenlik değerleri bulunmuştur. Sayısal yöntemle ise EPS yalıtım malzemesinin ısı iletkenlik değerinin tayin edilmesi görüntü işleme, modelin çizilmesi ve sayısal çözümün yapılması aşamalarını kapsamaktadır. Bu aşamalardan sonra elde edilen değerler uygun formüllerde yerlerine konularak malzemenin efektif ısı iletkenlik değeri belirlenmiştir.



Şekil 3.7. Sayısal Çalışmalar Kapsamında Uygulanacak Aşamalar

Mikro yapıdan elde ettiğimiz resimler gri resim formatında oldukları için diğer resimleri de bu şekilde incelersek doğru sonuca ulaşmış oluruz. Gri seviye resimler elemanları belli aralıklar arasındaki aydınlanma değerlerini gösteren matrislerdir. Örneğin 8 bitlik gri seviye resmin sınıfıdır ve değerleri 0 ile 255 arasında değişen tamsayılardır. Bu çalışmada yapılan işlem resimleri Matlab programı içerisinde açıp görüntüleri gri resme çevirmek ardından da temel bir değer belirleyip bu değer üzerindeki pikselleri saymasını ve toplam piksel alanına bölmelerini sağlamaktır. Bu işlem esnasında resim çok farklı renk tonlarında görünecektir. Bunlar sırasıyla siyah (0) ve beyaz (1) renkleri arasında kalan tonlardır. Bu tonların bir kısmı hava bir kısmı ise katı kısmı ifade etmektedir. Bunları birbirlerinden ayırmak için bir değer (0–250) arasında kullanmak gerekmektedir. Uygun değer bulunduğu zaman oran belirlenmeli ve diğer resimlerde bu değer üzerinden incelenmelidir. Şekil 3.7.'de görüldüğü üzere Matlab paket programından elde edilen görüntü mikro yapı görüntüsüyle örtüşmektedir. Burada beyaz bölgeler katı madde olan polistireni ifade etmekte siyah kısımlar ise havayı belirtmektedir. Şekil 3.8.'deki görüntüye göre gözeneklilik miktarı  $22 \text{ kg/m}^3$  bir EPS yalıtım malzemesi için 2 boyutlu ve mikro yapı olarak %96,53'tür. Bu oranın yüksek olmasının nedeni EPS yalıtım malzemesinin mikro yapısındaki homojen olmayışın sebep olduğu değişikliklerdir. Bununla beraber bu oran mikro gözenek miktarıdır ve makro gözenekler nedeniyle bu oranın düşeceği açıkça görülmektedir.



**Şekil 3.8.** EPS Yalıtım Malzemesinin Matlab Görüntü Analizi

Mikro yapı fotoğraflarından gözeneklilik analizinden sonra makro yapı görüntülerine geçilerek buradaki gözenekler bulunmuştur. Şekil 3.9.'da  $22 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip EPS yalıtım malzemesinin makro görüntüsünün Matlab görüntü analizi yöntemiyle oluşturulan gözenek kısımları ve buradaki gözenek miktarları görülmektedir.



**Şekil 3.9.**  $22 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluğa Ait Makro Yapının Görüntü Analizi

Çizelge 3.1.'de 3 farklı yoğunluk ( $18 \text{ kg/m}^3$ ,  $22 \text{ kg/m}^3$ ,  $32 \text{ kg/m}^3$ ) değerine sahip makro yapıların Matlab programı ile bulunmuş gözenek miktarları verilmiştir. Bun

değerler malzemenin gerçek gözeneklilik oranı değil görüntüsü alınan yüzeyin gözeneklilik oranıdır.

**Çizelge 3.1.** Yoğunluğa Göre Gözeneklilik Oranları

Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Gözeneklilik Oranı (%)
18	96,26
22	96,49
32	97,12

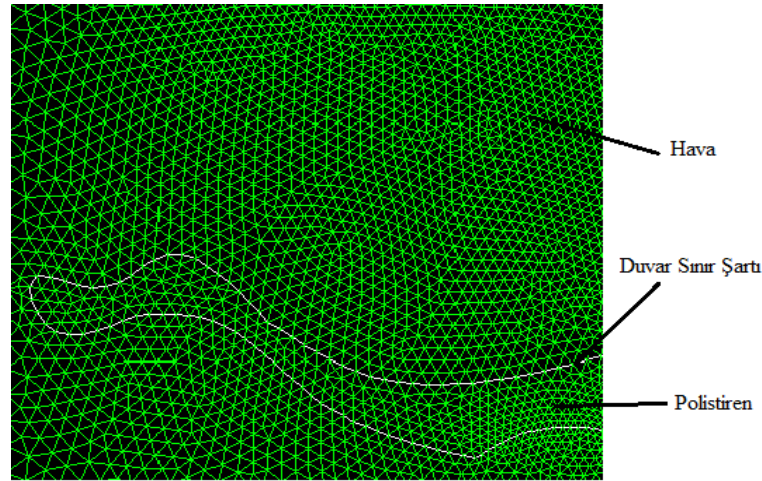
### 3.1.1.2.Sınır Şartlarının Belirlenmesi

ANSYS Gambit paket programı Fluent programının ön işlemcisi olarak çalışmakta ve ağ yapısının oluşturulması, sınır koşullarının girilmesi, malzeme cinslerinin belirlenmesi gibi işlemleri yaparak problemi Fluent'in çözebileceği formata çeviren ANSYS tabanlı bir paket programdır. Bu program ile mikro ve makro modeller çizilmiş ve uygun sıcaklık koşulları verilmiştir. Şekil 3.10.'da 22 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa ait yapının Gambit programıyla çizilmiş hali verilmiştir. Burada yapının uzunluğu L, kalınlığı d alınmıştır. Ağ yapısının düzgün oluşturulması sonuçların hassasiyeti için önemli bir adımdır. EPS yalıtım malzemesine ait sayısal çözüm için ilk olarak mikro düzeyde görüntülerden model oluşturulmuş daha sonra makro görüntü çalışmalarına geçilmiştir. Gambit programında oluşturulan modellere gözeneklerde ve gözenek dışında kalan katı bölgede üçgen elemanlar kullanılarak ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapısı, yoğunluk değerlerine bağlı olarak mikro yapılar için 39050–14145 hücre sayısı ve 20858–7477 arasında değişen düğüm noktasından oluşmaktadır. Makro yapılar için ise bu değerler 22380–57766 hücre sayısı ve 34330–88179 düğüm noktasıdır. Farklı yoğunluk oranlarına sahip mikro yapı modellerinde oluşturulan ağ yapısına ait düğüm noktası ve hücre sayısı aşağıdaki Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Mikro Yapıda Oluşturulan Hücre Sayıları, Düğüm Noktaları ve Boyutlar

Yoğunluk	Hücre Sayısı	Düğüm Noktası	Boyutlar(Lxd)
18	39050	20858	83,26x62,58 µm
22	17216	26364	155,23x116,86 µm
32	14145	7477	85,33x65,00 µm

EPS yalıtım malzemeleri mikro ve makro yapıda çok sayıda gözeneğe sahip olduğu için bu malzemelerin modellenmesinde ve ağ yapısının oluşturulmasında çok sayıda problem yaşanmıştır. Bu sorunların en büyük nedeni mikro yapının çok küçük olması ve ağ yapısı oluşturulurken gerekli olan küçüklüğe inilememesidir. Bununla beraber ağ yapısında çok sayıda karmaşık bölge oluşmuş ve bu bölgeler çözümün hatalı çıkmasına neden olmuştur. Bu nedenden dolayı ilk olarak modelleme çalışmasına başlamadan önce ölçülerin dönüşümü yapılarak büyük bir model çizilmiştir. Bu çizilen modele ağ yapısı atıldıktan sonra Fluent' e export edilen model burada ölçeklenerek gerçek boyutlarına getirilmiştir. Şekil 3.10.'da Gambit programında çizilen gözenek yapısı, bu gözeneğe ve çevresine atılmış ağ yapısı görülmektedir.

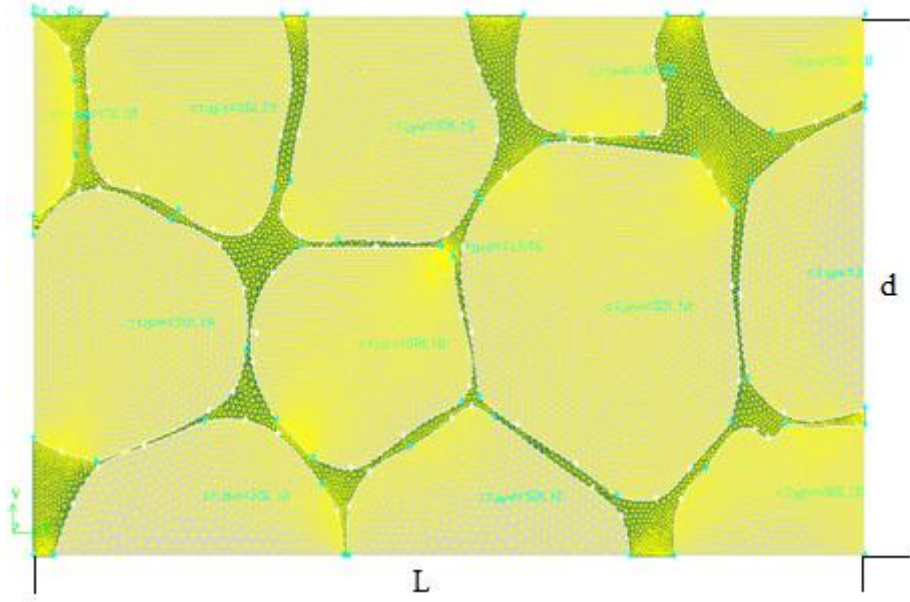


**Şekil 3.10.** Gambit Programında Oluşturulan Bölgeler



Gözenek yüzeyine duvar sınır koşulu verilerek ilk olarak iletim problemi daha sonra ise Bousinesq yaklaşımıyla gözenek içerisinde taşınım hareketlerinin gerçekleşip gerçekleşmediği araştırılmıştır. Sınır şartı olarak malzemenin kullanımına uygun olarak sol tarafa sol duvar, sağ tarafa sağ duvar, alt ve üst duvarlara ise yalıtım sınır şartı verilmiştir. Ayrıca malzemenin katı ve akışkan kısımlarının temas ettikleri bölgelere duvar sınır şartı verilmiştir. Böylece malzemedeki ısı akışı sürekli şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.11’de ise  $22 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip EPS yalıtım malzemesinin makro yapısının Gambit programıyla modellenmesi verilmiştir. Verilen modelin sınır şartları sol duvar, sağ duvar, yalıtım sınır şartı ve akışkan–katı bölgeleri ayırmada duvar sınır şartı kullanılmıştır. Daha sonra bu modeller Fluent programına export edilmiştir. Farklı yoğunluklara ait EPS yalıtım malzemelerinin Gambit programı sonrasında oluşturulan hücre sayıları ve düğüm noktaları Çizelge 3.3.’te verilmiştir.



**Şekil 3.11.** Makro Yapıya Ait Gambit Görüntüsü

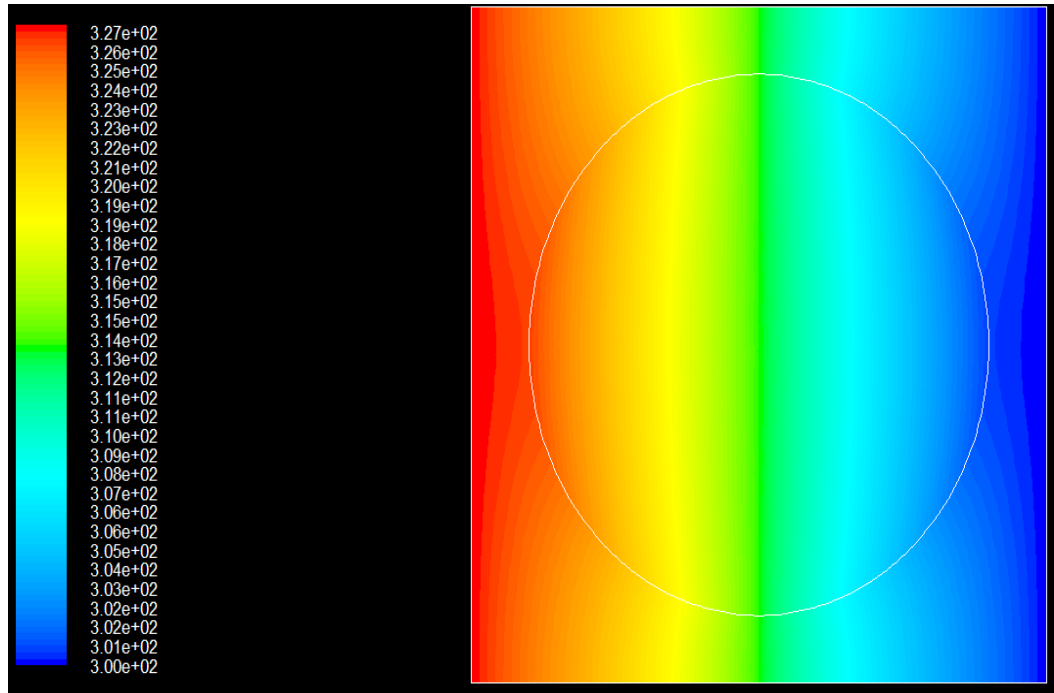
**Çizelge 3.3.** Makro Yapıda Oluşturulan Hücre Sayıları, Düğüm Noktaları ve Boyutlar

Yoğunluk	Hücre Sayısı	Düğüm Noktası	Boyutlar(Lxd)
18	22380	34330	4,26x2,40 mm
22	33566	51767	8,46x4,76 mm
32	57766	88179	10,24x5,76 mm

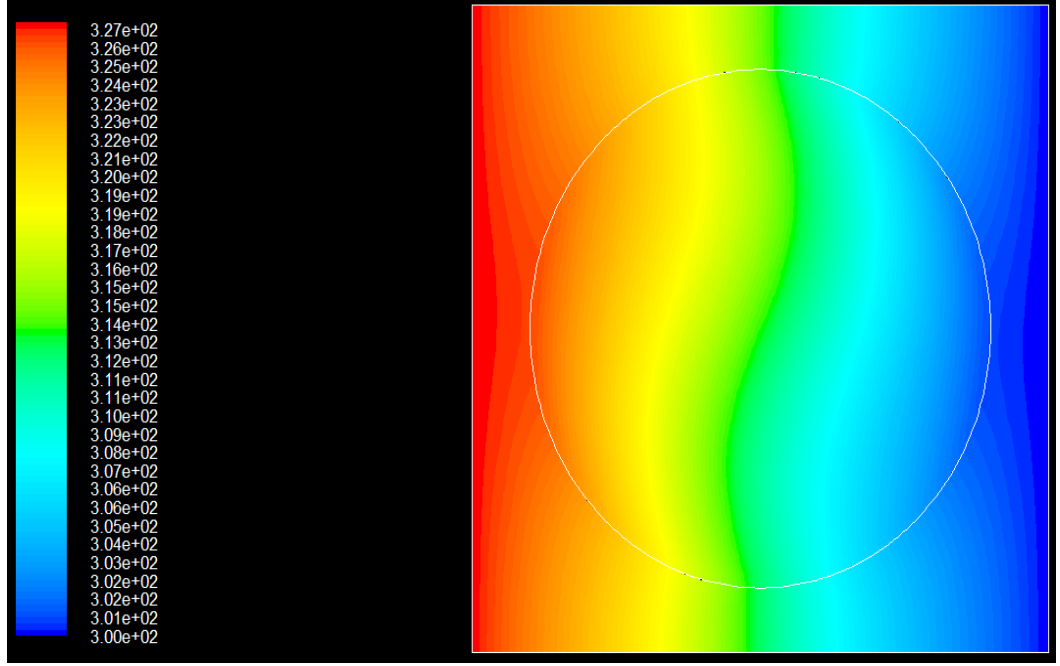
### 3.1.1.3. Sabit Sıcaklık Sınır Şartı Çözümleri

İlk olarak malzemenin içerisindeki gözenek yapıları basit şekiller ile düşünülüp modelleme çalışmaları yapılmıştır ve yapı içerisindeki sıcaklık dağılımları, hız dağılımları gibi değerler incelenmiştir. Daha sonra mikro ve makro yapı görüntülerden elde edilen modellerde analizler gerçekleştirilmiştir.

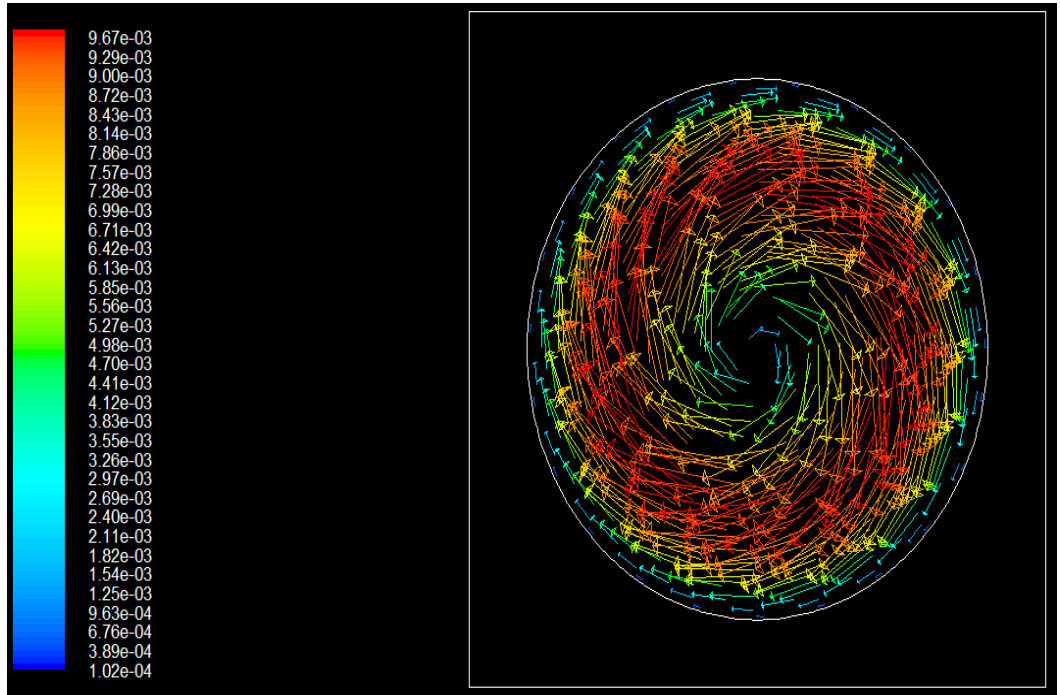
Gözenek yapısı daire olarak düşünüldüğünde;



**Şekil 3.12.** Daire Gözeneğe Sahip Numunenin Isı İletimi Çözümü

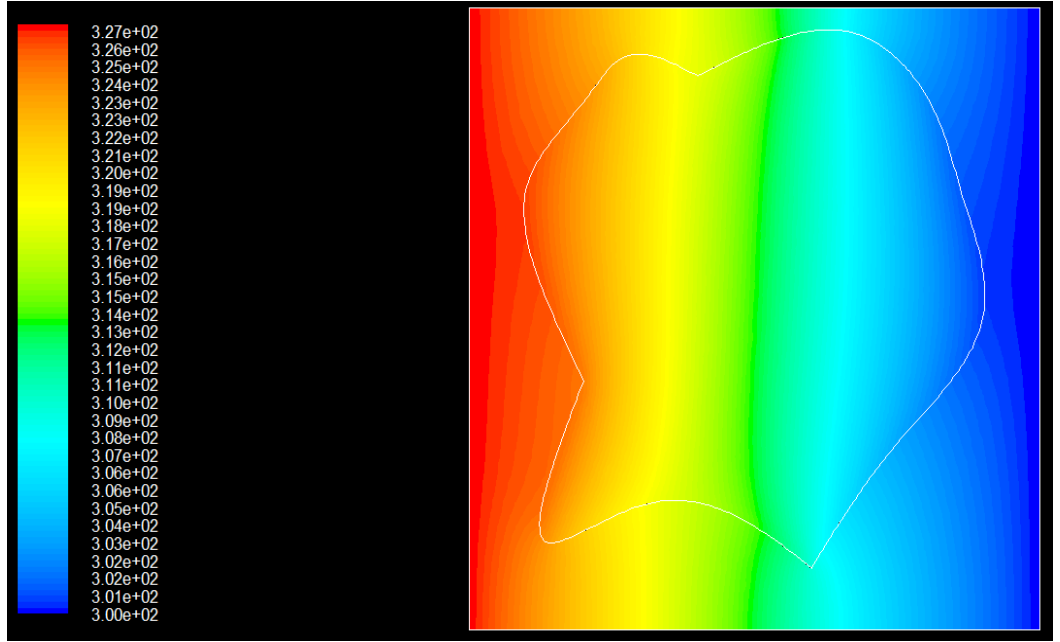


Şekil 3.13. Daire Gözeneğe Sahip Numunenin Bousinesq Yaklaşımı Çözümü

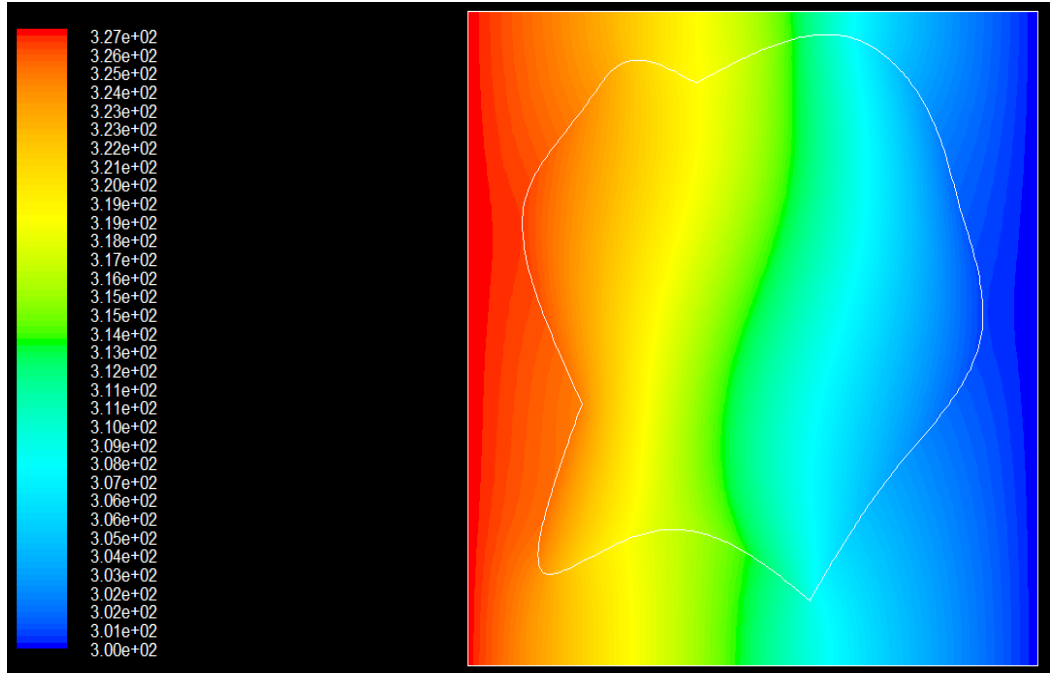


Şekil 3.14. Daire Gözeneğe Sahip Numunenin Hız Vektörleri

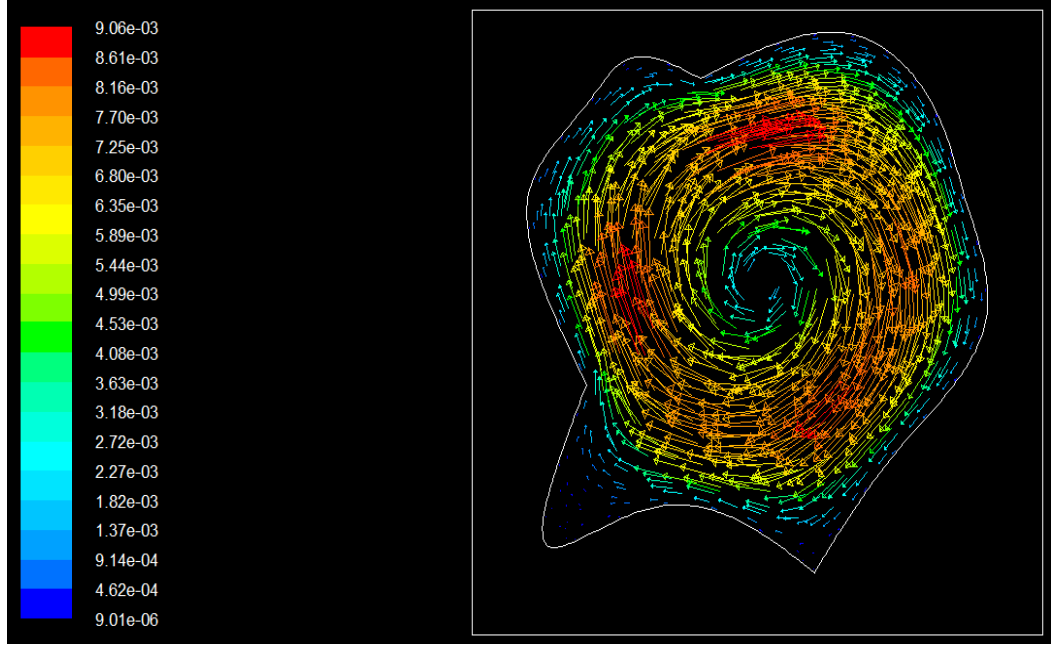
Gözenek yapısı rastgele çizilen bir modelin ısısal analizi;



Şekil 3.15. Rastgele Gözeneğe Sahip Numunenin Isı İletimi Çözümü



Şekil 3.16. Rastgele Gözeneğe Sahip Numunenin Bousinesq Yaklaşımı Çözümü



**Şekil 3.17.** Rastgele Gözeneğe Sahip Numunenin Hız Vektörleri

Sabit sıcaklık sınır şartındaki çözümler EPS yalıtım malzemesinin 3 farklı yoğunluk değeri için sağ ve sol yüzeylerine sıcaklık değerinin verildiği çözümleri kapsamaktadır. ANSYS Fluent 6.3.26 paket programı ısı ve kütle geçişi problemlerini kontrol hacmi yaklaşımına göre sonlu hacimler yöntemiyle çözmektedir. Sonlu hacimler yönteminde akış hacmi küçük hürelere bölünmekte ve ilgili denklemler her bir hücre için ayrı ayrı çözümlenmektedir. Her ne kadar küçük hürelere bölünmesi daha hassas çözümün elde edilmesini sağlasa da, akış hacminin gereğinden fazla sayıda hürelere bölünmesi bilgisayar kapasitesini zorlamakta ve analiz zamanını uzatmaktadır. Uygun bölme sayısını bulmak için önerilen yöntem bölme işlemine öncelikle büyük hürelere başlamak ve analiz sürecinin belirli bir evresinde hürelere küçük olması gereken yerleri tespit edip, sadece o bölgelerdeki hacimleri daha küçük hürelere bölmektir. Fluent sonlu hacimler yönteminin çözülmesi için iki tane sayısal çözücü kullanır. Bunlar;

- Ayrık (Segregated) çözümler
- Birleşik (Coupled) çözümler

Her iki durumda da kontrol hacmine dayalı bir teknik kullanılır. Bu teknikler aşağıdaki adımları içerir;

1. Çalışma alanının hücelere ayrılması.
2. Her bir hücre için gerekli denklemlerin entegrasyonu yapılarak, ayırık bağımlı bilinmeyen değişkenler için (hız, basınç vb.) cebirsel denklemlerin oluşturulması.
3. Ayırksallaştırılmış olan eşitliklerin doğrusallaştırılması sonucu elde edilen doğrusal denklemlerin çözümüne bağlı olarak bağımlı değişkenlerin güncellenmesi.

Bu iki çözücünün de ayırksallaştırma işlemi benzerdir. Fakat ayırksallaştırılmış denklemlerin doğrusallaştırılmaları ve elde edilen doğrusal denklemlerin çözüm yöntemi farklıdır. Fluent paket programının ısı transferi problemlerini çözümündeki ana prensip enerji denklemlerinin çözümüdür. Bu mantıkla program Denklem 3.1'i çözmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{c}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (3.1)$$

Burada  $k_{eff}$  efektif ısı iletkenlik değerini ve J ile ifade edilen terimde her bir difüzyon türünün akısını göstermektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki terimler sırasıyla iletimle transfer edilen ısı miktarını, difüzyon türlerini ve viskoz dissipasyonunu göstermektedir.  $S_h$  ise kimyasal reaksiyon ısısını ve diğer hacimsel ısı kaynaklarını ifade etmektedir. Eşitliğin sol tarafında bulunan E;

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (3.2)$$

ideal gazlar için duyulur entalpi değeri olan h;

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (3.3)$$

ve sıkıştırılmaz gazlar için;

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (3.4)$$

bulunur. Entalpi değerlerini bulmak için gerekli olan her bir türün kütle kesiri  $Y_j$  ve

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT \quad (3.5)$$

$T_{ref} = 298,15$  K değerindedir. Fluent programı katı içinde ısı geçişinde ise Denklem 3.1'i Denklem 3.6'ya indirgeyerek çözmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho h_d + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \rho h_d) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + q'' \quad (3.6)$$

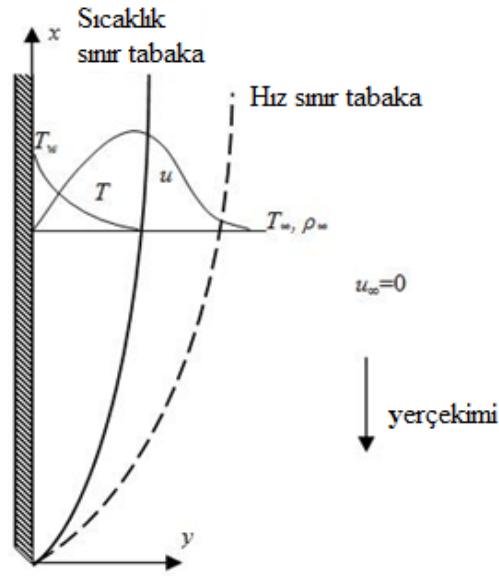
Fluent, ısı iletimi açısından anizotropik katılar için, malzemeye ait ısı iletkenlik değerini  $k_{ij}$  matris formatında ifade edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu formata göre iletim terimi yazılacak olursa Denklem 3.7 bulunur.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3.7)$$

Bununla beraber Fluent paket programı ısı iletkenlik değerini ve birçok malzeme özelliğini sıcaklığın fonksiyonları şeklinde tanımlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı sıcaklık farklılıkları nedeniyle malzeme özelliği değişse bile program kendisine yeni değer bulacak ve oluşabilecek hataları minimuma indireyecektir. Sabit sıcaklık sınır şartı çözümünde ilk olarak mesh yapılmış modele kararlı rejimde, içerisinde hiçbir şekilde ısı üretimi olmayan denklemler çözülmüştür. Bu denklemlere ek olarak malzeme içerisindeki gözeneklerde taşınım olayının gerçekleşip gerçekleşmediği de araştırılmıştır.

Şekil 3.18.'de doğal taşınımında hız ve sıcaklık sınır tabakaları gösterilmiştir. Isı transferinde herhangi bir dış etki olmadan ısınan - soğuyan akışkan yoğunluğunun düşmesi ile ısınan doğal yollardan taşınan durumlar dikkate alınır. Böyle durumlar,

doğal veya serbest taşınım olarak adlandırılırlar ve içinde sıcaklık gradyanlarının olduğu bir akışkan üzerine gövde kuvvetlerinin etki ettiği zaman ortaya çıkarlar. Net etki doğal akışa neden olan kaldırma kuvvetidir. Kaldırma kuvveti akışkan içinde bulunan başka bir maddeye akışkan tarafından uygulanan yukarı yöndeki kuvvete verilen isimdir. En genel durumda, yoğunluk gradyanı, sıcaklık gradyanında gövde kuvveti de yerçekiminden kaynaklanır.



**Şekil 3.18.** Doğal Taşınımında Hız ve Sıcaklık Sınır Tabakalarının Gösterimi

Doğal taşınımında akış hızları genellikle zorlanmış taşınımdayakilere göre çok daha küçük olduğundan, doğal taşınım ısı geçişi daha yavaştır. Belki de bu nedenle, doğal taşınım az önemsenmektedir. Oysa farklı yollarla ısı geçişinin olduğu birçok uygulamada, doğal taşınım ısı geçişine en büyük direnci oluşturur ve bu nedenle sistemin tasarımında veya performansında önemli bir rol oynar. Bunun ötesinde, ısı geçişini azaltmak ve buna bağlı olarak işletme giderlerini en düşük düzeye indirmek söz konusu olduğunda, doğal taşınım zorlanmış taşınımına göre tercih edilir.

Doğal taşınımında akışkan hareketi akışkan içindeki kaldırma kuvvetleri ile oluşur, oysa zorlanmış taşınımında dış etkiler tarafından yaratılır. Kaldırma akışkan içindeki yoğunluk gradyanı ile yoğunlukla orantılı bir gövde kuvvetinin birlikte



olmalarının sonucu doğar. Gövde kuvveti genellikle yerçekimi kuvvetidir fakat herhangi bir dış etkide gövde kuvveti olabilir. Bir akışkan içinde yoğunluk gradyanını ortaya çıkarabilecek farklı durumlar olmakla birlikte en genel olanı bir sıcaklık gradyanına bağlı yoğunluk farklılığıdır.

Fluent programında doğal taşınımı Bousinesq yaklaşımıyla tanımlamak mümkündür. Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi sıcak düşey bir levha etrafındaki doğal ısı taşınımı, akışkan içindeki yoğunluğun, sıcaklık ile değişimi sonucu ortaya çıkar. Gerçekte yoğunluğun sıcaklıkla  $\Delta\rho$  kadar değişiminin, sonsuzdaki  $\rho_\infty$  yoğunluğuna oranı;

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_\infty} \ll 1 \quad (3.8)$$

çok küçüktür. Fakat bu küçük değişim, momentum denklemindeki dış kuvveti oluşturur.

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.9)$$

Doğal ısı taşınımında, Bousinesq yaklaşımı iki kısımdan oluşur;

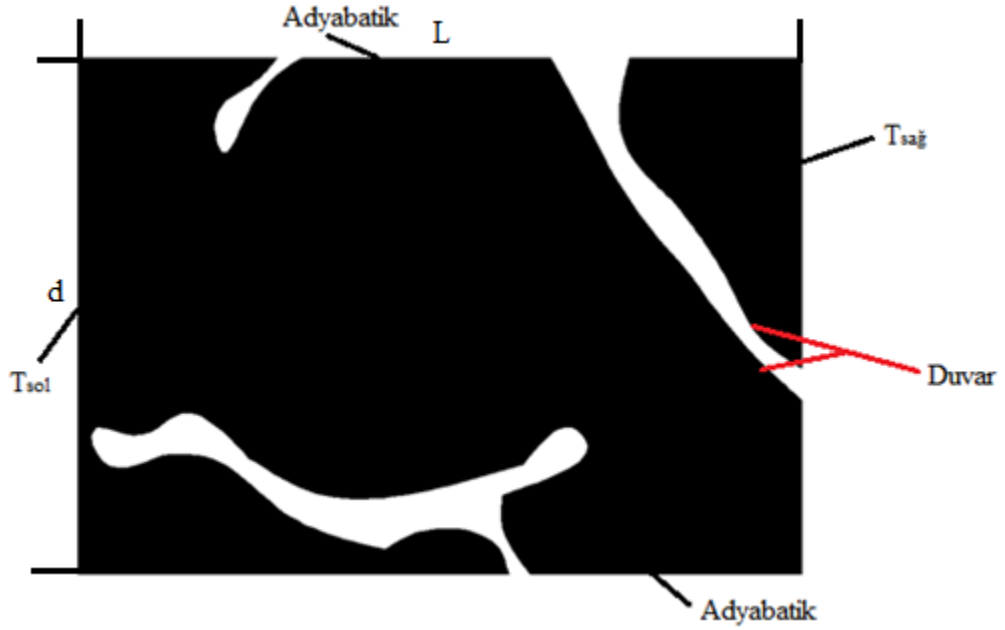
- Momentum denklemindeki yoğunluk terimi dışındaki bütün terimlerde, sıcaklığın fiziksel özelliklere olan etkisi ihmal edilir.
- Yoğunluğun sıcaklık ile değişimi;

$$\Delta\rho = \rho_\infty - \rho = \rho\beta(T - T_\infty) \quad (3.10)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada  $\beta$  ile ifade edilen değer ısıl genleşme katsayısıdır ve ideal gazlar için  $T^{-1}(\text{K})$  olarak ifade edilebilmektedir.

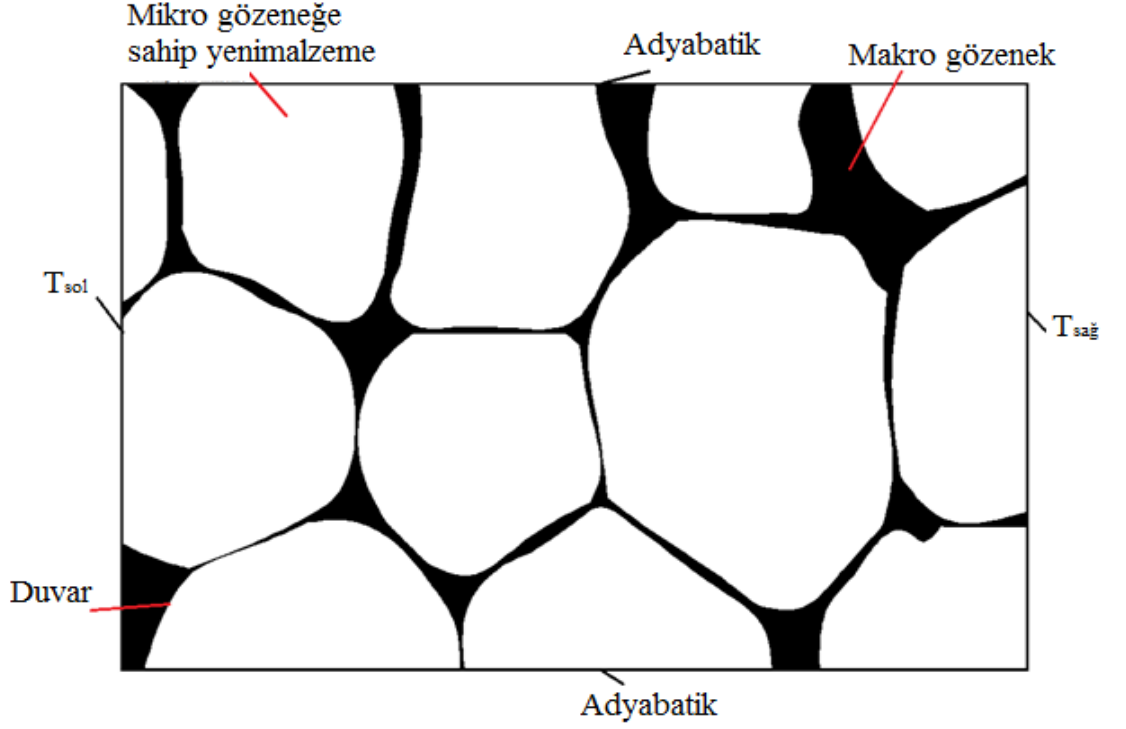
Gambit programında ağ yapısının oluşturulmasından sonra Fluent programında çözüm yapılabilmesi için gerekli olan sınır koşulları tanımlanmıştır. Bu sınır koşulları Şekil 3.19. ve Şekil 3.20.'de gösterilmiştir. Bunlar EPS yalıtım malzemesinin dörtkenarına 'Duvar' sınır şartı, hava ile polistiren malzeme arasında kalan bölgeye tekrar 'Duvar' sınır şartı verilmiştir. Fakat Fluent programına aktarımda buradaki duvar sınır şartı gölge (shadow) formatına dönüşerek iki farklı

yapının uyum içinde çözüm aşamasından geçmesini sağlamaktadır. Böylece biz ısının havadan polistirene, polistirenden havaya geçişini gözlemleyebiliriz. EPS yalıtım malzemesinin sağ ve sol yüzeyinde sabit sıcaklık ( $T_{sol}$ ,  $T_{sağ}$ ), alt ve üst yüzeylerinde ise adyabatik sınır şartı kullanılmıştır. Aynı işlem makro görüntüler için tekrar edilmiştir.



**Şekil 3.19.** Çözüm İçin Gerekli Sınır Koşulları

Gambit programında ağ yapısı oluşturulup sınır şartları girilen model çözümü yapılmak üzere Fluent programına aktarılmıştır. Fluent programında iki farklı malzeme tanımlaması yapılarak bu malzemelere uygun termofiziksel özellikler çizelgelerden alınmıştır ve Fluent programına sıcaklığın fonksiyonları şeklinde girilmiştir. Çözüm aşamasında ilk olarak havanın hareketsiz kabul edildiği yani sadece iletim denklemlerin etkili olduğu taşınım olayının gerçekleşmediği kabul edilmiştir. Daha sonra havanın sıcaklığa bağlı olarak harekete başladığı ve bu hareket neticesinde taşınım ile ısı geçişi gerçekleşip gerçekleşmediği araştırılmıştır. Malzemenin yapısında bulunan havanın ve polistirenin termofiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi EK D ile verilmiştir.



Şekil 3.20. Makro Görüntünün Sınır Şartları

EPS yalıtım malzemesinin sağ duvar yüzeyinin 273 K sabit sıcaklıkta tutulduğu sol duvar yüzeyinin ise 10 K aralıklarla artırılarak 273–313 K arasında çözümler gerçekleştirilmiştir. Çözümler yapılırken yaklaşık olarak 5000 adet iterasyon yaptırılmış ve bu iterasyonlarda sol ve sağ yüzeylerdeki ısı akısının yakınsaması yaklaşık olarak  $1 \times 10^{-6}$  mertebelerine düştüğü gözlenmiştir. Bu çözüm aşamaları mikro ve makro görüntüler tekrar edilmiştir ve mikro görüntülerden elde edilen değerler mikro gözenekli yeni malzeme tanımlamak için kullanılmıştır. Yeni malzeme tanımlanmasında en önemli aşama ısı iletkenlik değeri olan  $k_{ef1}$  değerinin tanımlanarak sıcaklığa göre değişimi Fluent programına girilmiştir. Daha sonra ise bu işlemler sırasıyla makro görüntüler için tekrar edilmiş ve gerçek  $k_{ef2}$  değeri hesaplanmıştır. Bu değerler de Matlab programıyla tespit edilen gözeneklilik oranlarına göre bulunmuş literatürdeki araştırmacıların çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda sayısal çözümün diğer araştırmacıların modelleriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

### 3.1.2. Isı Transferi Denklemlerinin Sayısal Olarak Çözümü

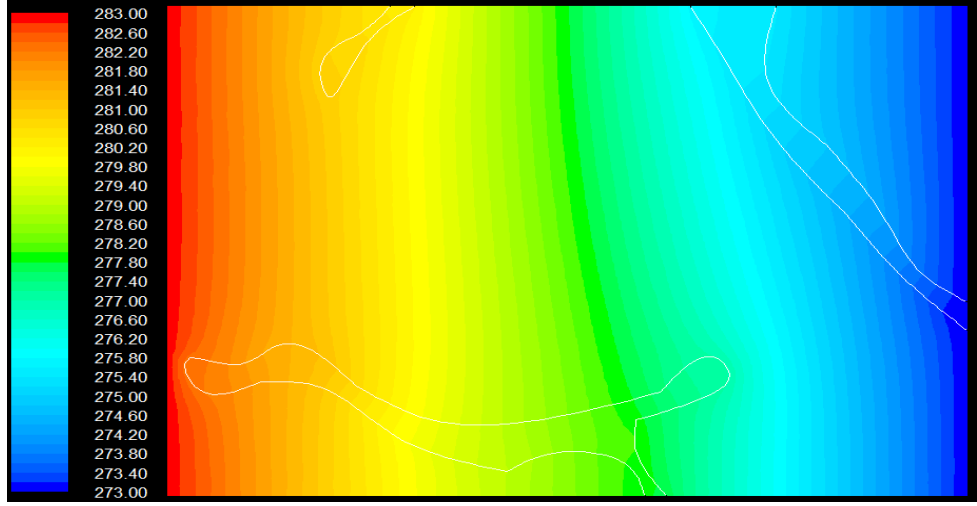
Mikro yapıdaki görüntülerden elde edilen modeller uygun sınır koşulları ve malzemelerin termofiziksel özellikleri Fluent programına girilerek çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu çözümler sırasıyla iletim çözümleri ve taşınım çözümlerinden oluşmaktadır. Bu çözümlerin yanı sıra ışınım çözümleri de ileri safhalarda uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca literatürde bulunan birçok araştırmacının önerdiği formüller kullanılarak grafikler oluşturulmuş ve yapılan çalışmayla birlikte yorumlanmıştır.

Gözenekliliğe bağlı olarak ısı geçişini inceleyebilmek için Fluent programında çözümler yapılmış ve çözüm sonucunda elde edilen ısı geçişleri tespit edilmiştir. Bu ısı geçişleri Denklem 3.11’de yerlerine konularak mikro yapı için  $k_{ef1}$  bulunmuştur. Bu işlem mikro yapılar için 3 farklı ( $18 \text{ kg/m}^3$ ,  $22 \text{ kg/m}^3$ ,  $32 \text{ kg/m}^3$ ) yoğunluk değeri için gerçekleştirilmiştir. Buradan bulunan değer  $k_{ef1}$  olarak tanımlanmıştır ve sıcaklığa göre değişimi bulunarak  $k_{ef2}$  hesabında yeni malzeme özelliği olarak belirlenmiştir.

$$k_{efluent} = \frac{Qd}{A\Delta T} \quad (3.11)$$

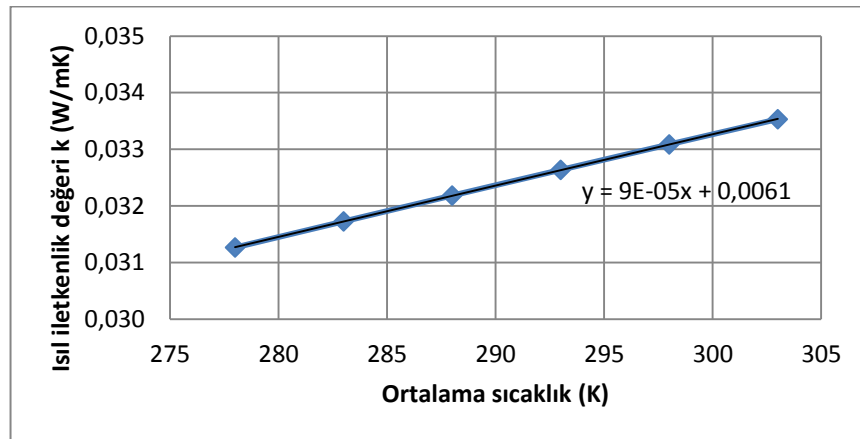
Burada Q, Fluent programından bulunan EPS yalıtım malzemesinden geçen ısı miktarı,  $\Delta T$  malzemenin sağ ve sol sıcaklıkları arasındaki fark, d malzemenin kalınlığı ve A ısı geçişine dik yüzey olarak alınabilir. Bu çalışma kapsamında yapılan işlemler 2 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu olarak modellenen sistemler daha hassas sonuç vermekle birlikte modelleme aşamasında zorluklar çıkmaktadır.

Şekil 3.21.’de ortalama 278 K sıcaklıkta ısı iletim denklemi çözülmüştür ve çözüm sonucundaki ısı hareketi görülmektedir. Modellenen görüntülerde 278–303 K ortalama sıcaklıklarında çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu çözümler sonucunda malzemenin geçen ısı miktarları bulunmuş ve Denklem 3.11 yardımı ile  $k_{ef1}$  değeri tespit edilmiştir. Bu değerler farklı yoğunluk değerleri için tekrar edilmiştir.



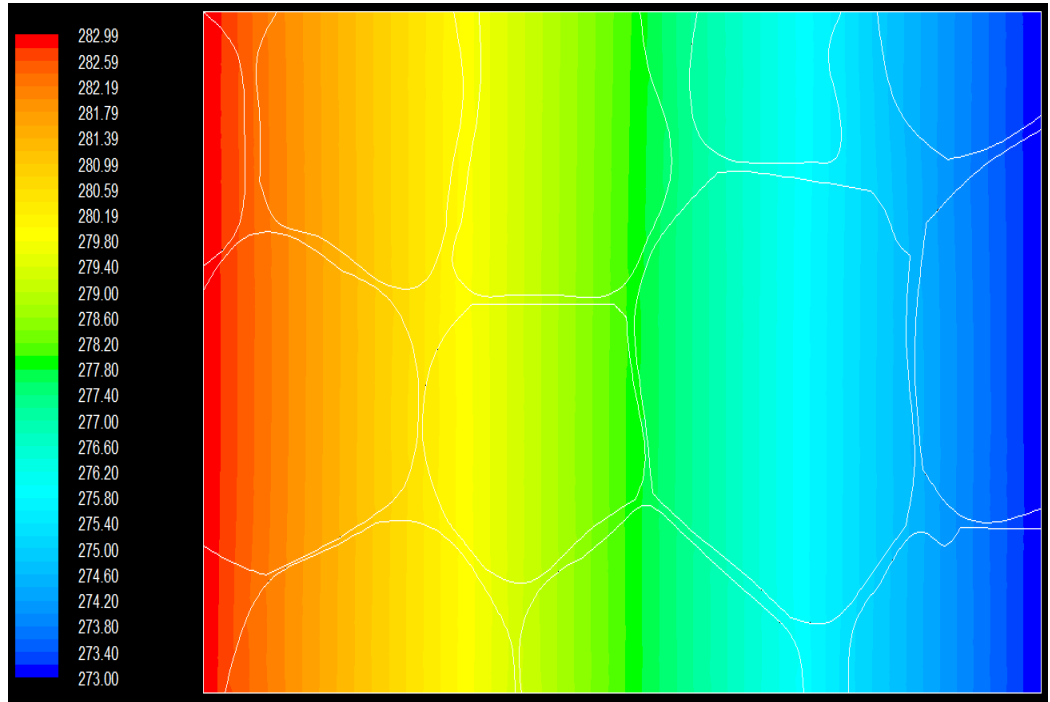
**Şekil 3.21.** 278 K Ortalama Sıcaklığa Ait Isı İletimi Çözümü

Şekil 3.22.'de verilen grafikte  $22 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip mikro yapıdan geçen ısı miktarına göre hesaplanan ısı iletkenlik değeri verilmiştir. Hesaplanan mikro model ısı iletkenlik değerlerinin polinom denklemleri aynı yoğunluk değerleri için makro modele aktarılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın diğer aşamasında ise makro gözenekleri de dâhil ederek malzemenin sahip olduğu efektif ısı iletkenlik değeri bulunmuştur.



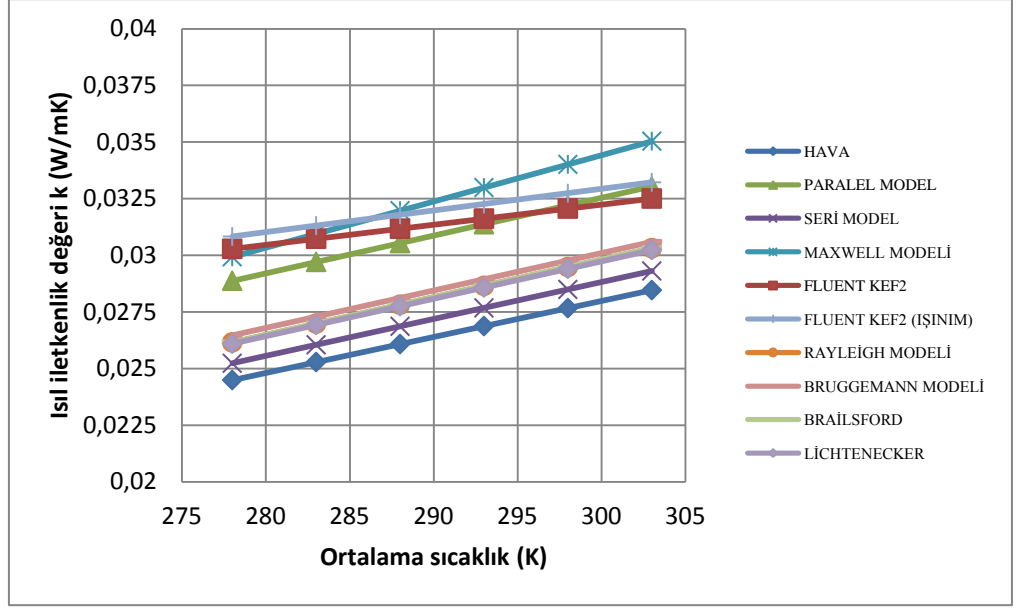
**Şekil 3.22.** Mikro Gözenekli Yeni Malzemenin Isıl İletkenlik Değerinin Sıcaklık İle Değişimi

Bu malzemenin değerlerinin girilmesinde katı malzeme olarak düşünülüp gerekli olan özgül ısı değeri de Fluent programından bulunarak programa tanıtılmıştır. Şekil 3.23.'te ise makro gözenekli  $22 \text{ kg/m}^3$  yoğunluk değerine sahip modelin ısı iletimi denklemlerinin sayısal çözümü verilmiştir. Burada bulunan değerler ise malzemenin gerçek efektif ısıl iletkenlik değerinin sayısal çözümü olacaktır. Fakat burada önemli olan husus yeni malzeme tanımlaması yapılırken malzemenin katı olarak düşünölmüş olmasıdır. Oysaki yukarıda da göröldüğü gibi malzeme katı bir malzeme olmamakla birlikte içerdüğü yüksek orandaki hava miktarıyla mikro düzeyde yalıtımı sağlamaktadır. Fakat gözenek miktarları çok küçük olduğu için hava akımı az gerçekleşmektedir.



**Şekil 3.23.** Makro Gözeneğe Sahip Modelin Isı İletimi Çözümü

Makro düzeyde yapılan işlemlerde bulunan  $k_{ef2}$  değerleri Şekil 3.24.'te verilmiştir. Buradaki değerler aynı zamanda literatürdeki araştırmacılar tarafından önerilen teorik denklemler ile bulunan efektif ısıl iletkenlik değerleriyle de karşılaştırılmıştır.

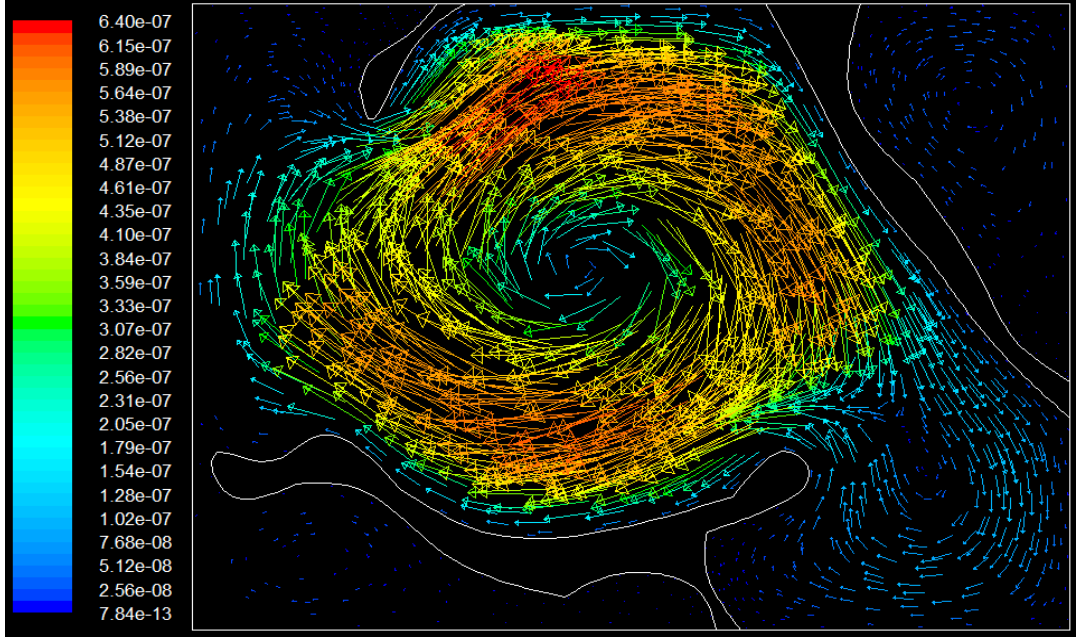


**Şekil 3.24.** 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Efektif Isıl İletkenlik Değeri

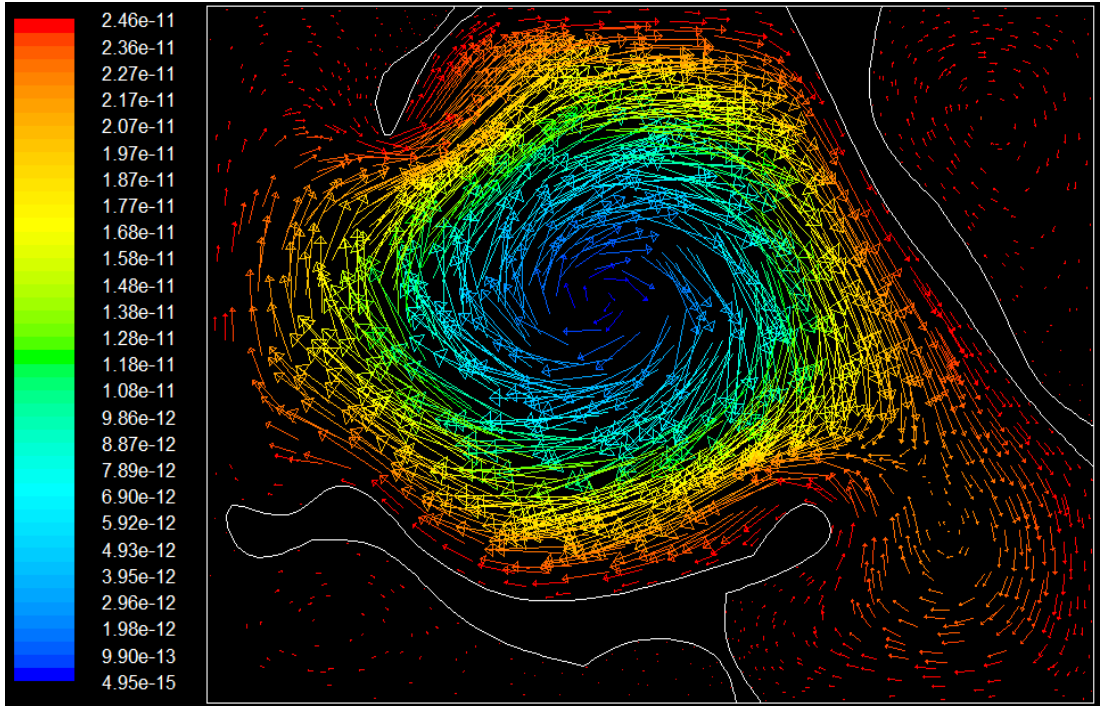
EPS yalıtım levhaları çok amaçlı olarak kullanılan, içerdiği yüksek orandaki hava nedeni ile yüksek yalıtım performansı sağlayan bir malzemedir. 22 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk değerine sahip EPS yalıtım levhasında uygulanan sayısal çalışmalar neticesinde iki aşamada elde edilen efektif ısı iletkenlik değeri literatürde bulunan ve gözenekli malzemelerin ısı iletkenlik değerinin hesaplanmasında en çok kullanılan yöntem olan paralel model ile uyum içerisinde olduğu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda Maxwell modeli ve diğer modeller ile de çok az bir hata payı ile yakın değerlere sahip olduğu gözlemlenmektedir.

Taşınım denklemlerinin çözümü için Fluent programının veri tabanında bulunan Bousinesq yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşım ile hava içerisinde meydana gelen hareketlerden dolayı taşınım ile ısı geçişi gerçekleşmektedir. Fakat ısı geçişinin taşınım ile gerçekleşmesi için yeterli mesafenin olması gerekmektedir. Bunun nedeni ise Rayleigh sayısındaki uzunluk miktarıdır ki bu değer küpü alındığı için mikro seviyedeki çalışmalarda hava hareketleri çok az bir hızla gerçekleşmektedir. Bu nedenle mikro seviyede doğal taşınım ile ısı geçişinin çok az ya da hiç olmadığını göstermektedir.

Şekil 3.25. ve Şekil 3.26.'da mikro seviyedeki modelin hava hareketleri ve akım çizgileri görülmektedir.

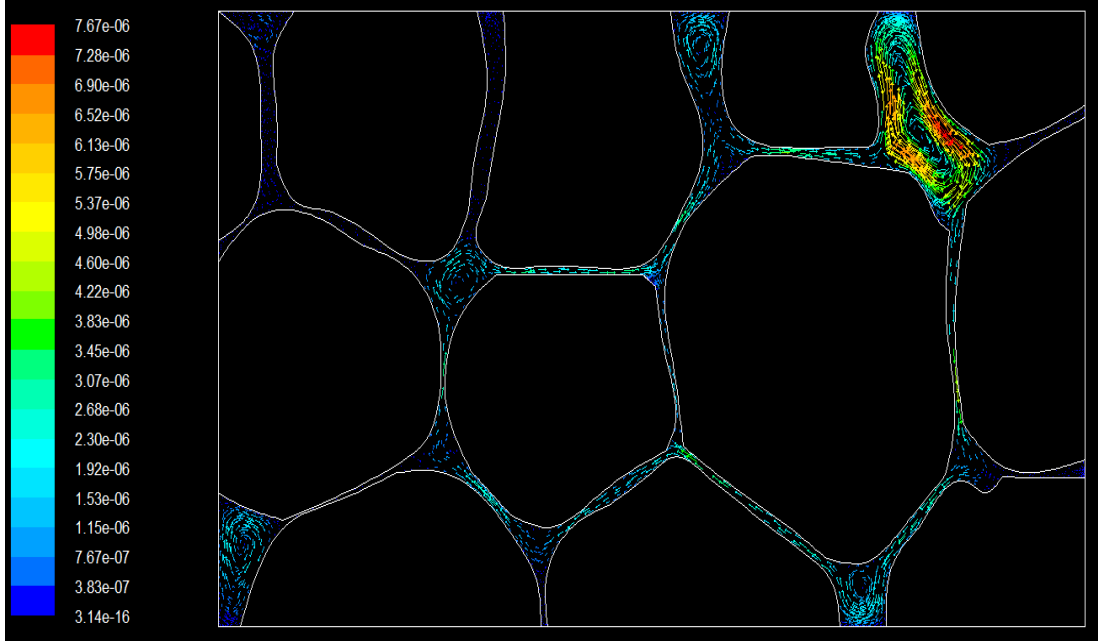


Şekil 3.25. Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Mikro Modelin Hız Şiddetleri

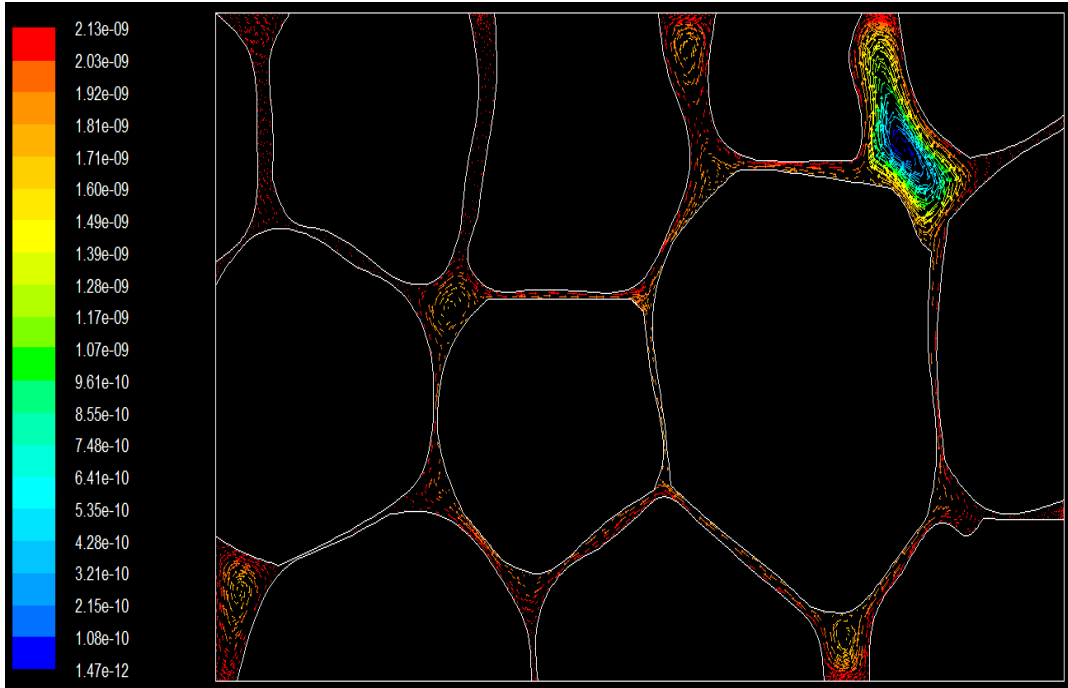


Şekil 3.26. Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Mikro Modelin Akım Fonksiyonları





**Şekil 3.27.** Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Makro Modelin Hız Şiddetleri



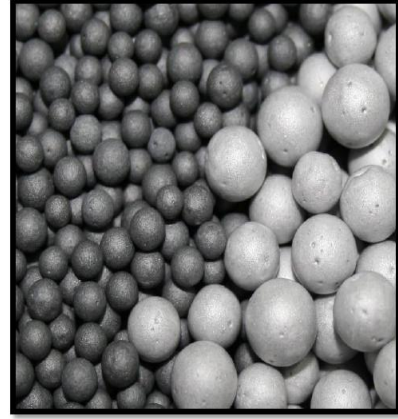
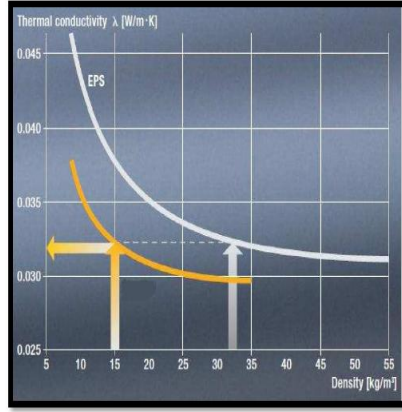
**Şekil 3.28.** Bousinesq Yaklaşımına Göre 278 K Ortalama Sıcaklıkta Makro Modelin Akım Fonksiyonları

Bu çalışma makro modeller için tekrar edilmiş ve hava hareketlerinin gözenek uzunluğuna bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Fakat bu artışla beraber yine de malzemenin geçirdiği ısı miktarında önemli bir değişme olmadığı söylenebilir. Bunun nedeni ise Rayleigh sayısına bağlıdır. Fakat unutulmaması gereken bir nokta vardır ki o da malzemenin yapısının homojen olmayışıdır. Bu anlayışla EPS'ye yaklaşmak daha doğru olacak ve daha hassas görüntülerin ve analizlerin yapılmasıyla tüm yapı detaylı olarak incelenmiş olacaktır. Şekil 3.27. ve 3.28.'da makro yapının hava hareketleri verilmiştir. Makro ve mikro çalışmalara ait diğer analizler EK E'de verilmiştir.

Işınım denklemlerinin çözümü için Fluent programının veri tabanında bulunan Discrete Ordinates (DO) radyasyon model yaklaşımı kullanılmıştır. Bu model farklı açıda sonsuz sayıda radyasyon transfer denklemi çözmektedir ve genel denklemi;

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s}), \vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \varphi(\vec{s}, \vec{s}') d\vartheta^2 \quad (3.12)$$

şeklindedir. EPS yalıtım malzemeleri sentetik malzemeler yapısında bulunan bazı malzemeler nedeniyle ısı geçirgenliğini azaltmakta ve bu sayede efektif ısıl iletkenlik değeri de azalmaktadır. Bunun en güzel örneği son yıllarda piyasaya çıkan karbon takviyeli EPS'lerdir. Bu malzemeler özel üretim yöntemleri ile taneciklerin uzun dalga ışınımını yansıtacak şekilde işlendiği gri/siyah tonlarında ürünlerde mevcuttur. Gri/siyah ton malzemenin kendine özgü rengi olup, herhangi bir boya malzemesi değildir. Malzeme bu rengi bünyesine katılan grafit ısı reflektörlerinden veya karbon siyahı takviyelerden almaktadır. Bu malzemeler normal EPS'lere göre daha iyi ısıyı yansıtılmaktadırlar ve bu sayede de diğer ürünlere göre ısıl iletkenlik değerleri %20 oranında daha düşüktür.



**Şekil 3.29.** Karbon Takviyeli EPS Baloncukları ve Isıl İletkenlik Değerleri

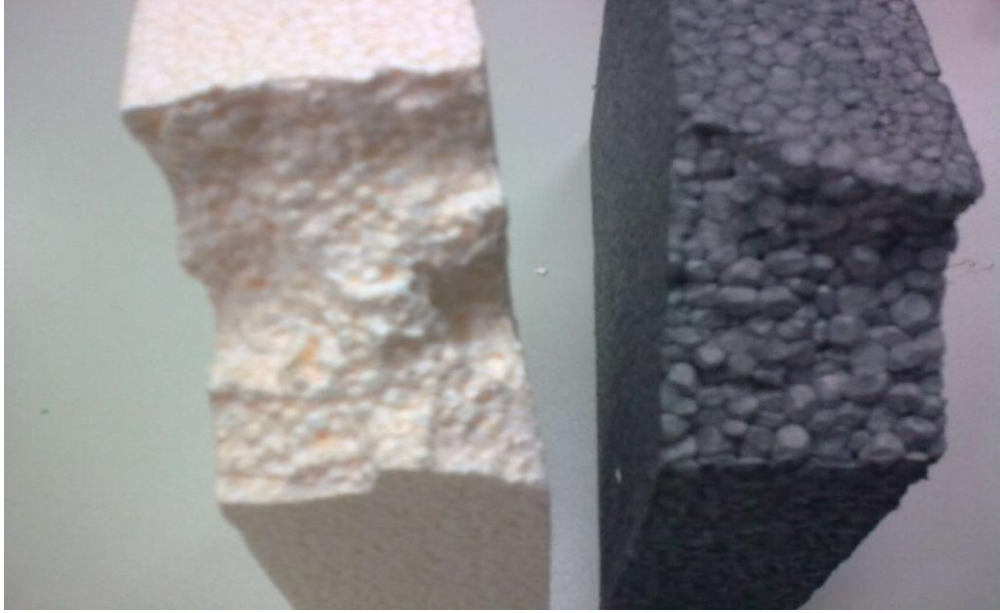
Malzemenin yapısında bulunan baloncukların sahip olduğu emissivite değerinin yeterince bilinmiyor olması ve bu konuda yapılan çalışmaların yetersiz kalmasından dolayı beyaz EPS için ışınım çözümleri emissivite değeri 0,9 olarak alınmıştır [18]. Fakat karbon takviyeli ürünler yansıtıcı özelliğinden dolayı emissivite özellikleri daha düşüktür ve bu sayede ısı geçişlerini daha fazla azaltmaktadırlar.

Şekil 3.30.'da  $14 \text{ kg/m}^3$  yoğunluğa sahip karbon takviyeli ısı yalıtım levhasının makro görüntüsü verilmiştir. İçerisinde bulunan reflektör katkı sayesinde ısıl iletkenlik değerini yaklaşık %20 mertebelerinde azalış sağlamaktadır.



**Şekil 3.30.**  $14 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluğa Sahip Karbon Takviyeli EPS'nin Makro Görüntüsü

Sayısal analizler sonucu elde edilen değerler ve grafikler yoğunluk sırasıyla aşağıdaki şekillerde verilmişlerdir. Bunlara ek olarak bulunan değerler ortalama ve ngrlen EPS ısı iletkenlik değerleri ile de karşılaştırılmıştır. ngrlen ve ortalama ısı iletkenlik değerleri TS EN 13163 nolu ısı yalıtım malzemeleri standardında yer alan hesaplama metodlarına göre yapılmıştır.



**şekil 3.31.** Beyaz ve Karbonlu EPS rnekleri

Çizelge 3.4.'te EPS ısı yalıtım malzemelerinin TS EN 13163 standardına göre hesaplanan ısı iletkenlik değerleri verilmiştir. Pratik olması açısından kullanılabilecek olan bir çizelgedir. Ayrıca hem öngörülen hem de ortalama ısı iletkenlik değerlerine bakıldığı zaman yoğunluğun artmasına bağlı olarak kademeli olarak düşmektedir. Dikkat çekici bir nokta ise  $16 \text{ kg/m}^3$  yoğunlukta üretilen karbon takviyeli ısı yalıtım levhasının öngörülen hesap değeridir. Aynı yoğunlukta beyaz EPS'ye oranla yaklaşık %20 daha avantajlıdır. Bu nedenden dolayı da son yıllarda kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

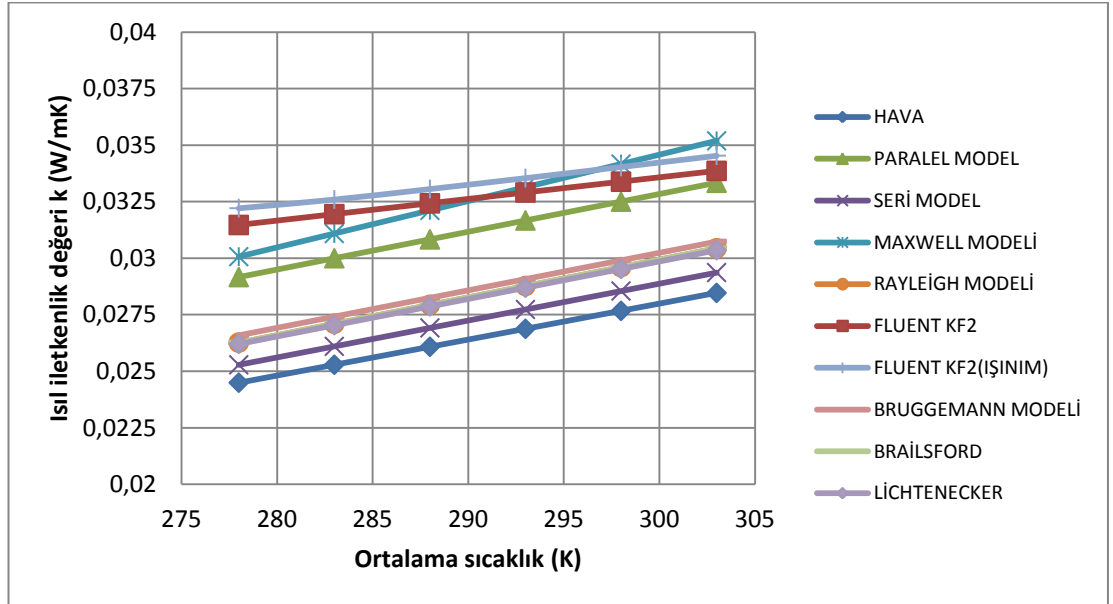
Çizelge 3.5., 3.6., 3.7.'de sırasıyla 18, 22 ve 32 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk değerlerine sahip EPS ısı yalıtım levhalarının sayısal sonuç değerleri verilmiştir. Yoğunluğun artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik değerleri düşmektedir.

Çizelge 3.4. EPS'inin TS EN 13163 Standardına Göre Hesaplanan Isıl İletkenlik Değerleri

Yoğunluk (kg/ m <sup>3</sup> )	Isıl Direnç Ra (W/m <sup>2</sup> K)										
	1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
14	0,26	0,52	0,65	0,78	1,04	1,30	1,56	1,82	2,08	2,34	2,60
16	0,27	0,54	0,68	0,81	1,08	1,35	1,62	1,89	2,16	2,43	2,70
18	0,28	0,56	0,70	0,84	1,11	1,39	1,67	1,95	2,23	2,51	2,79
20	0,29	0,57	0,71	0,86	1,14	1,43	1,71	2,00	2,28	2,57	2,85
22	0,29	0,58	0,73	0,87	1,16	1,46	1,75	2,04	2,33	2,62	2,91
24	0,30	0,59	0,74	0,89	1,18	1,48	1,78	2,07	2,37	2,66	2,96
26	0,30	0,60	0,75	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
28	0,30	0,61	0,76	0,91	1,21	1,52	1,82	2,12	2,43	2,73	3,03
30	0,31	0,61	0,77	0,92	1,22	1,53	1,84	2,14	2,45	2,76	3,06
32	0,31	0,62	0,77	0,93	1,23	1,54	1,85	2,16	2,47	2,78	3,09
	<b>k (W/mK) ortalama</b>										
	0,0384										
	0,0370										
	0,0359										
	0,0350										
	0,0343										
	0,0338										
	0,0333										
	0,0330										
	0,0327										
	0,0324										
	<b>Isıl Direnç Ra (W/m<sup>2</sup>K)</b>										
	1	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
14	0,25	0,50	0,62	0,74	0,99	1,24	1,49	1,74	1,99	2,23	2,48
16	0,26	0,51	0,64	0,77	1,03	1,29	1,54	1,80	2,06	2,32	2,57
16 ( Karbonlu)	0,32	0,64	0,80	0,97	1,29	1,61	1,93	2,25	2,57	2,90	3,22
18	0,26	0,53	0,66	0,79	1,06	1,32	1,59	1,85	2,12	2,38	2,65
20	0,27	0,54	0,68	0,81	1,08	1,36	1,63	1,90	2,17	2,44	2,71
22	0,28	0,55	0,69	0,83	1,10	1,38	1,66	1,93	2,21	2,49	2,76
24	0,28	0,56	0,70	0,84	1,12	1,40	1,68	1,96	2,24	2,52	2,81
26	0,28	0,57	0,71	0,85	1,14	1,42	1,70	1,99	2,27	2,56	2,84
28	0,29	0,57	0,72	0,86	1,15	1,44	1,72	2,01	2,30	2,58	2,87
30	0,29	0,58	0,72	0,87	1,16	1,45	1,74	2,03	2,32	2,61	2,90
32	0,29	0,58	0,73	0,88	1,17	1,46	1,75	2,04	2,34	2,63	2,92
	<b>k (W/mK) öngörülen</b>										
	0,040										
	0,039										
	0,031										
	0,038										
	0,037										
	0,036										
	0,036										
	0,035										
	0,035										
	0,035										
	0,034										

**Çizelge 3.5.** 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Makro Yapı Analiz Sonuçları

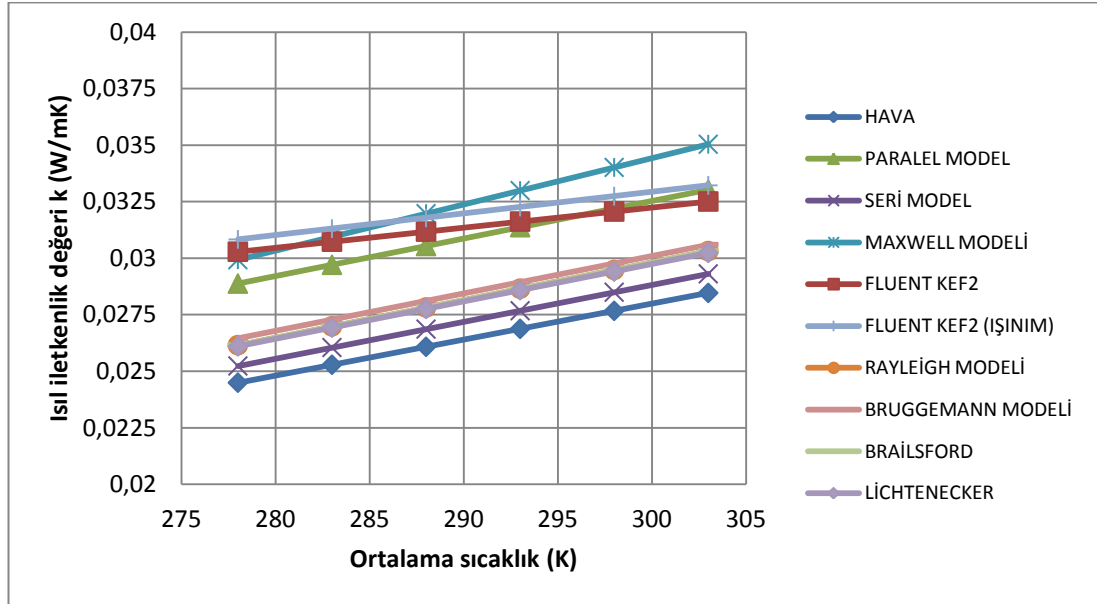
Transfer Mekanizması	T (K)	q (W)	k <sub>ef2</sub> (W/mK)
İletim	278	0,176993	0,031467
	283	0,359377	0,031946
	288	0,547148	0,032425
	293	0,740297	0,032904
	298	0,938817	0,033382
	303	1,142696	0,033859
Taşınım	278	0,177014	0,031471
	283	0,359414	0,031950
	288	0,547424	0,032442
	293	0,740655	0,032920
	298	0,939258	0,033398
	303	1,143224	0,033875
Işınım	278	0,181168	0,032209
	283	0,366675	0,032595
	288	0,557850	0,033059
	293	0,754697	0,033543
	298	0,957220	0,034036
	303	1,165426	0,034532



**Şekil 3.32.** 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması

**Çizelge 3.6.** 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Makro Yapı Analiz Sonuçları

Transfer Mekanizması	T (K)	q (W)	k <sub>ef2</sub> (W/mK)
İletim	278	0,170360	0,030286
	283	0,345725	0,030731
	288	0,526088	0,031175
	293	0,711441	0,031619
	298	0,901779	0,032063
	303	1,097094	0,032506
Taşınım	278	0,170372	0,030288
	283	0,345749	0,030733
	288	0,526123	0,031178
	293	0,711488	0,031622
	298	0,901846	0,032066
	303	1,097175	0,032509
Işınım	278	0,173410	0,030829
	283	0,352218	0,031308
	288	0,536392	0,031786
	293	0,725936	0,032264
	298	0,920856	0,032742
	303	1,121154	0,033219

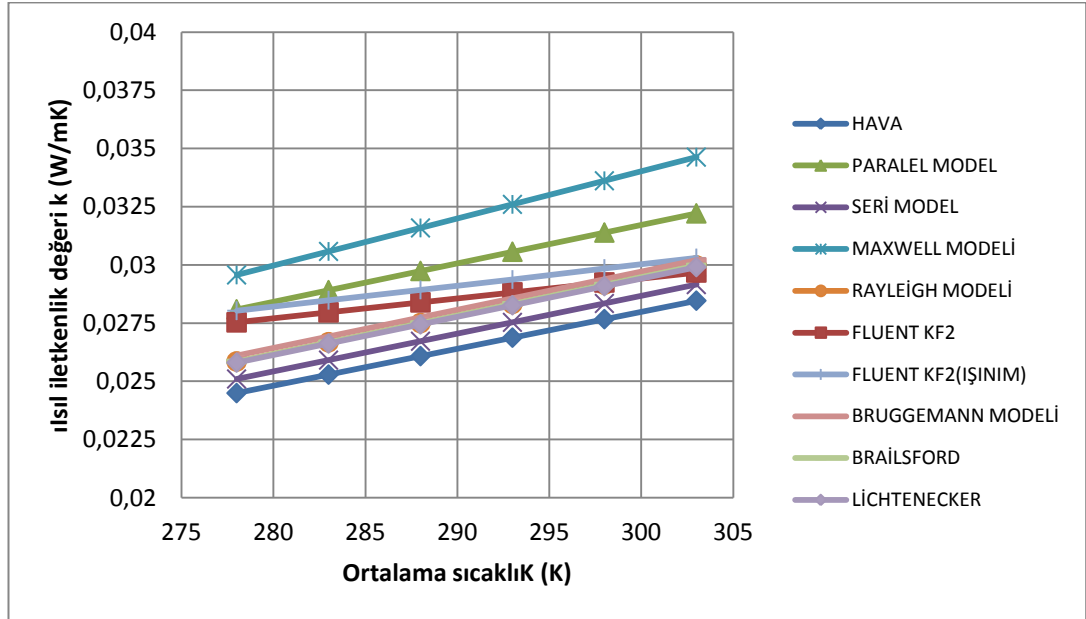


**Şekil 3.33.** 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması

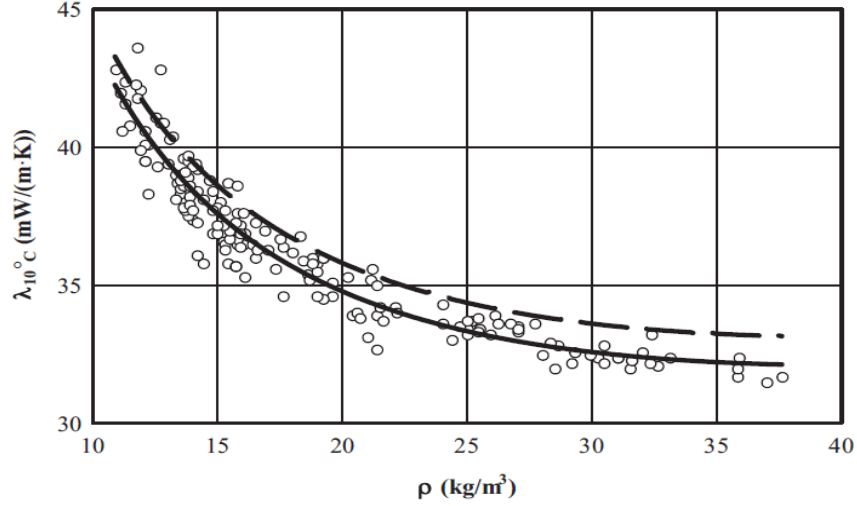


**Çizelge 3.7.** 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Makro Yapı Analiz Sonuçları

Transfer Mekanizması	T (K)	q (W)	k <sub>ef2</sub> (W/mK)
İletim	278	0,154864	0,027531
	283	0,314551	0,027960
	288	0,479058	0,028388
	293	0,648382	0,028816
	298	0,822519	0,029245
	303	1,001467	0,029673
Taşınım	278	0,154911	0,027540
	283	0,314596	0,027964
	288	0,479106	0,028391
	293	0,648431	0,028819
	298	0,822572	0,029247
	303	1,00152	0,029675
Işınım	278	0,158076	0,028102
	283	0,320721	0,028509
	288	0,488477	0,028947
	293	0,661352	0,029393
	298	0,839355	0,029844
	303	1,022494	0,030296

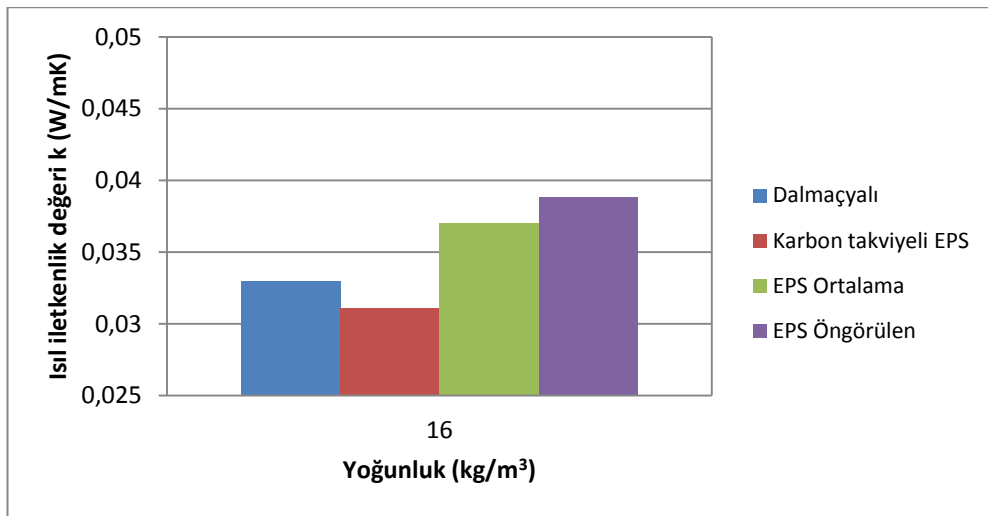


**Şekil 3.34.** 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması



Şekil 3.35. Farklı Üreticilerden Alınan Numunelerin Deneysel Analiz Sonuçları [16]

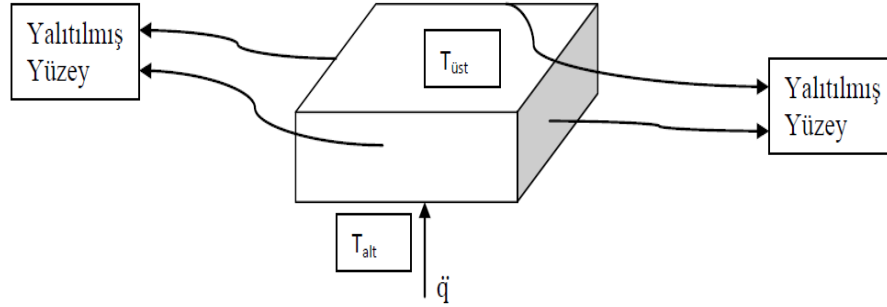
Şekil 3.36.'dan da anlaşılacağı üzere karbon takviyeli EPS yalıtım malzemeleri yapısında bulunan ısı geçirgenliğini azaltıcı reflektör katkısı sayesinde ısı iletkenlik değerini minimum seviyeye indirmektedir. Böylece diğer ürünlere göre daha fazla verim sağlamak ve maksimum seviyede enerjiden tasarruf etmemize yardımcı olmaktadır. Son zamanlarda artan enerji fiyatları ve kayıplarını da göz önünde bulundurduğumuzda son derece etkili bir ürün olarak uygulanacak yöntemlerde kullanılabilir.



Şekil 3.36. Farklı EPS Türlerinin Karşılaştırılması

### 3.2.Deneysel Çalışmalar

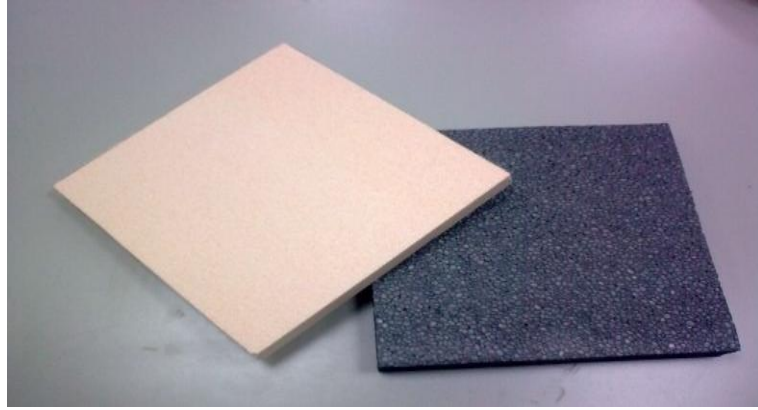
Gözenekli yapı malzemelerinden birisi olan EPS yalıtım levhalarının en önemli özelliği hafif olması ve ısı iletkenlik değerlerinin diğer duvar elemanlarına göre düşük olmasıdır. Bu özelliklerini sağlayan en önemli parametre ise gözenekli yapısı ve içerdiği kuru hava miktarıdır. Bilindiği üzere malzeme gözenekliliğinin artması; malzeme yoğunluğunu, dayanımını ve ısı iletkenliğini genellikle düşürmektedir. Bu, yoğunluk–ısı iletkenlik değeri arasındaki ilişkinin, EPS yapı elemanındaki değişimini görmek için de deneysel ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler için gerekli olan EPS yalıtım levhaları Grofen Kırıkkale fabrikasından temin edilmiştir ve 30x30x5 cm ölçülerinde kesimleri yapılarak deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler düşük ısı iletkenlik ölçen ve çalışma prensibi Şekil 3.37.'de gösterilen Fox 314 ısı akış sayacı ile ölçülmüştür.



Şekil 3.37. Fox 314 Çalışma Prensibi Şematik Gösterimi

TS EN 13163 standardına göre levha halindeki deney parçası veya birbirine yaklaşık özdeş deney parçaları ısı akış sayacının ısıtma ve soğutma üniteleri arasına yerleştirilir. Deney parçasının iki yüzeyinin sıcaklık ortalaması ve iki yüzey arasındaki sıcaklık farkı sabit kalacak şekilde kararlı rejim şartları temin edilir. Isı akış sayacı deney parçalarının merkezi bölgesinden ve cihazın merkezi ölçme bölgesinden eş zamanlı geçen, tek yönlü ve değişmez yoğunluklu bir akış hızı sağlar. Kararlı rejimin sağlanmasıyla birlikte sıcaklık farkı, malzeme kalınlığı ve geçen ısı akışı değerleri kullanılarak ısı iletkenlik değerinin belirlenmesi gerçekleşir. Bu

belirleme tek boyutlu ısı iletim problemi şeklinde ele alınarak hesaplanır. Deneyler için kullanılan numunelerden bazıları Şekil 3.38.'de verilmiştir. Isıl iletkenlik değerleri hem beyaz olarak nitelendirilen normal EPS için hem de son dönemde geliştirilen içerisindeki yansıtıcı özellik sayesinde güneş ışınlarını yansıtarak ısı geçişini azaltan karbon takviyeli EPS yalıtım levhaları için farklı sıcaklık değerlerinde tespit edilmiştir.



**Şekil 3.38.** Beyaz ve Karbon Takviyeli Numune Örnekleri

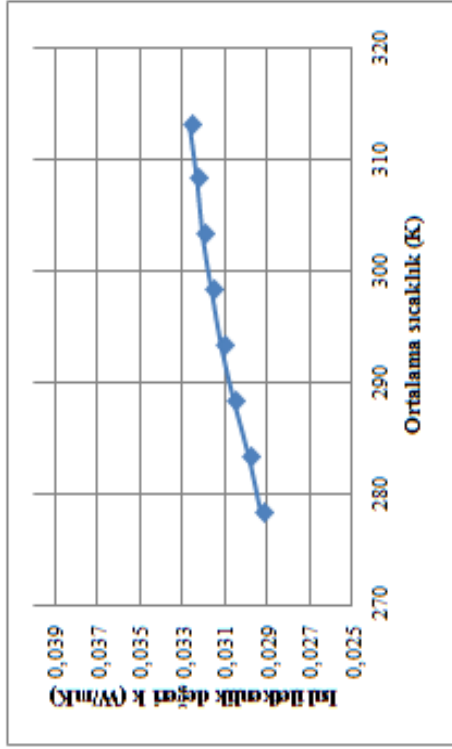
Isıl iletkenlik değeri ölçümünde Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Isı Transferi Laboratuvarında bulunan Şekil 3.39.'da ki Lasercomp Fox 314 marka ısı akış sayacı kullanılmıştır.



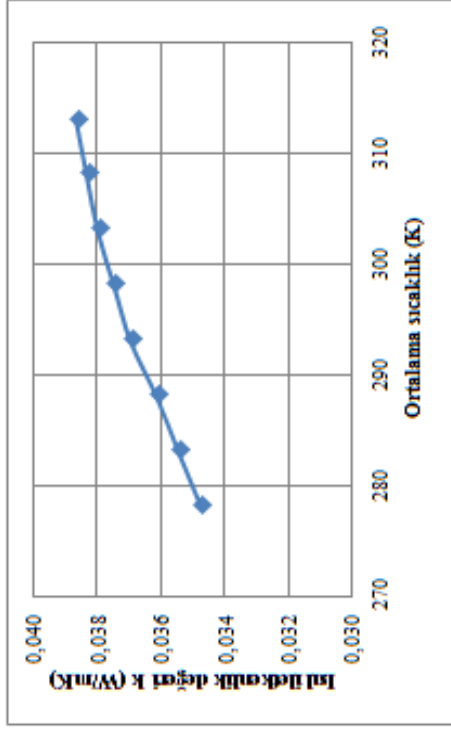
**Şekil 3.39.** Deneyler İçin Kullanılan Fox 314 Cihazı

Deney için hazırlanan numuneler standartlarda verilen 10 °C ortalama sıcaklıktan başka 5, 15, 20, 25, 30 °C (278–303 K) ortalama sıcaklıklarda da ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Ölçülen yoğunluk değerleri ise karbonlu 14 kg/m<sup>3</sup> ve 18 kg/m<sup>3</sup>, 22 kg/m<sup>3</sup>, 28 kg/m<sup>3</sup>, 32 kg/m<sup>3</sup>'dir. Ayrıca 10 °C ortalama sıcaklıkta bu yoğunlukların yanı sıra karbonlu 16 kg/m<sup>3</sup> ve 20 kg/m<sup>3</sup>, 26 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklarında ölçümler yapılmıştır. Tespit edilen ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklık ile değişimleri ise grafikler şeklinde verilmiştir.

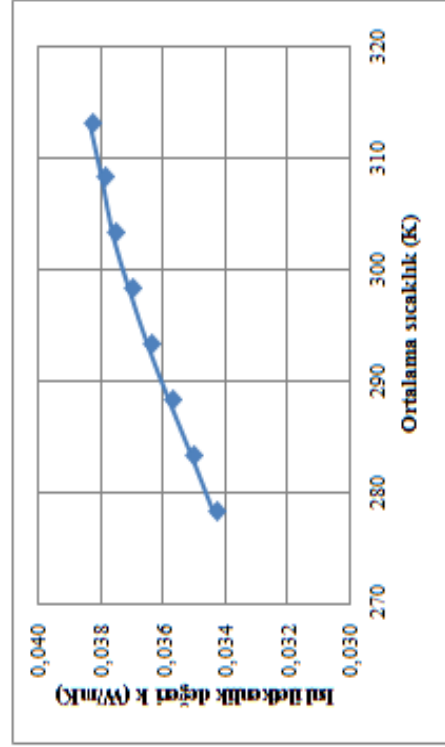
Deneysel ve sayısal sonuçlar göstermiştir ki EPS ısı yalıtım malzemelerinde yoğunluğun artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik değerleri düşmektedir. Bunun nedeni ısı iletkenlik değerini etkileyen en önemli parametre olan mikro gözeneklerin yüksek yoğunluk değerlerinde artıyor olmasıdır. Düşük yoğunluklarda ise tam tersi bir durum söz konusu olduğundan bu malzemelerde ısı iletkenlik değeri daha yüksektir. Ayrıca sıcaklığın artması ile birlikte ısı iletkenlik değerinin arttığı deneysel ve sayısal çalışmalar ile bulunmuştur. Bu durum ise kabuk yapısını oluşturan polistiren ve gözeneklerde bulunan havanın ısı iletkenlik değerinden kaynaklanmaktadır. Çünkü sıcaklığın artması ile hava ve polistirenin ısı iletkenlik değerleri artmaktadır. Bu nedenden dolayı da EPS ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik değeri sıcaklığın artması ile artış göstermektedir.



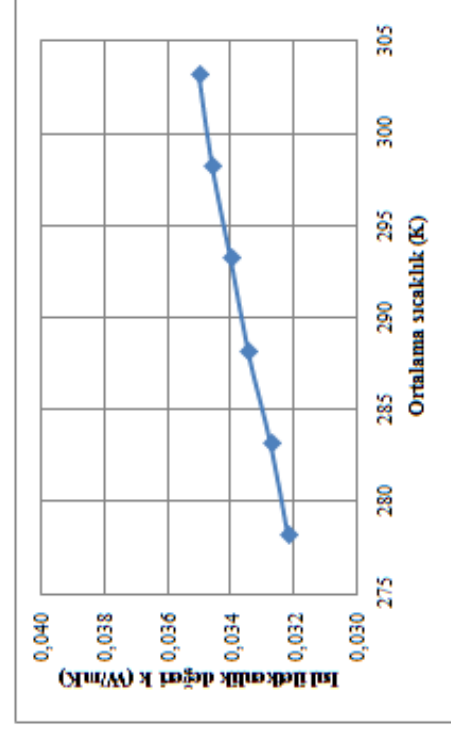
Şekil 3.40. Karbonlu 14 kg/m<sup>3</sup> EPS Numunesi



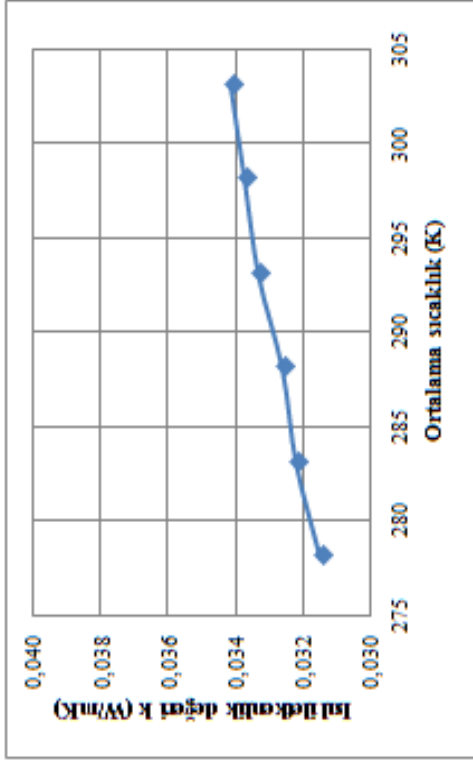
Şekil 3.41. 18 kg/m<sup>3</sup> EPS Numunesi



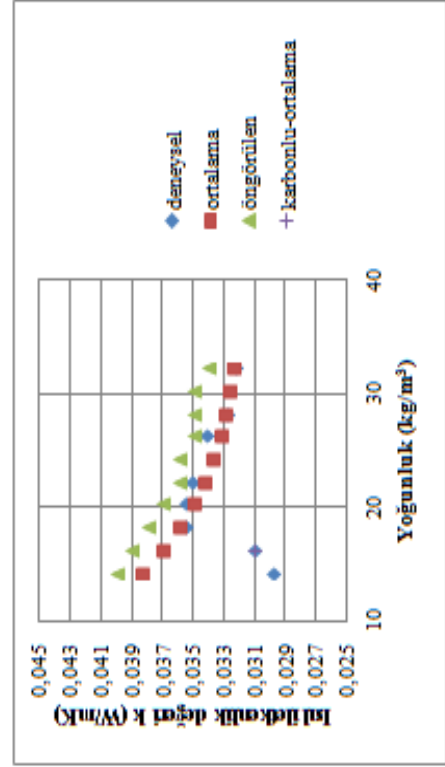
Şekil 3.42. 22 kg/m<sup>3</sup> EPS Numunesi



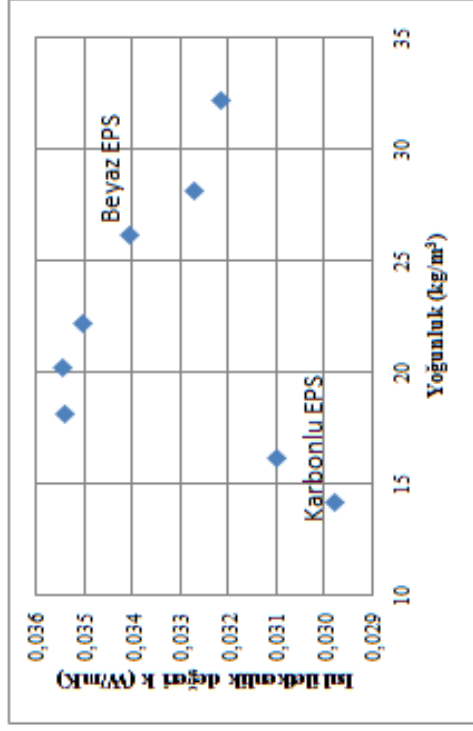
Şekil 3.43. 28 kg/m<sup>3</sup> EPS Numunesi



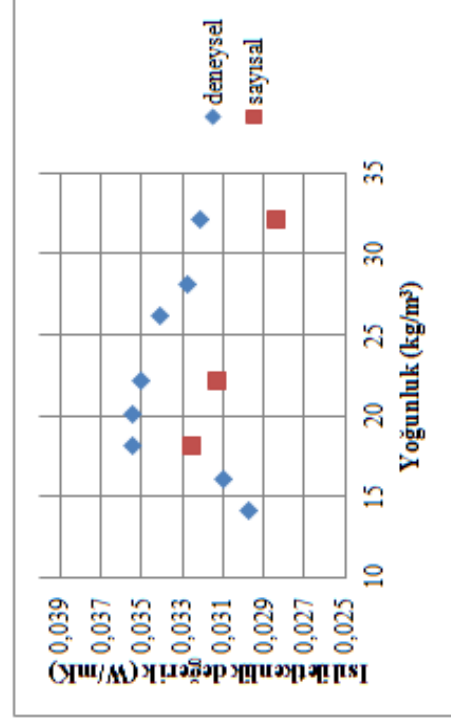
Şekil 3.44. 32 kg/m<sup>3</sup> EPS Numunesi



Şekil 3.46. Deneysel ve Hesap Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 3.45. Isıl İletkenliğin Yoğunluk İle Değişimi



Şekil 3.47. Ortalama 10 °C Sıcaklıkta Deneysel ve Sayısal Çözüm Sonuçları

## 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Enerji tasarrufu ile enerjiye harcanan paraların önemli ölçüde azalmasını sağlayan yalıtım malzemeleri mühendislik uygulamalarında büyük oranda tercih edilmektedir. Her geçen gün farklı sektörlerde kullanılmaya başlayan çeşitli yalıtım malzemeleri bulunmaktadır. Bu malzemeler içerdikleri kuru hava nedeniyle hafif, darbelere dayanıklı, kolay uygulanabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir. Bu malzemelerden sentetik olarak üretilen ve en çok kullanılanlardan biri olan EPS yalıtım malzemeleri bünyesinde bulunan milyarlarca gözenek sayesinde ısı iletkenlik değerini en aza indirmekte ve böylece kullanıldıkları alanlarda oluşabilecek enerji kayıplarını en aza indirmektedirler. Gözenekli yapıya sahip bu malzemeler ısı iletkenlik değerinin değişmesinde önemli bir parametre olan gözenek boyutu, gözenek oranı ve gözenek dağılımı konusunda literatürde yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bunun nedeni gözeneklerin homojen olmayışı ve 3 boyutlu modelin yapılamamasıdır.

EPS yalıtım malzemelerinin mikro ve makro görüntüleri kullanılarak yapılan bu tez çalışmasında görüntülere ait bilgisayar modelleri oluşturularak sayısal olarak efektif ısı iletkenlik değerlerinin sıcaklık ve yoğunluk ile değişimi tespit edilmiştir. Genel olarak malzemelerin ısı iletkenlik değeri yoğunluk arttıkça artmaktadır. Fakat EPS, yapısı gereği ilginç bir davranış göstererek yoğunluğun artmasına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri düşmektedir. Bunun nedeni ısı iletkenlik değerini önemli ölçüde etkileyen parametre olan mikro gözenek boyutunun yoğunluğun artmasına bağlı olarak artış göstermesidir. Bu yaklaşım malzemeyi oluşturan polistiren kabuk yapısı ile ilgili olabilir. Ayrıca mikro görüntülere bakıldığı zaman bu kabuksu yapılarda yer yer yırtıklar görülmekte ve bu yırtıklar ile de malzemenin kapalı gözenekli oluşu fikri kısmen yanlış olabilmektedir. EPS yalıtım malzemelerinin gözenek oranları bilgisayar ortamında  $18 \text{ kg/m}^3$  için %96,26,  $22 \text{ kg/m}^3$  için %96,49 ve  $32 \text{ kg/m}^3$  için ise %97,12 olarak bulunmuştur. Fakat bu değerler malzemenin tamamının değil sadece analiz edilecek olan yüzeyinin makro ve mikro düzeyde sayısal olarak belirlenen gözeneklilik oranıdır. Gözeneklilik oranı tespitinden sonra gerçek mikro ve makro görüntülere uygun olarak modeller Gambit 2.4.6 programında modellenmiştir ve sınır koşulları duvar olarak girilmiştir. Sayısal yöntemde



karşılaşılabilecek en büyük problem; gerçek mikro ve makro görüntülerin analizi yapılacak olan modele dönüştürülmesidir. EPS yapısı gereği homojen bir yapıya sahip değildir. Bu nedenden dolayı da doğru model oluşturmak zor olmaktadır. Uygun çizimlerin yapılamaması durumunda efektif ısı iletkenlik değerleri ile sıcaklık dağılımı sonuçları hatalı olacaktır. Uygun sınır koşullarının ve malzemelerin belirlenmesiyle model Fluent 6.3.26 programında analiz edilerek yoğunluğun ve sıcaklığın efektif ısı iletkenlik değerini nasıl etkilediği bulunmuştur. Aynı zamanda gözenek bölgelerinde taşınım ve ışınım çözümleri de yapılarak malzeme içerisindeki taşınım hareketleri gözlemlenmeye çalışılmıştır.

Analizler sonucunda sıcaklığa bağlı olarak EPS'nin ısı iletkenlik değerinin arttığı fakat yoğunluğa bağlı olarak ise azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Ortalama 10 °C sıcaklıkta sayısal olarak efektif ısı iletkenlik değeri 18 kg/m<sup>3</sup>, 22 kg/m<sup>3</sup>, 32 kg/m<sup>3</sup> için sırasıyla 0,032595 W/mK, 0,031308 W/mK, 0,02848 W/mK olarak bulunmuştur. Mikro modellerde yapılan analizlerde taşınım ile ısı geçişinin hiç olmadığı, makro modellerde yapılan analizlerde ise çok az olduğu tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmada ise sayısal analizlere uygun olarak 6 farklı ortalama sıcaklıkta ölçümler FOX 314 cihazında yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlerde sayısal çözüme paralel olarak yoğunluğun artması ile ısı iletkenlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Aynı zamanda sıcaklık artışı ile de ısı iletkenlik değerlerinde artışlar gözlemlenmiştir. Fakat yapılan EPS yalıtım malzemelerinde son yıllarda ortaya çıkan gelişmeler ile birlikte karbon takviyesi popülaritesini artırmıştır. Karbon takviyeli EPS içerisinde ki reflektörler sayesinde ısıyı yansıtmaktadır ve böylece ısı iletkenliği düşürmektedir. Deneysel olarak 14 kg/m<sup>3</sup> ve 16 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğa sahip karbon takviyeli malzemelerin ısı iletkenlikleri beyaz EPS'lere göre %20 daha azdır. Bu malzemelerde yapılan deneyler sonucunda yoğunluk artışına paralel olarak ısı iletkenlik değerinde bir artış gözlenmiştir. Ortalama 10 °C sıcaklıkta yapılan ölçümlerde karbonlu 14 kg/m<sup>3</sup> ve karbonlu 16 kg/m<sup>3</sup> için ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0,02984 W/mK ve 0,03105 W/mK olarak bulunmuştur. Aynı zamanda beyaz EPS için yapılan ölçümlerde 18 kg/m<sup>3</sup> için 0,03547 W/mK, 20 kg/m<sup>3</sup> için 0,03551 W/mK, 22 kg/m<sup>3</sup> için 0,03507 W/mK, 26 kg/m<sup>3</sup> için 0,03412 W/mK, 28 kg/m<sup>3</sup> için 0,03276 W/mK, 32 kg/m<sup>3</sup> için 0,03220 W/mK olarak tespit edilmiştir. Deneysel olarak ölçülen sonuçların literatürde bulunan hesap değerleri ile uyum içerisinde olduğu fakat sayısal sonuçlar ile belli ölçülerde hatalar olduğu

gözelemlenmiştir. Bunun nedeni ise sayısal olarak oluşturulan modelin 2 boyutlu olması, kabuk yapısı, yapının homojen olmayışı gibi nedenler sıralanabilir. EPS yalıtım malzemelerinin içyapısını homojen hale getirmek hem yoğunluk değerini hem de ısı iletkenlik değerini önemli ölçüde azaltacağı görülmektedir.

İleriye yönelik yapılacak olan sentetik yalıtım malzemeleri çalışmalarında, bu tez çalışmasında önerilen yöntem ve uygulamaların kullanılması; hızlı, ekonomik ve basit çözümler verebileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Deniz, E., Vakumlu Yalıtım Malzemelerinin Karakteristik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2009.
- [2] Akbulut, U., Yapı Malzemelerinin Gözenekliliğine Bağlı Olarak Isı İletim Katsayısının Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2003.
- [3] Baysal, M. S. S., Silindirik ve Elyaf Takviyeli Katkılı Karma Malzemelerin Efektif Isı İletim Katsayısının Belirlenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2001.
- [4] Devocioğlu, A. G., Gözenekli Yapı Taşlarında Isı İletim Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2001.
- [5] Altun, Ö., Gürkan, İ., Gözenekli Malzemelerde Isı İletim Katsayısının ve Kritik Yarıçapın Değişimi, AKÜ Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 01, 79–85, 2009.
- [6] Yüksel, N., Avcı, A., Gözenekli Malzemelerin Etken Isıl İletkenlikleri Üzerine Mevcut Çalışmalar, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 25, 331–346, 2010.
- [7] Demir, İ., Başpınar, M. S., Görhan, G., Kahraman, E., Akyol, O., Pomza Agregalı Hafif Beton Isıl Özelliklerine Polistiren Köpük ve Uçucu Kül Katkısının Etkileri, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 2011.
- [8] Mıhlayanlar, 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 and Design, Vol. 29, 344–352, 2008.

- [9] Durmaz, S., A Numerical Study on the Effective Thermal Conductivity of Composite Materials, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2004.
- [10] Fiedler, T., Löffler, R., Bernthaler, T., Winkler, R., Belova, I.V., Murch, G.E., Öchsner, A., Numerical Analyses of the Thermal Conductivity of Random Hollow Sphere Structures, *Materials Letters*, Vol.63, 1125–1127, 2009.
- [11] Wang, J., Carson, J. K., North, M. F., Cleland, D. J., A New Approach to Modelling the Effective Thermal Conductivity of Heterogeneous Materials, *Internal Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, 3075–3082, 2006.
- [12] Paek, J. W., Kang, B. H., Kim, S. Y., Hyun, J. M., Effective Thermal Conductivity and Permeability of Aluminium Foam Materials, *Internal Journal of Thermophysics*, Vol. 21, No. 2, 2000.
- [13] Carson, J. K., Lovatt, S. J., Tanner, D. J., Cleland, A. C., Thermal Conductivity Bounds for Isotropic, Porous Materials, *Internal Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, 2150–2158, 2005.
- [14] Schellenberg, J., Wallis, M., Dependence of Thermal Properties of Expandable Polystyrene Particle Foam on Cell Size and Density, *Journal of Cellular Plastics*, Vol. 46, No. 209, 2010.
- [15] Placido, E., Arduini-Schuster, M. C., Khun, J., Thermal Properties Predictive Model for Insulating Foams, *Infrared Physics and Technology*, Vol. 46, 219–231, 2005.
- [16] Gnip, I., Vejelis, 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*, Vol. 52, 107–111, 2012.

- [17] Munoz, F. D., Anderson, B., Cejudo-Lopez, J. M., Andres, A. C., Uncertainty in the Thermal of Insulation Matrials, Energy and Buildings, Vol. 42, 2159–2168, 2010
- [18] Coquard, R., Baillis, D., Modeling of heat transfer in low-density EPS foams. ASME J. Heat Transfer, 128 (6), 538–549, 2006.
- [19] Insulation Manuel, NIFES Consulting Group, United Kingdom.
- [20] DOE/CE - 0180, The US Department of Energy, Insulation Fact Sheet with Addendum on Moisture Control, USA, 2002.
- [21] İZODER (Isı, Ses ve Su İzolasyoncuları Derneği), T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Yapı Denetim Kuruluşları Yalıtım Seminerleri, 13 Mayıs-11 Haziran 2003.
- [22] Karakoç, T. H., Turhan, O., Binyıldız, E., Yıldırım, E., Isı Yalıtımı, 1. Baskı, 2011.
- [23] Bayer, G., Binalarda Uygulanan Isı Yalıtım Sistemleri ve Örnek Bir Projede Isı Yalıtım Maliyet Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, 2006.
- [24] Evcil, N., Isı İzolasyonu ve Dış Duvarların Enerji Etkin Yenilenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2000.
- [25] TIMSA (Thermal Insulation Manufacturers and Suppliers Association), Insulation Industry Handbook, 1997–1998.
- [26] Turan, O., Binyıldız, E., Türker, A., Isı–Ses–Su–Yangın Yalıtımı Eğitimi, 17–18 Ocak 1997.
- [27] Reman, O., Isı - Su İzolasyon Malzemelerinin Sınıflandırılması, Özellikleri, Soru ve Seçim Kriterleri, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, 2000.

- [28] Eicler, F., Bauphysikalische Entwurfslehre, 3 Wamedammstoffe, Köln, Almanya, 1997.
- [29] Tuzcu, H., Isı Yalıtımı ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Yanmaya Dirençli Poliüretan Esaslı Malzemelerin Tutuşma ve Yanma Karakteristiklerinin Deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2010.
- [30] Yalıtım, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, MMO Yayın No: 2005/399,s. 7–15, 19–37, 81–104, 2005.
- [31] Odian, G., Principles of Polymerization, Fourth Edition, A John Wiley and Sons Inc. Publication, 2004.
- [32] PÜD (Polistiren Üreticileri Derneği), Yapı Malzemeleri Piyasa Gözetim Denetim Eğitimi, 4–8 Nisan, Alanya, 2011.
- [33] Türker, A., Polietilen Yalıtım Malzemelerinde Gelişmeler, ODE Bülteni, Sayı 6, 1995.
- [34] <http://www.ode.com.tr/>
- [35] ILLBRUCK, Melamin Köpüğü Broşürü, ILLBRUCK Firması Yayınları, 1995.
- [36] Türk Standardı Enstitüsü, Isı Yalıtım Mamulleri–Binalar İçin Fabrikasyon Olarak Extrüzyonla İmal Edilen Polistiren Köpük (XPS) Özellikler, TS EN 13164, Haziran, Ankara, 2010.
- [37] <http://www.yuce-er.com.tr>
- [38] <http://www.egeproses.com>
- [39] <http://www.eastchem.com.tr>

- [40] DIN 54836, Testing of Combustible Materials; Determination of Ignition Temperature, 1984.
- [41] ASTM D1929–12, Standard Test Method for Determining Ignition Temperature of Plastics, 2011.
- [42] İnce, A., Tesisat Yalıtımı ve Uygulamaları, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Adana Şubesi.
- [43] Incropera, F. P., DeWitt, D.P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley and Sons, Fourth Edition, 1996.
- [44] Yılmaz, T., Teorik ve Uygulamalı Isı Transferi, 1. Basım, İstanbul, Kasım, 1999.
- [45] Jeevan, K., Quadri, G.A., Seetharamu, K.N., Azid, I.A., Zainal, Z.A., Optimization of Thermal Resistance of Stacked Micro-Channel Using Genetic Algorithms, International Journal for Numerical Methods in Heat & Fluid Flow, 15 (1), 27–42, 2005.
- [46] Vafai, K., Handbook of Porous Media, Taylor and Francis Group, 2005.
- [47] Bart, G. C. J., Thermal Conduction in Nonhomogeneous and Phase Change Media, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1994.
- [48] Öchsner, A., Murch, G.E., de Lemos, M. J. S., Cellular and Porous Materials Thermal Properties Simulation and Prediction, Wiley–VCH Verlag GmbH and Co. KGaA, Weinheim, 2008.
- [49] Energy Audit Manuel, Vol. 3, Equipment–Materials and Systems, Part 2, Steam Distribution System–Insulation, RCG/Hagler, Bailly, Inc., Washington, EIE/UETM, 1989.
- [50] Özişik, M. N., Heat Conduction, John Wiley and Sons Inc., Canada, 1993.

- [51] Çengel, Y. A., Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım, Güven Bilimsel Kitapevi, İzmir, 2011.
- [52] Genceli, O. F., Çözümlü Isı Taşınımı Problemleri, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2002.
- [53] Altınışik, K., Isı Yalıtımı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2006.
- [54] Tavman, İ. H., Effective Thermal Conductivity of Granular Porous Materials, Int. Comm. HeatMass Transfer, 23 No.2, 169–176, 1996.
- [55] Altun, Ö., Isıl Engelleme Kaplamalarında Efektif Isı İletim Katsayısının Değişimi, Doktora Tezi, Eskişehir, 2007.
- [56] Kayfeci, M., Sıvılar İçin Isı İletim Katsayısı Ölçüm Cihazı Tasarımı ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak, 2005.
- [57] Altun, Ö., Lazer Flaş Yöntemini Kullanarak Malzemelerin Isı İletim Katsayısının Deneysel Olarak Tayin Edilmesi ve Örnek Bir Uygulama, VII. Ulusal Ölçübilim Kongresi, 375–380.
- [58] Sorai, M., Comprehensive Handbook of Calorimetry and Thermal Analysis, John Wiley&Sons, 518, 2004.
- [59] Altun, Ö., Boke, Y. E., Kalemtaş, A. , Problems for Determining the Thermal Conductivity of TBCs by Laser–Flash Method, Journal of Achievements i Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 30, Issue 2, October, 2008.
- [60] ASTM 2000a, Standard Test Method For Steady–State Heat Flux Measurements And Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded–Hot–Plate Apparatus, Annual Book of ASTM Standards (04.06), C 177–197.



- [61] ASTM 2000b, Standard Test Method For Steady-State Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box, Annual Book of ASTM Standards (04.06), C 236- 289.
- [62] Yeşilata, B., Turgut, P., Işıker, Y., Kompozit Yapı Malzemelerinde Isıl Özellik Ölçümü-1: Mevcut Ölçüm Tekniklerin İrdelenmesi, Mühendis ve Makine, Cilt 48, Sayı 564.
- [63] Abdou, A. A., Budaiwi, I. M., Comparison of Thermal Conductivity Measurements of Building Insulation Materials under Various Operating Temperatures, Journal of Building Physics, 29: 171–184, 2005.
- [64] Andre, S., Remy, B., Pereira, F.R., Cella, N., Neto, A. J. S., Hot Wire Method for the Thermal Characterization of Materials: Inverse Problem Application, Engenharia Termica, No:4, P. 55–64, 2003.
- [65] Alvarado, S., Marin, E., Juarez, A. G., Calderon, A., Ivanov, R., A Hot-Wire Method Based Thermal Conductivity Measurement Apparatus for Teaching Purposes, European Journal of Physics, Vol. 33, No:4, 2012.
- [66] Christopher, M. D., Application of the Transient Hot-Wire Technique for Measurement of Effective Thermal Conductivity of Catalyzed Sodium Alanate for Hydrogen Storage, Master of Science, Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2006.
- [67] Al-Ajlan, S. A., Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, P. 2184–2191, 2006.
- [68] Arıkan, M. A. S., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, Makine Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- [69] Kline, D.E., Thermal Conductivity of Polymers, Materials Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York.

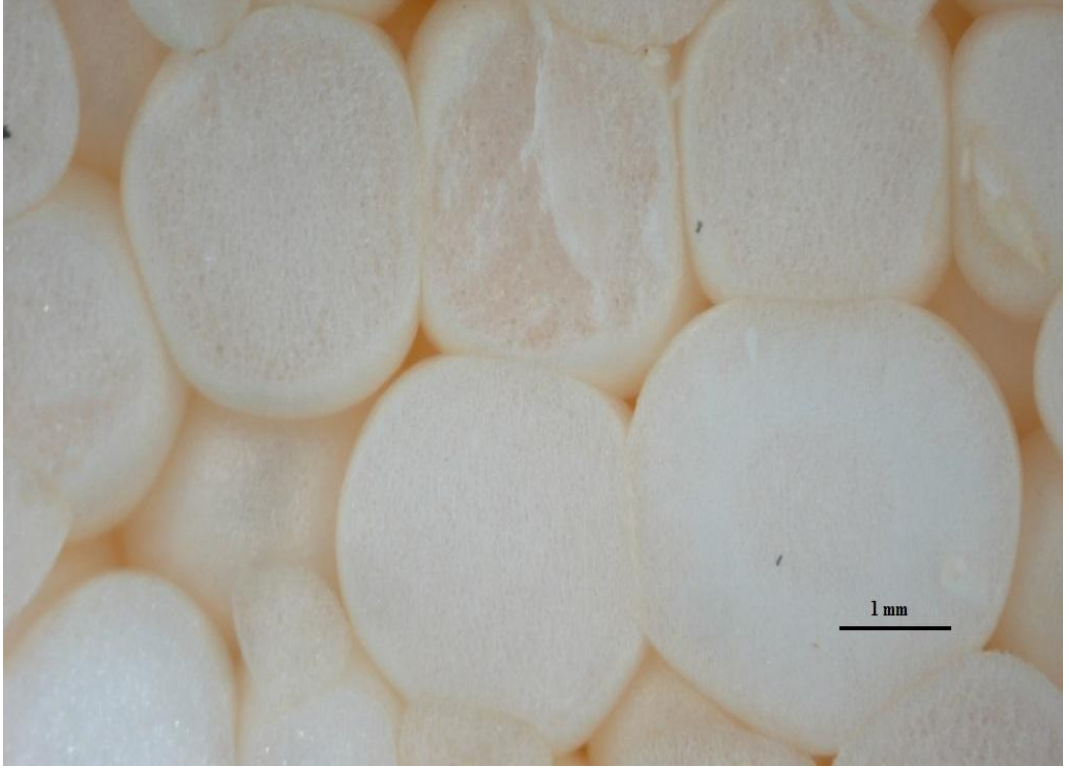
- [70] Algaer, E., Thermal Conductivity of Polymer Materials Reverse Nonequilibrium Molecular Dynamics Simulation, Technische Universitat Darmstadt, 2010.
- [71] Odian, G., Principles of Polymerization, Wiley Interscience, Fourth Edition, New York, 2004.
- [72] Fiedler, T., Pesetskaya, E., Öchsner, A., Gracio, J., Calculations of the Thermal Conductivity of Porous Materials, Advanced Materials Forum III, 514–516, 754, 2006.
- [73] Kaviany, M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer, Second Edition, New York.
- [74] Tritt, T. M., Thermal Conductivity Theory, Properties, and Applications, Kluwer Academic / Plenum Publishers, South Carolina, 2004.
- [75] Ingham, D. B., Pop, I., Transport Phenomena In Porous Media II, Pergamon, Elsevier Science, Oxford, 2002.
- [76] Ingham, D. B., Pop, I., Transport Phenomena In Porous Media II, Pergamon, Elsevier Science, Oxford, 2005.

## EKLER

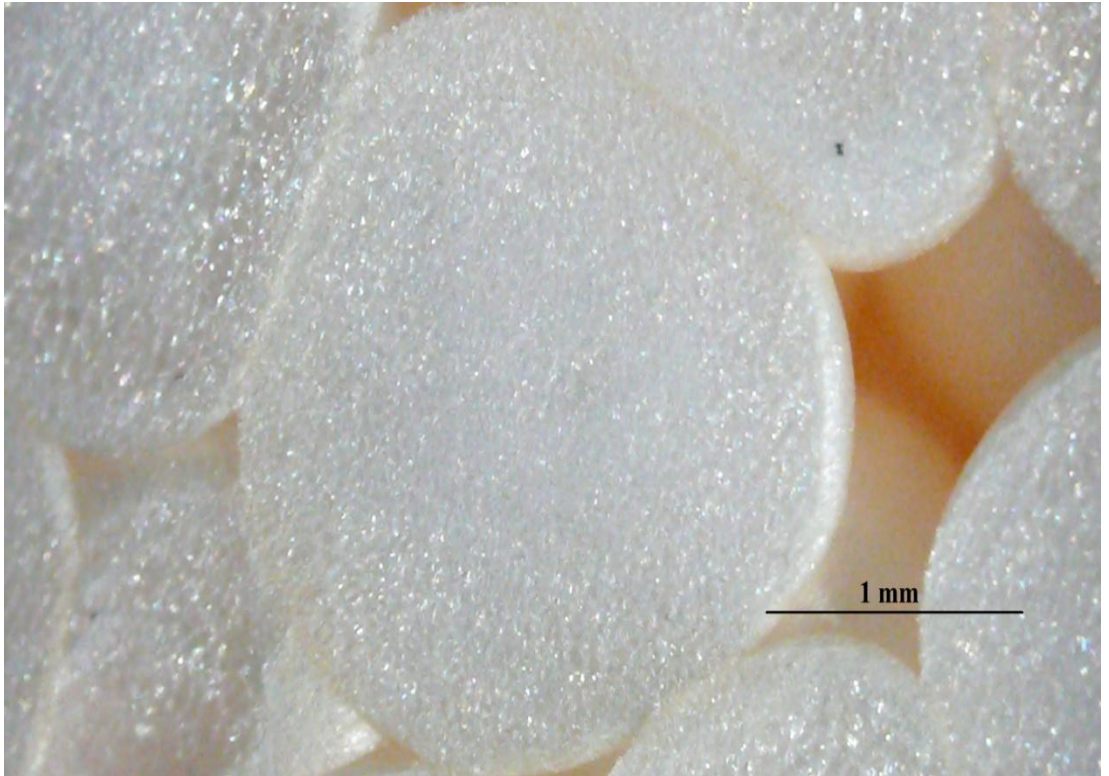
### A.1.Makro Yapılara Ait Işık Mikroskobu Görüntüleri



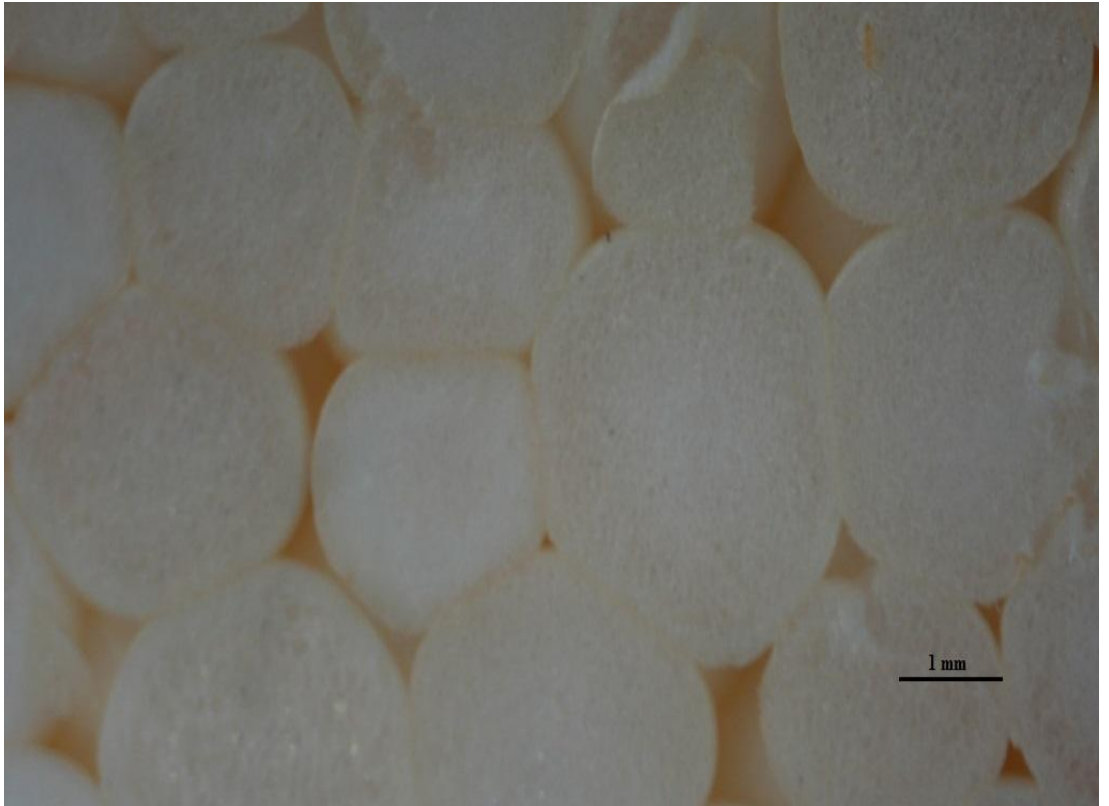
Şekil A.1.  $14 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluğa Sahip Karbon Takviyeli EPS'nin Makro Görüntüsü



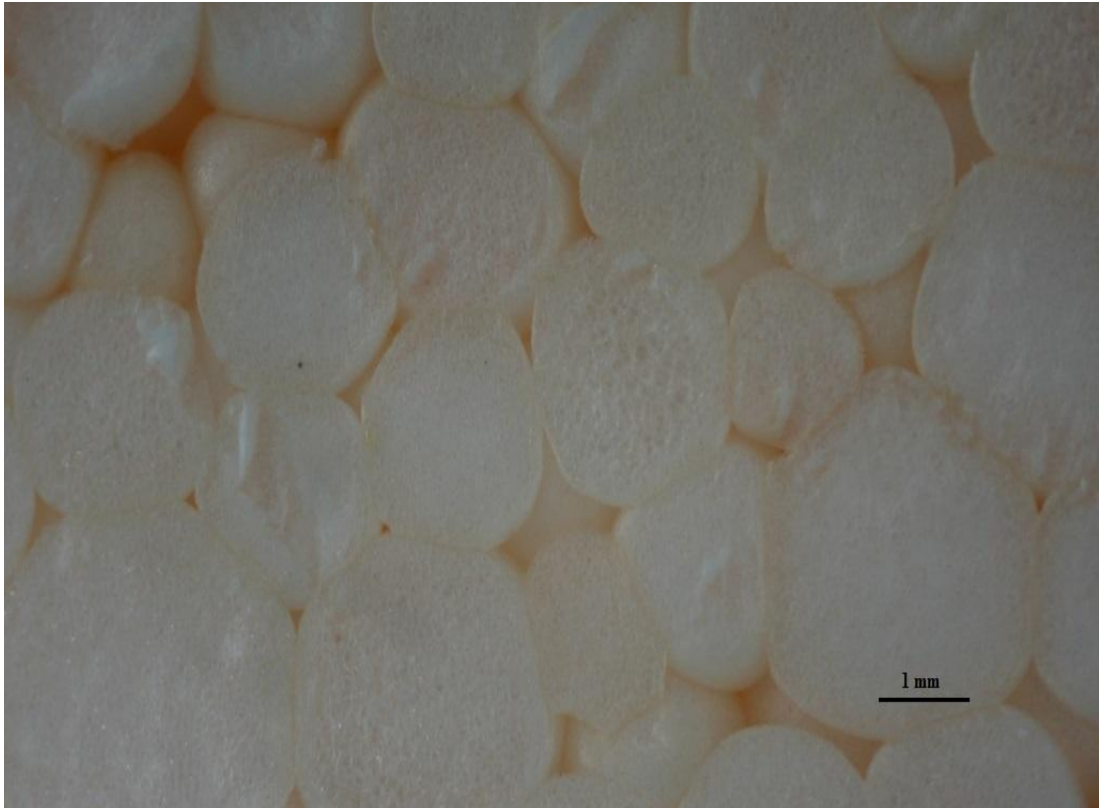
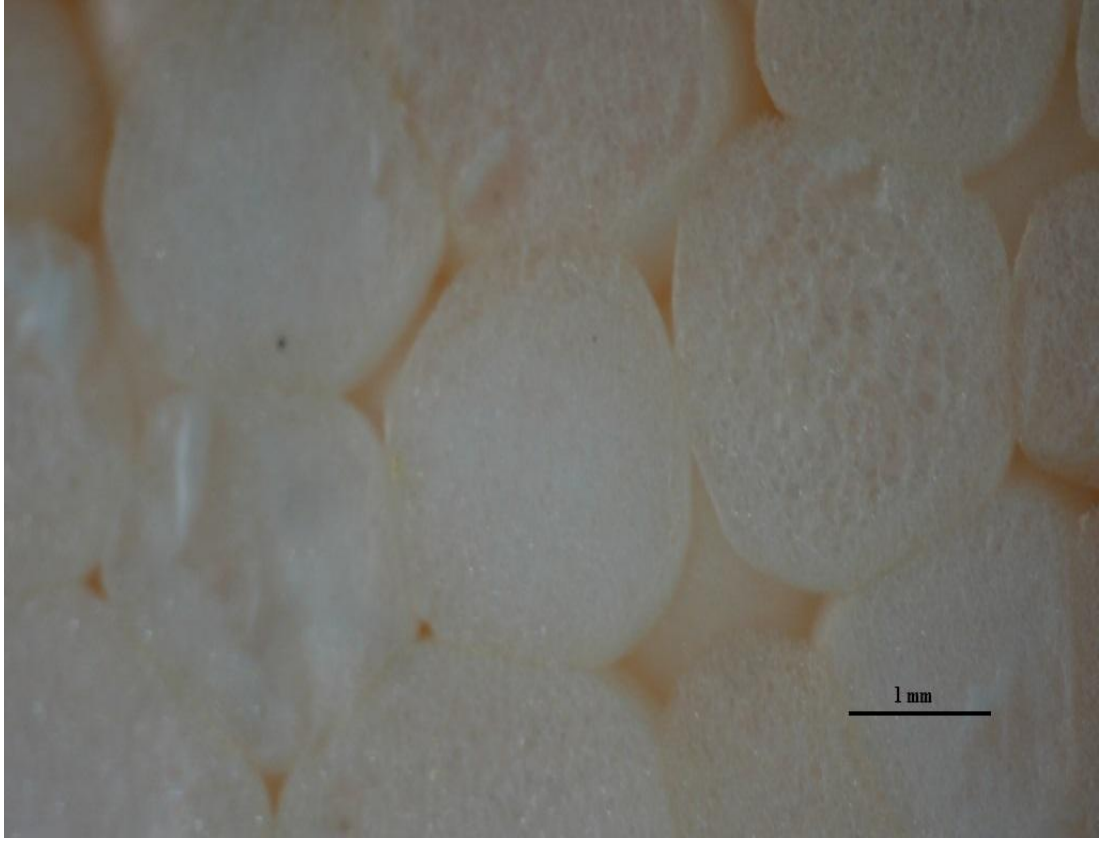
**Şekil A.2.**  $16 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü



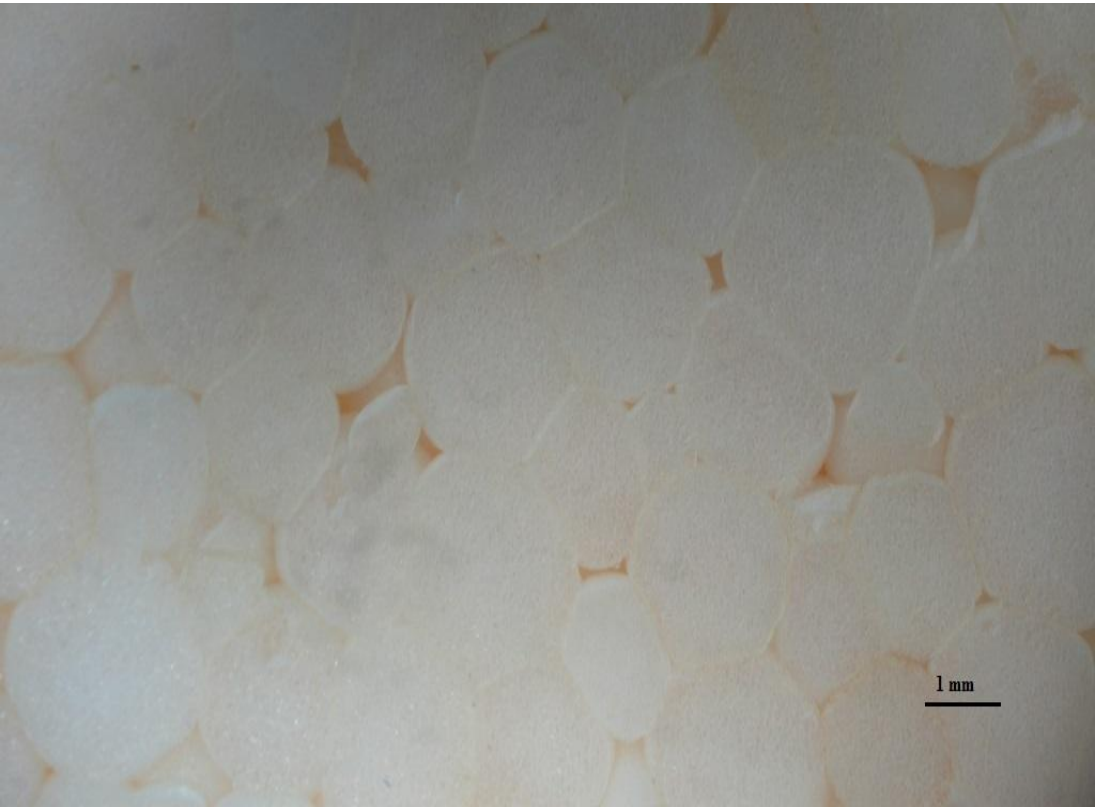
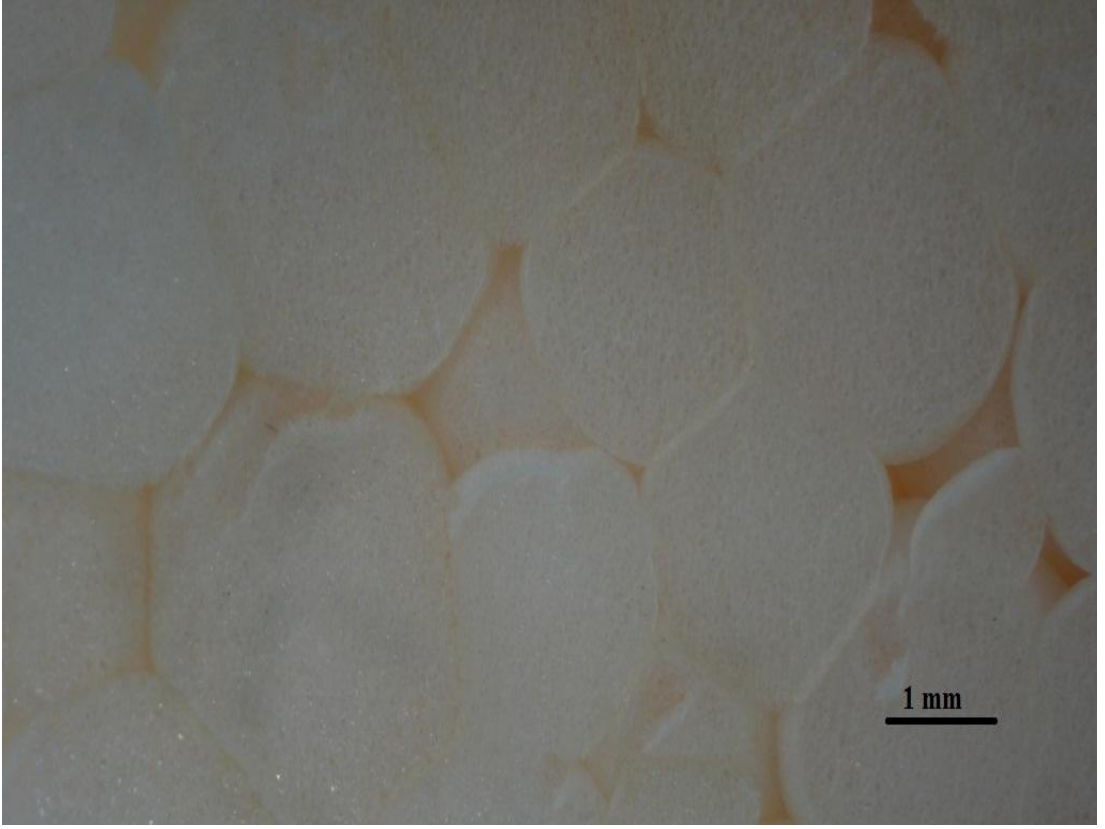
**Şekil A.3.**  $18 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü



**Şekil A.4.** 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü



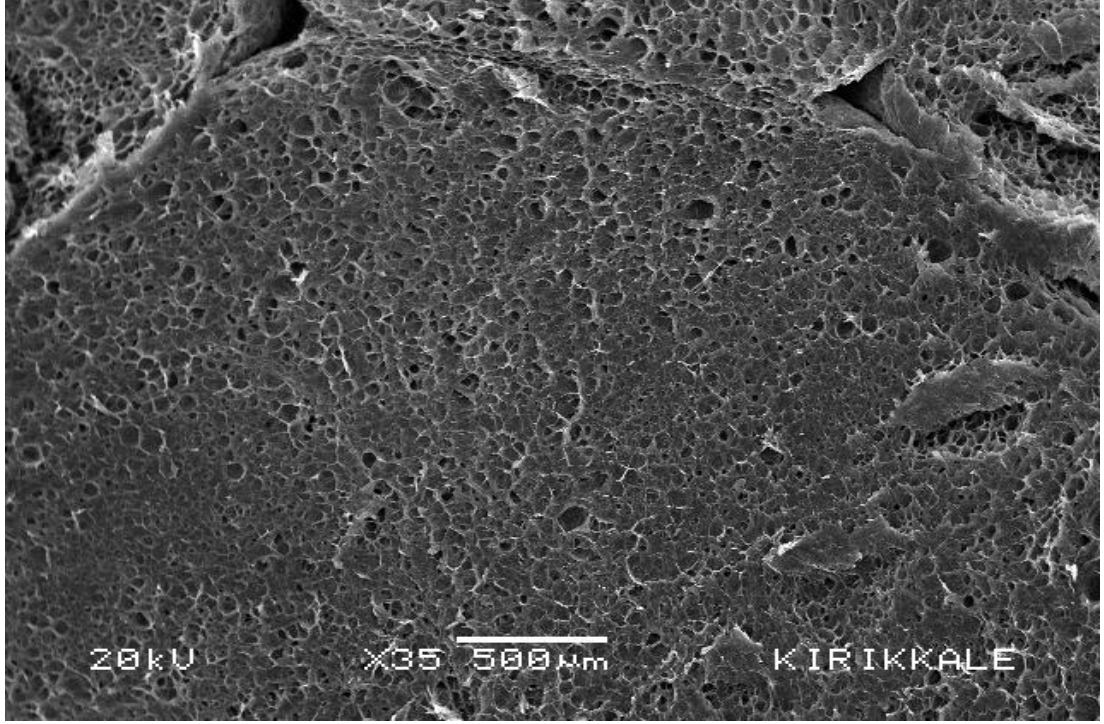
Şekil A.5. 24 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü



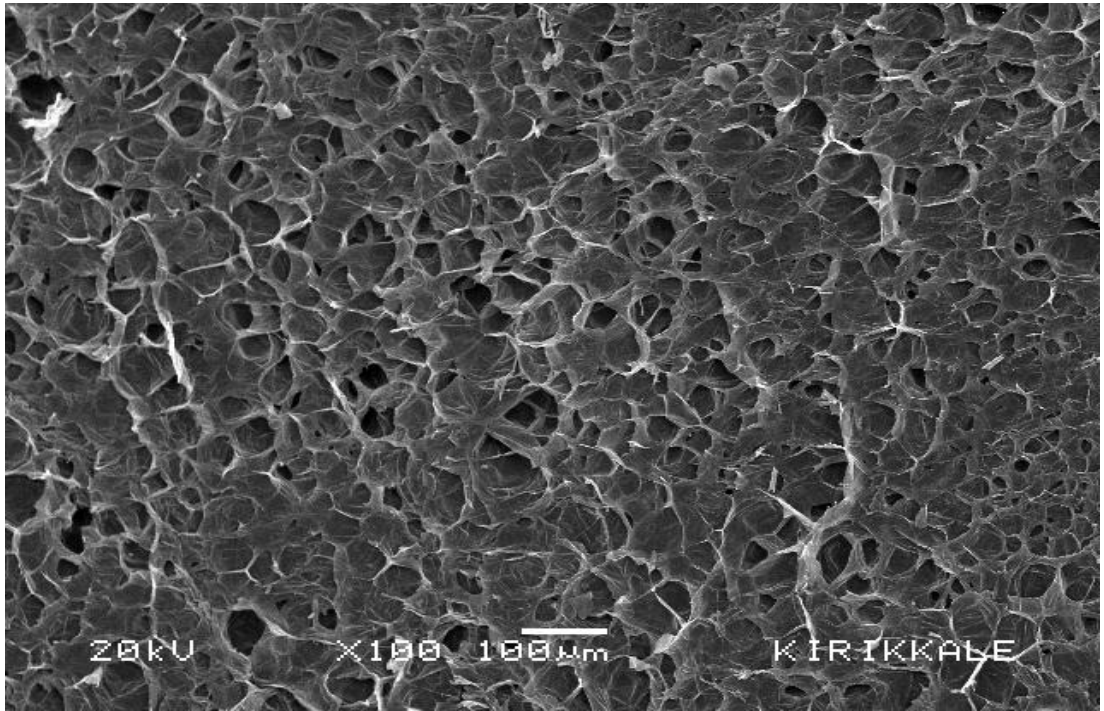
**Şekil A.6.**  $32 \text{ kg/m}^3$  Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntüsü



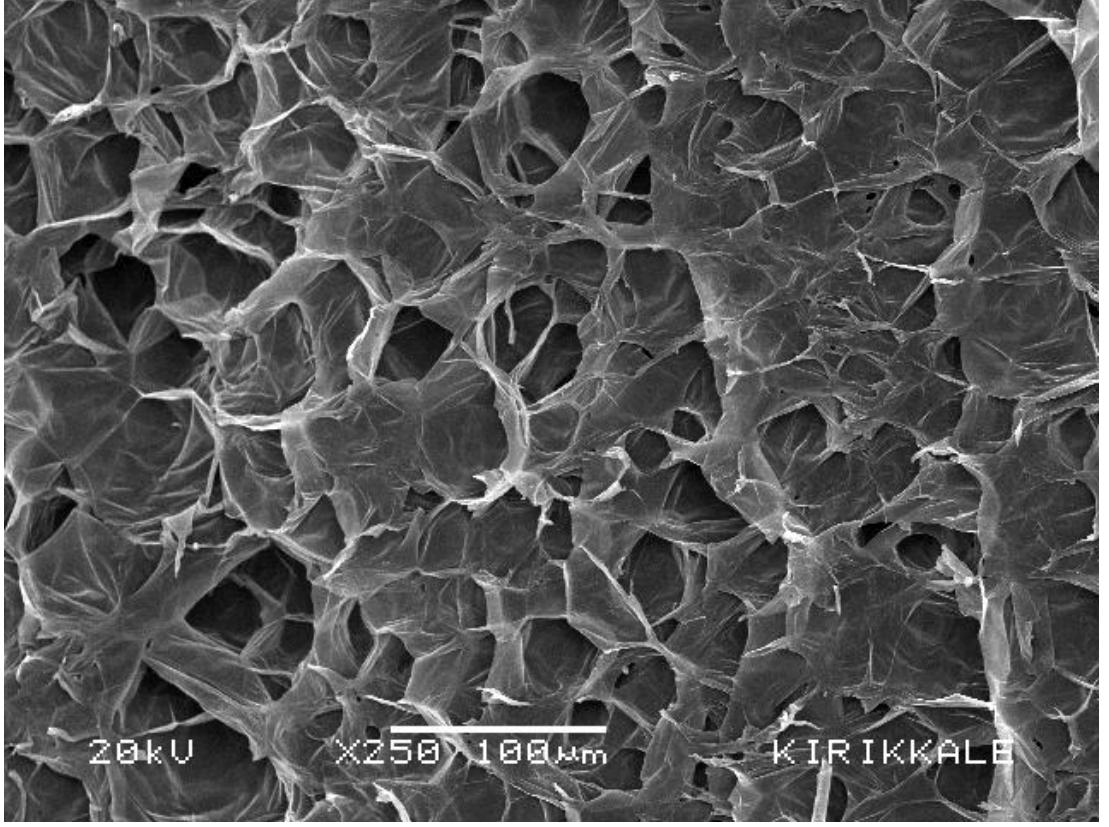
## B.1.Mikro Yapılara Ait Elektron Mikroskobu Görüntüleri



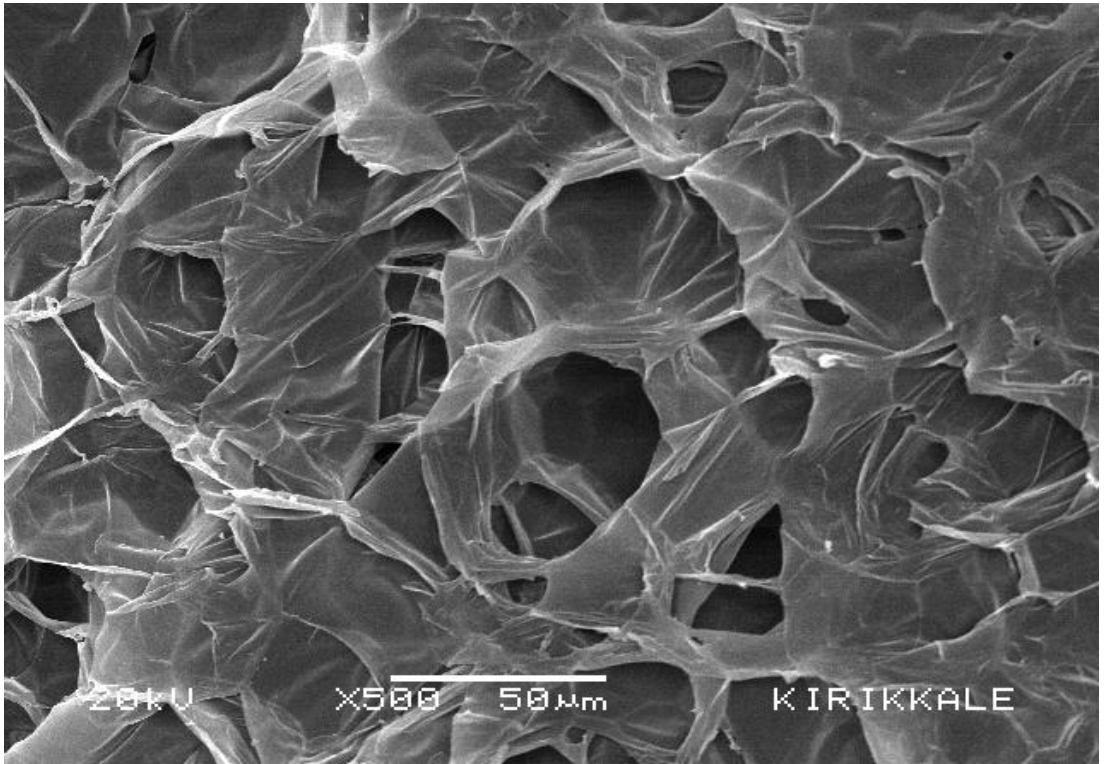
Şekil B.1. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X35 Mikro Görüntüsü



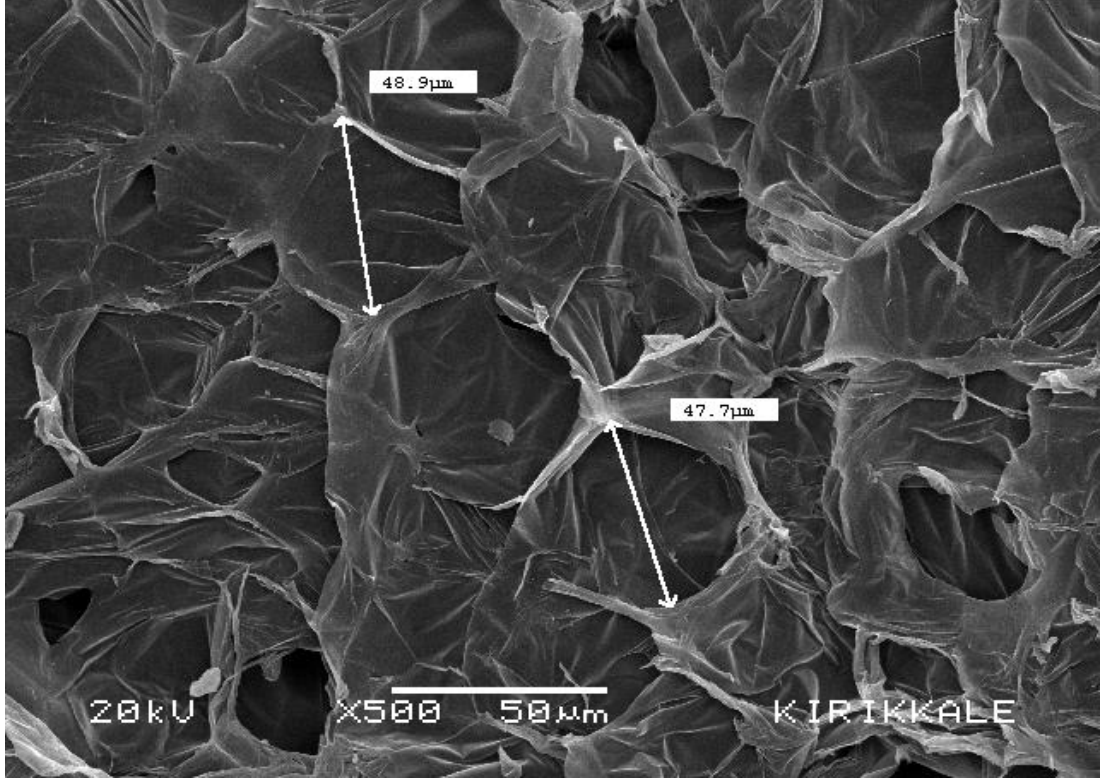
Şekil B.2. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü



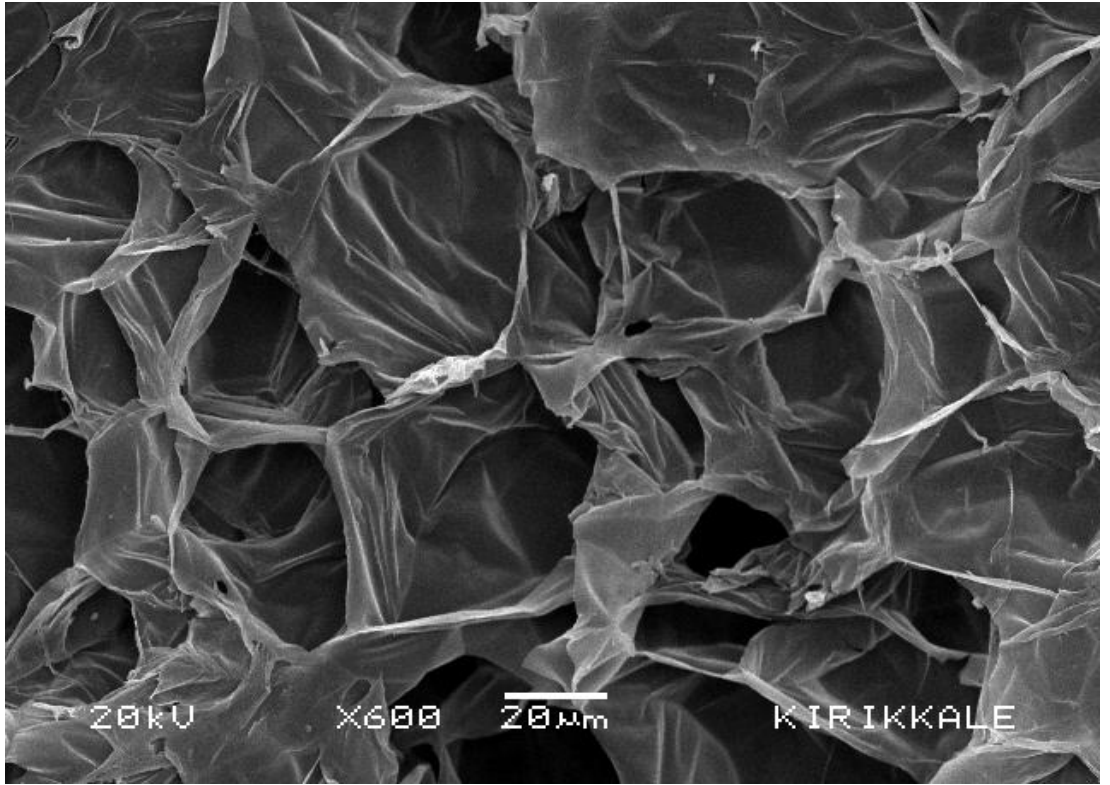
Şekil B.3. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü



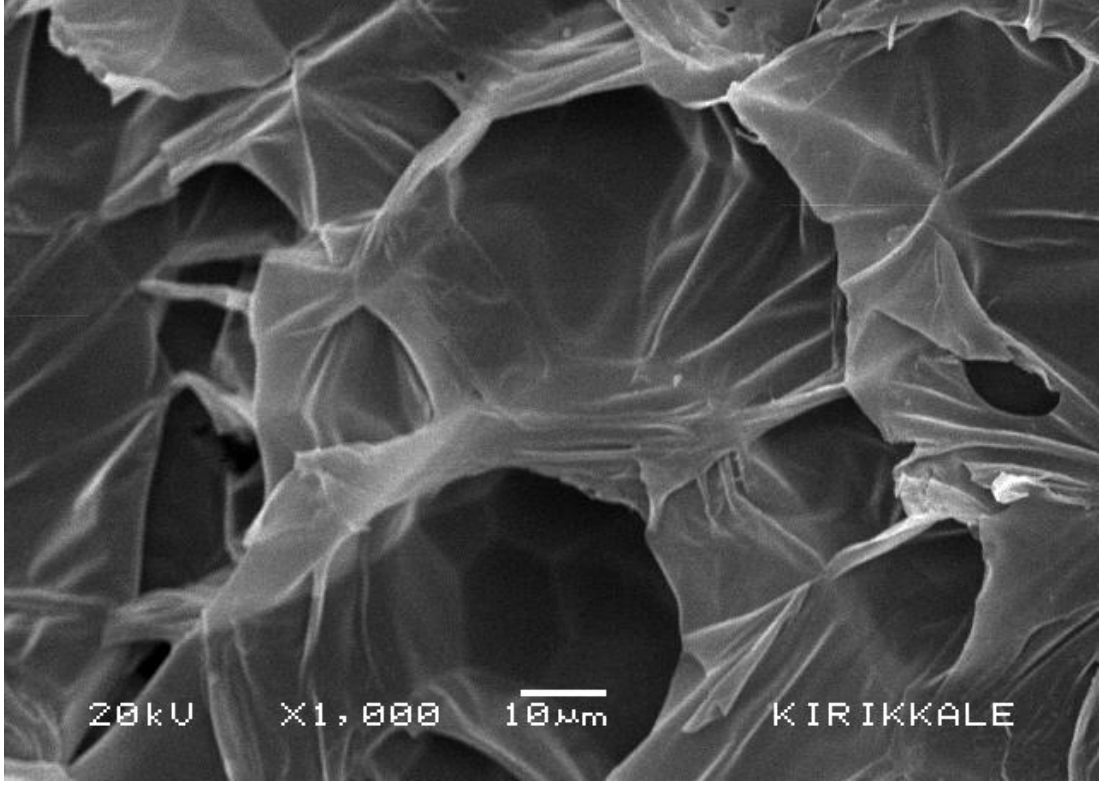
Şekil B.4. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü



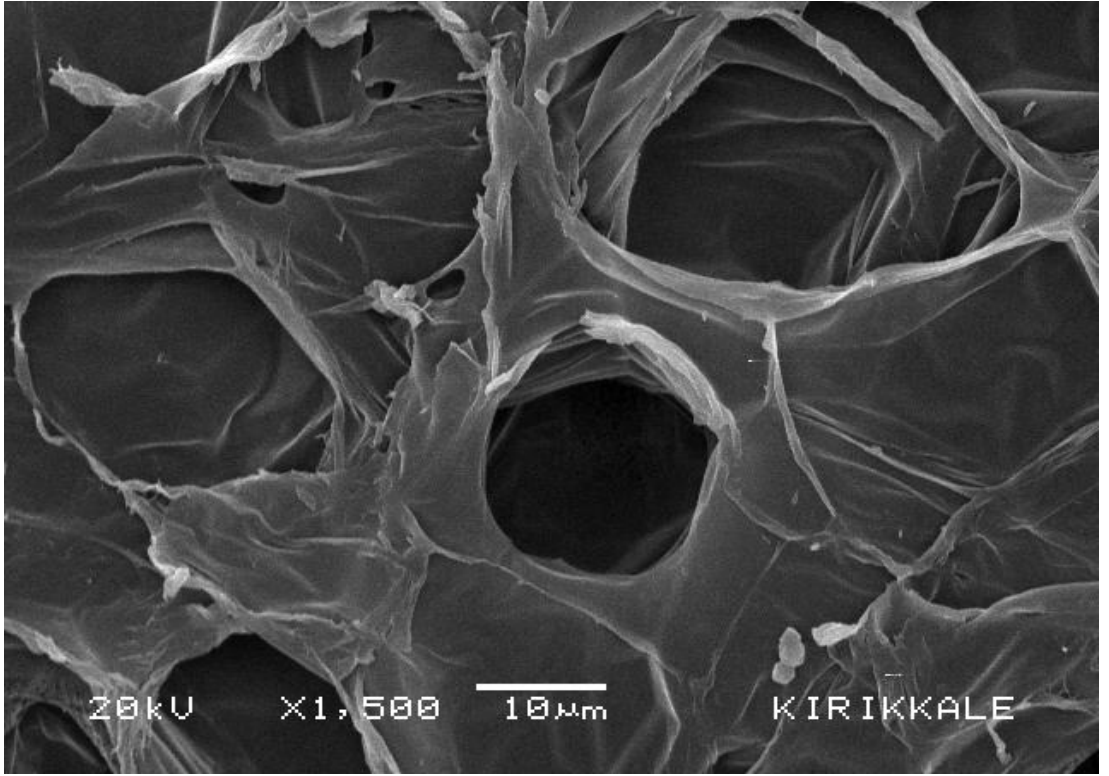
Şekil B.5. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü



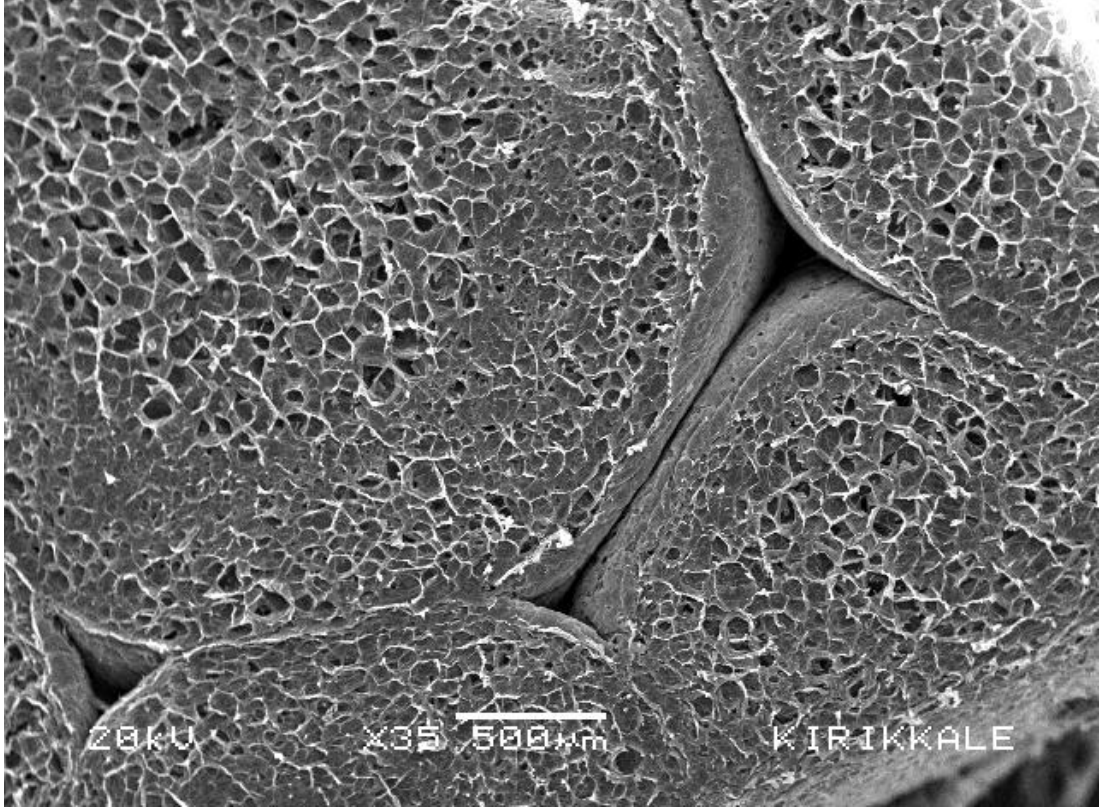
Şekil B.6. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X600 Mikro Görüntüsü



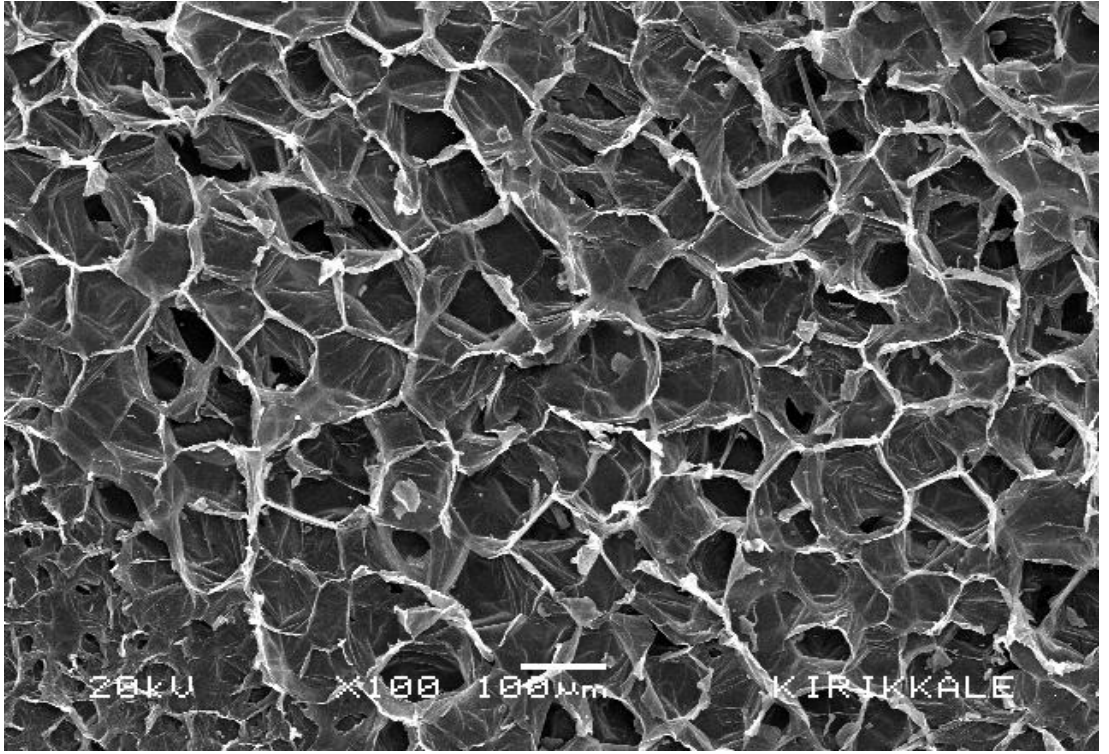
Şekil B.7. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1000 Mikro Görüntüsü



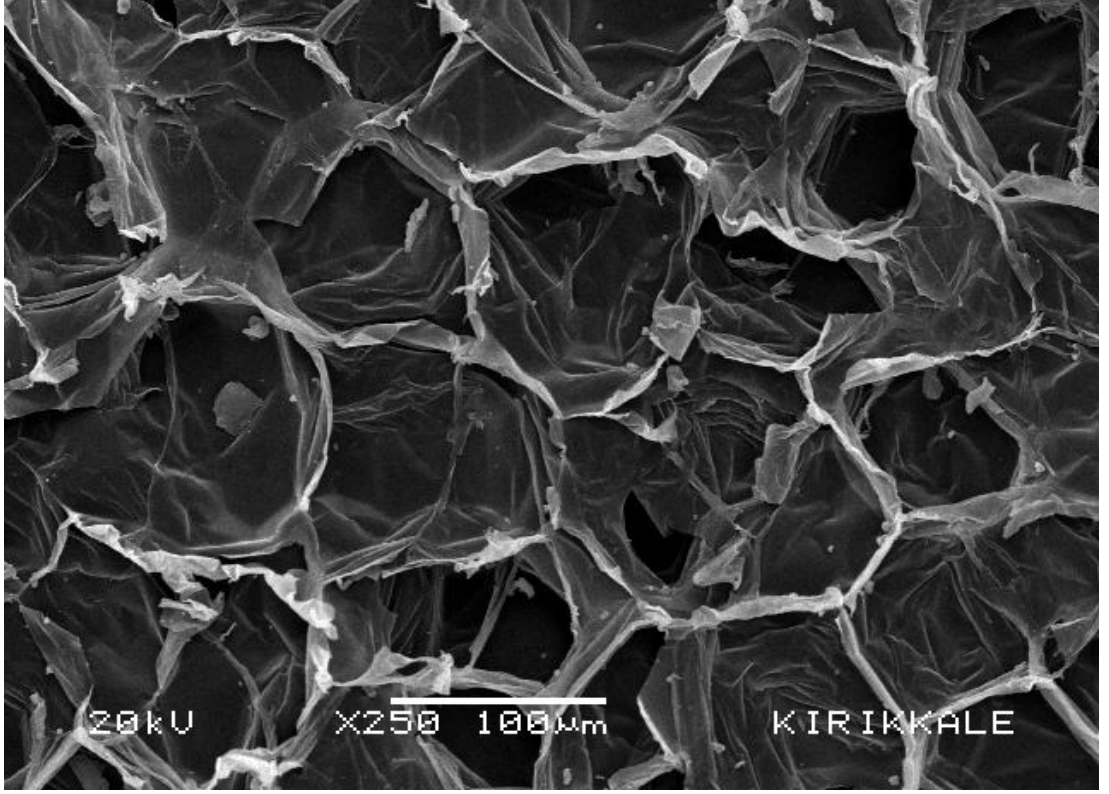
Şekil B.8. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü



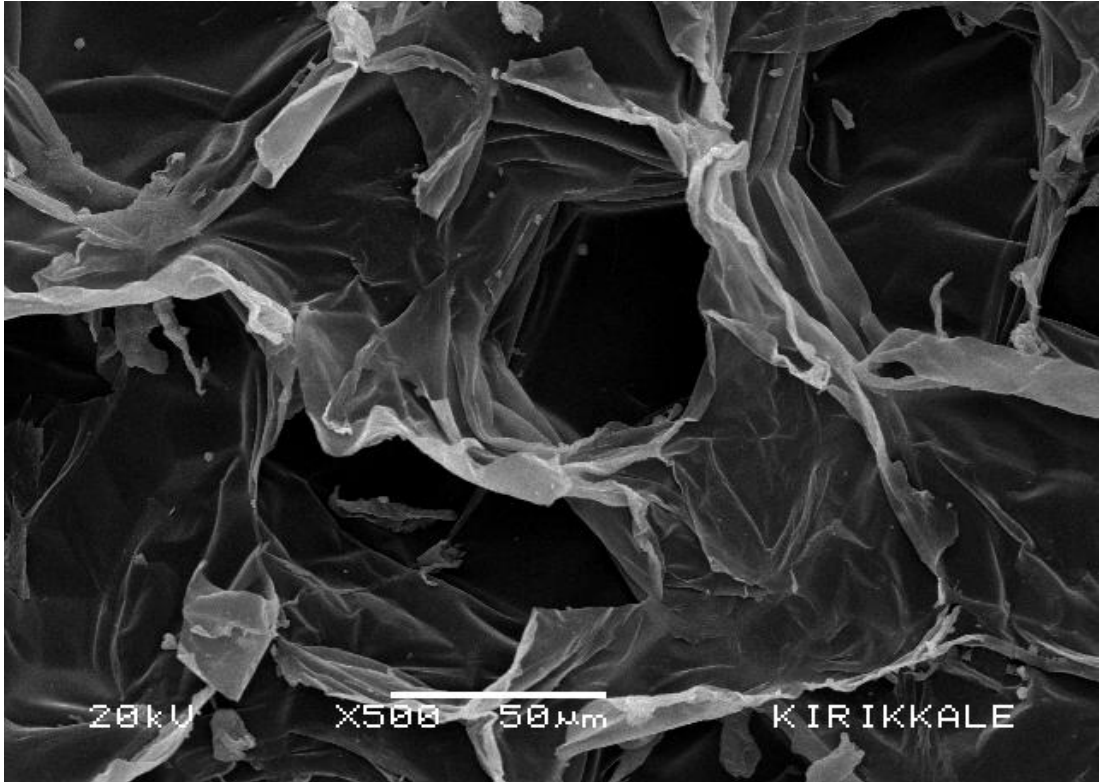
Şekil B.9. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X35 Mikro Görüntüsü



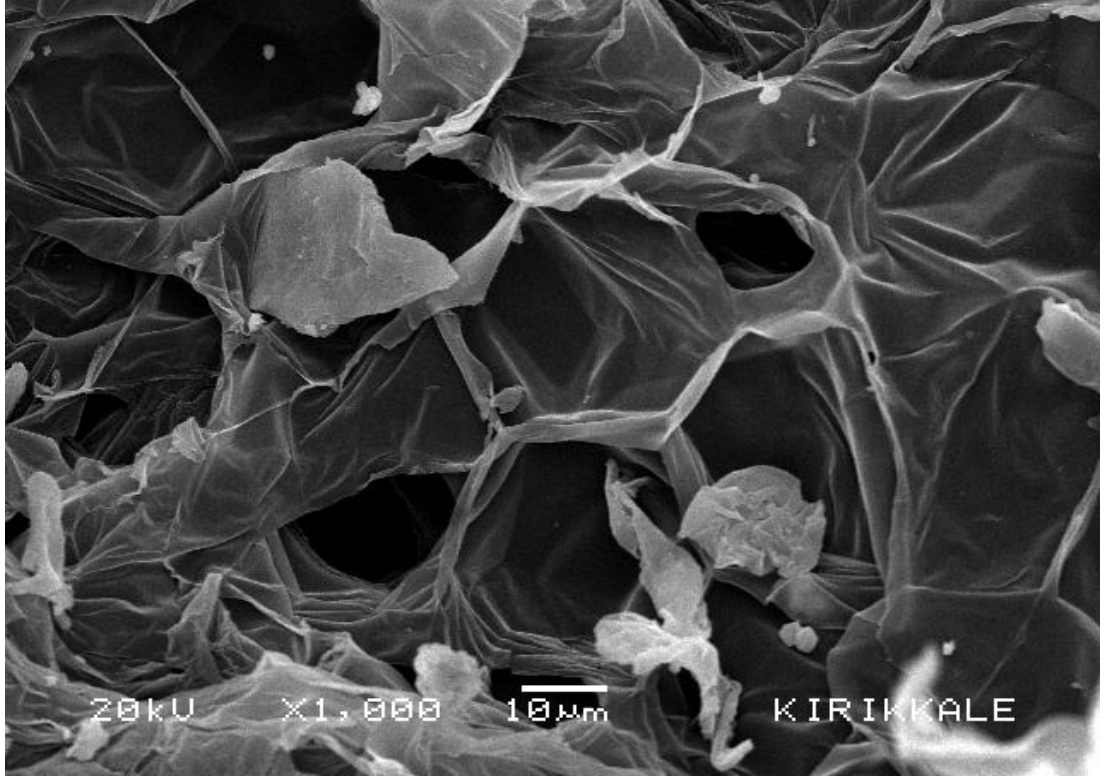
Şekil B.10. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü



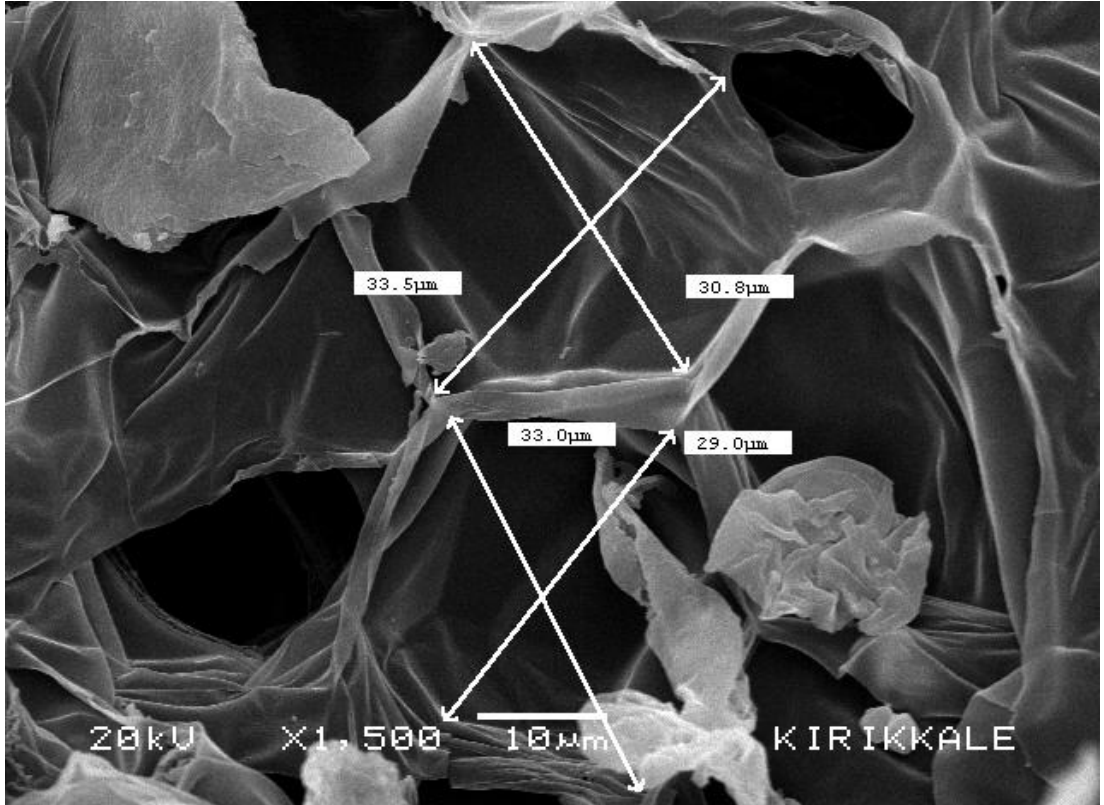
Şekil B.11. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü



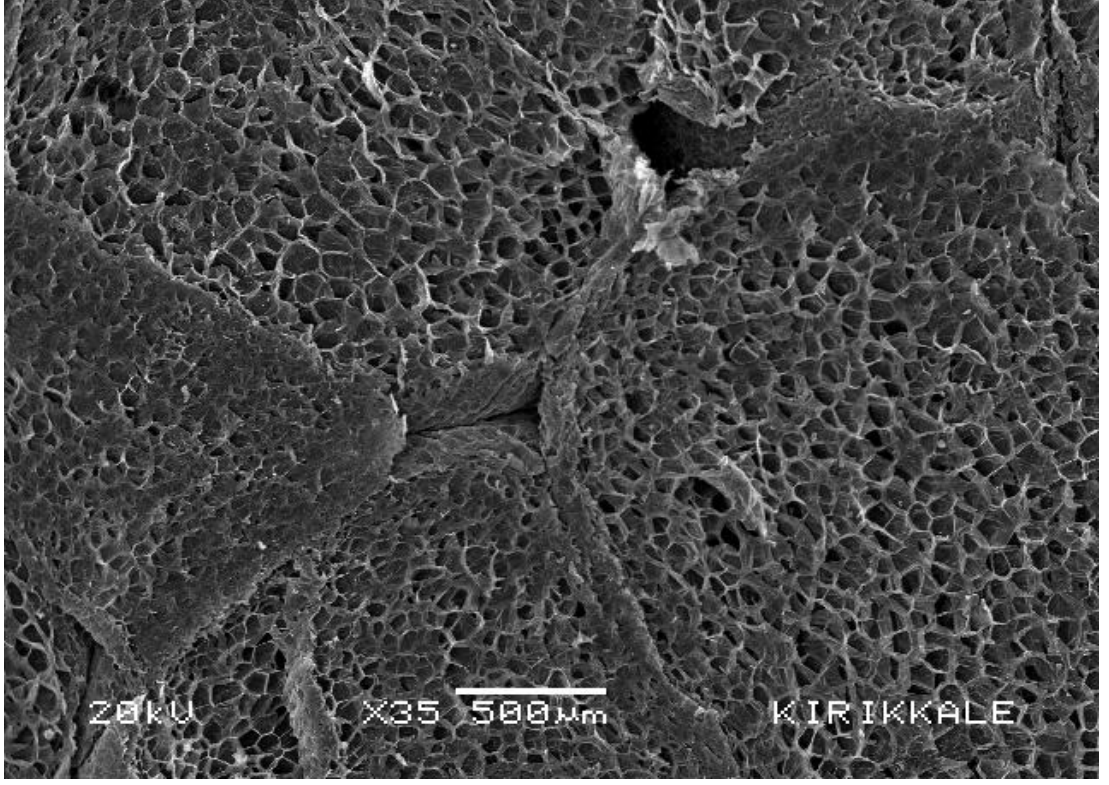
Şekil B.12. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü



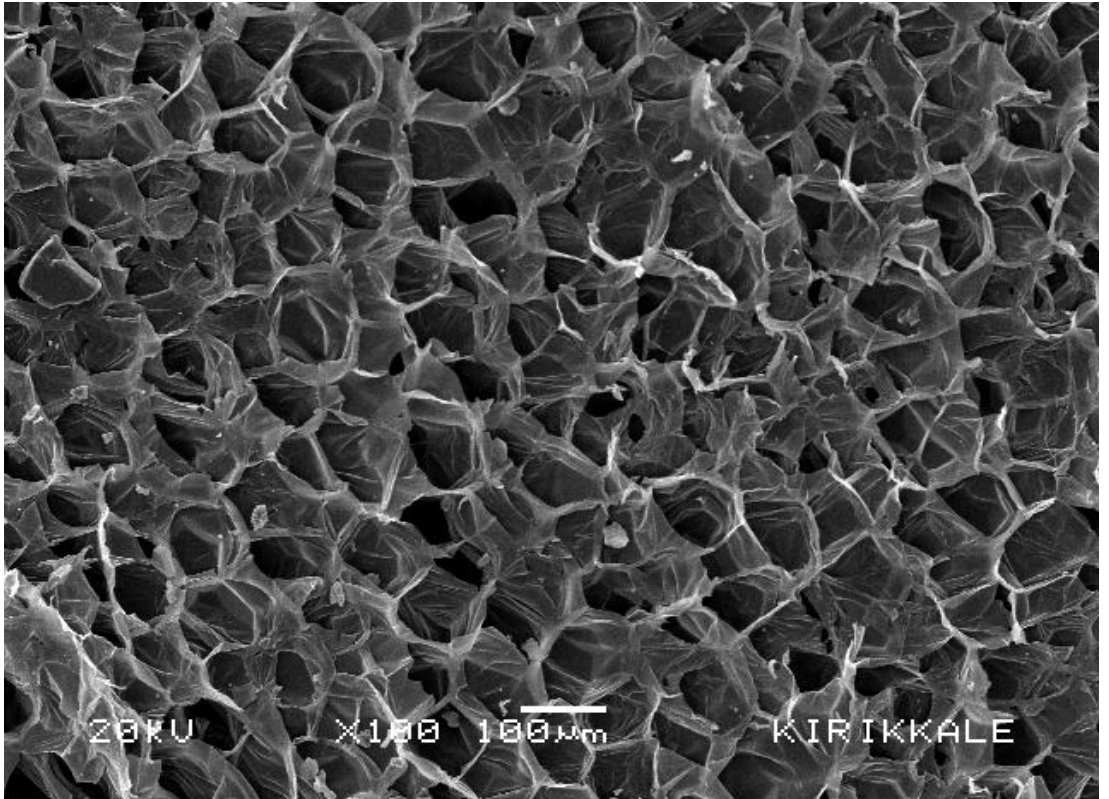
Şekil B.13. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1000 Mikro Görüntüsü



Şekil B.14. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü

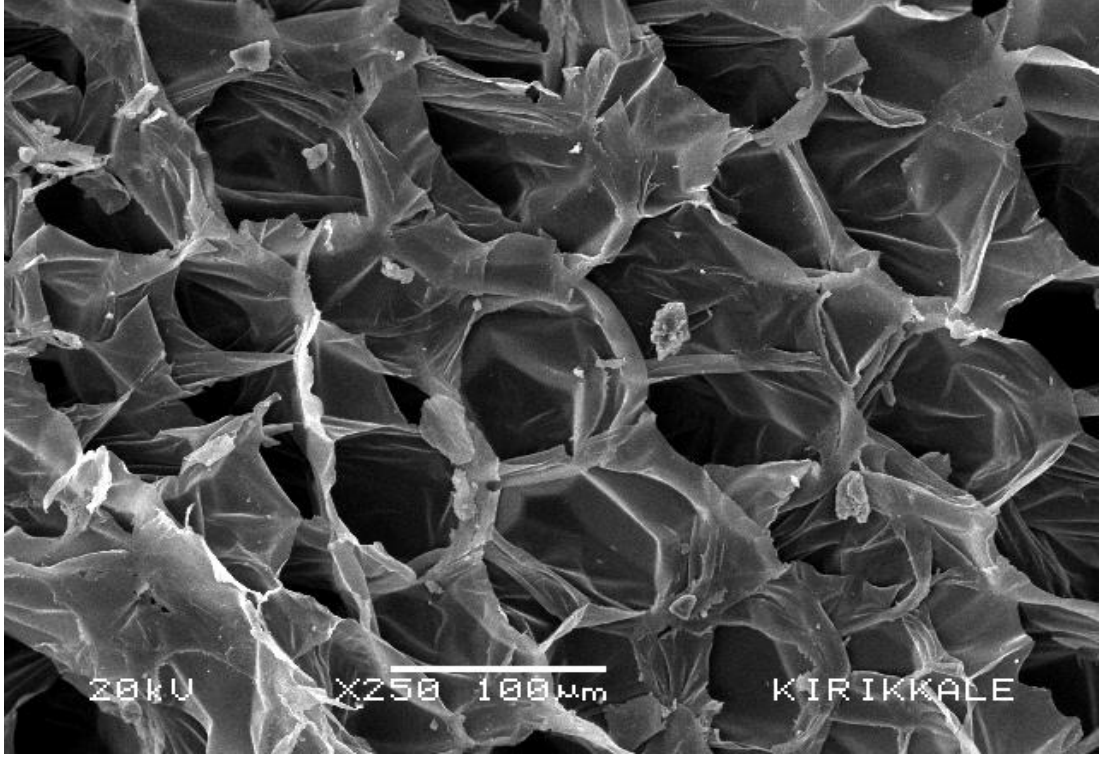


Şekil B.15. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X35 Mikro Görüntüsü

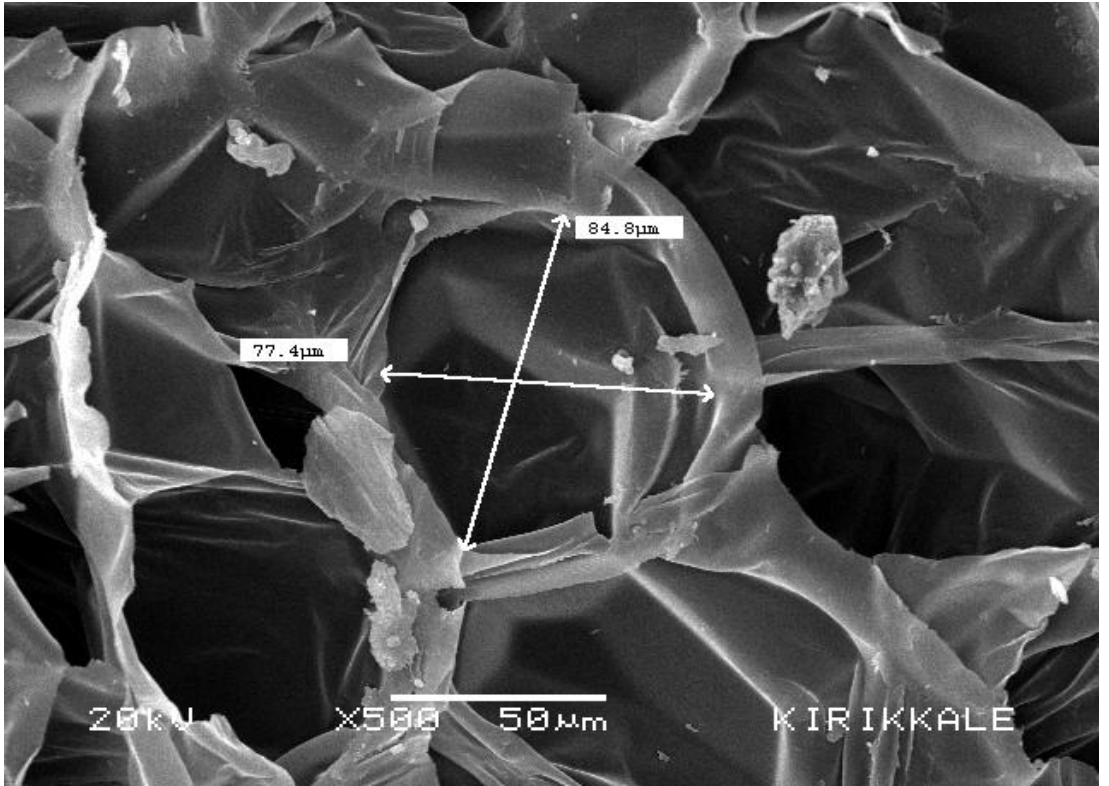


Şekil B.16. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X100 Mikro Görüntüsü

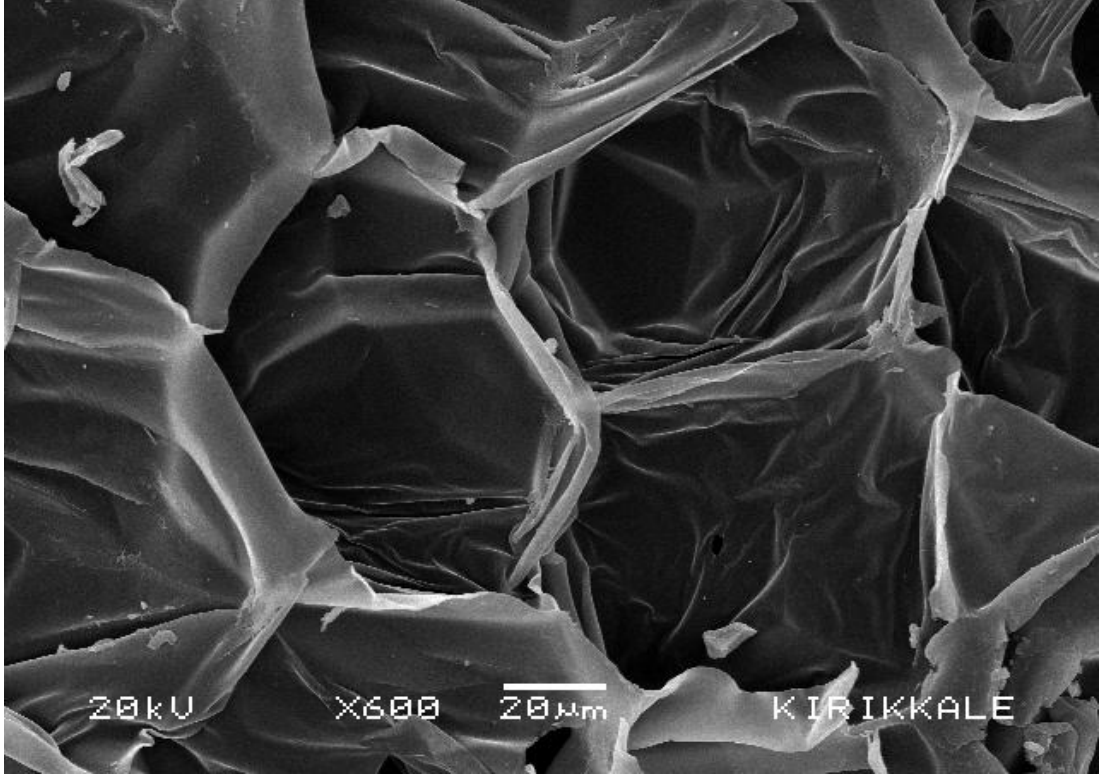




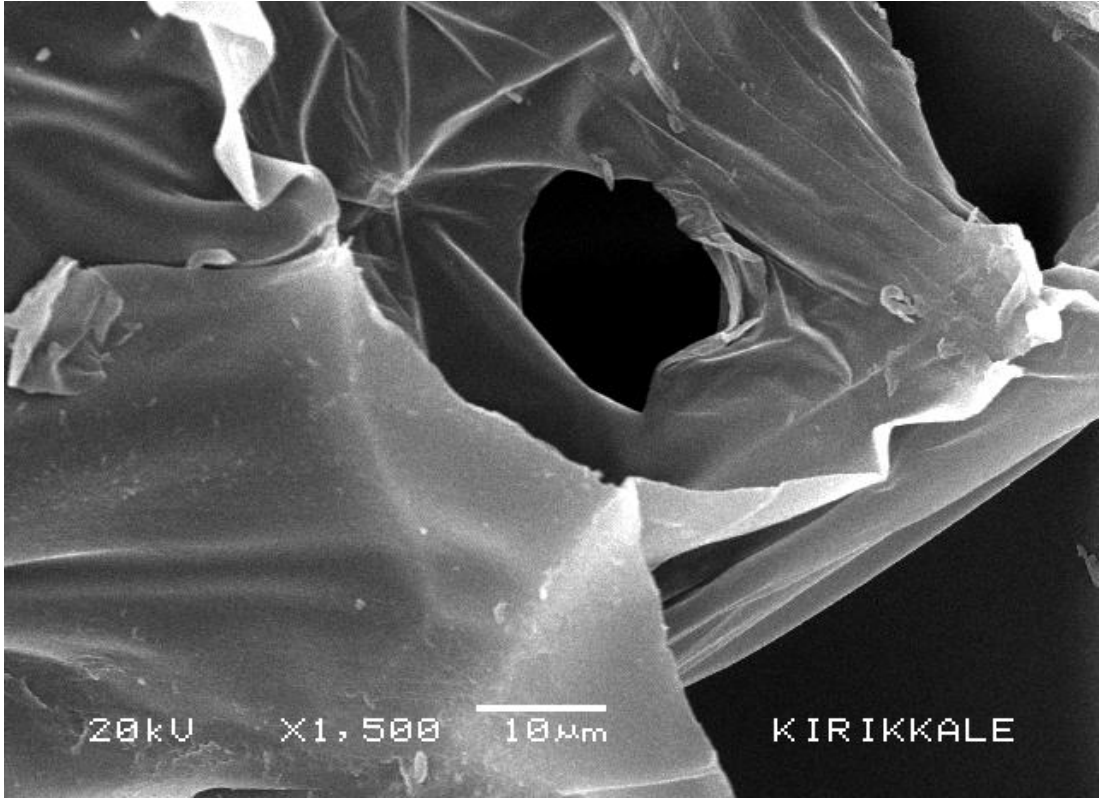
Şekil B.17. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X250 Mikro Görüntüsü



Şekil B.18. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X500 Mikro Görüntüsü



Şekil B.19. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X600 Mikro Görüntüsü

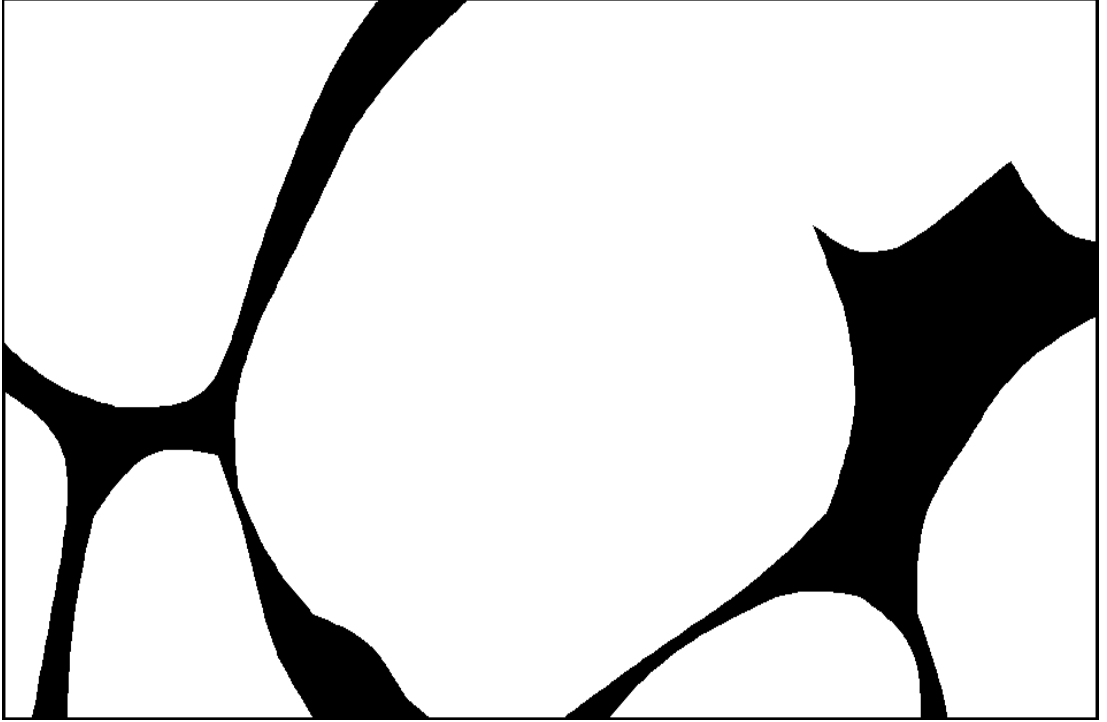


Şekil B.20. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü

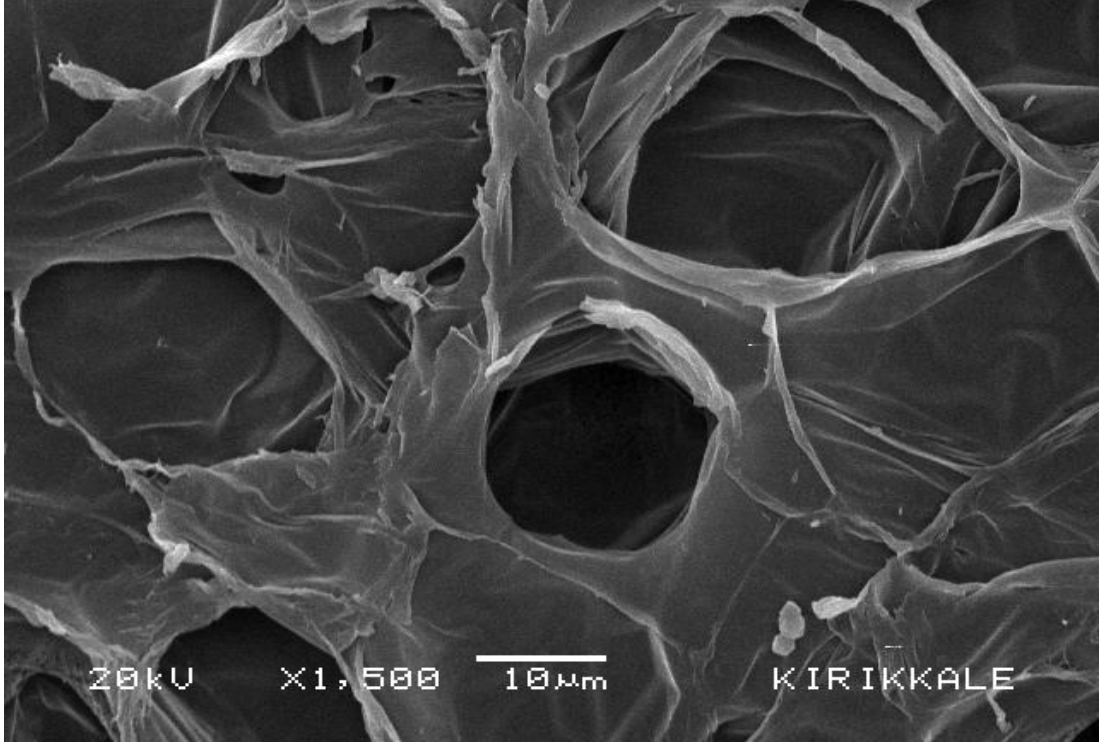
## C.1.Görüntü Analizi İle Gözeneklilik Tespiti Ve Gambit Modelleri



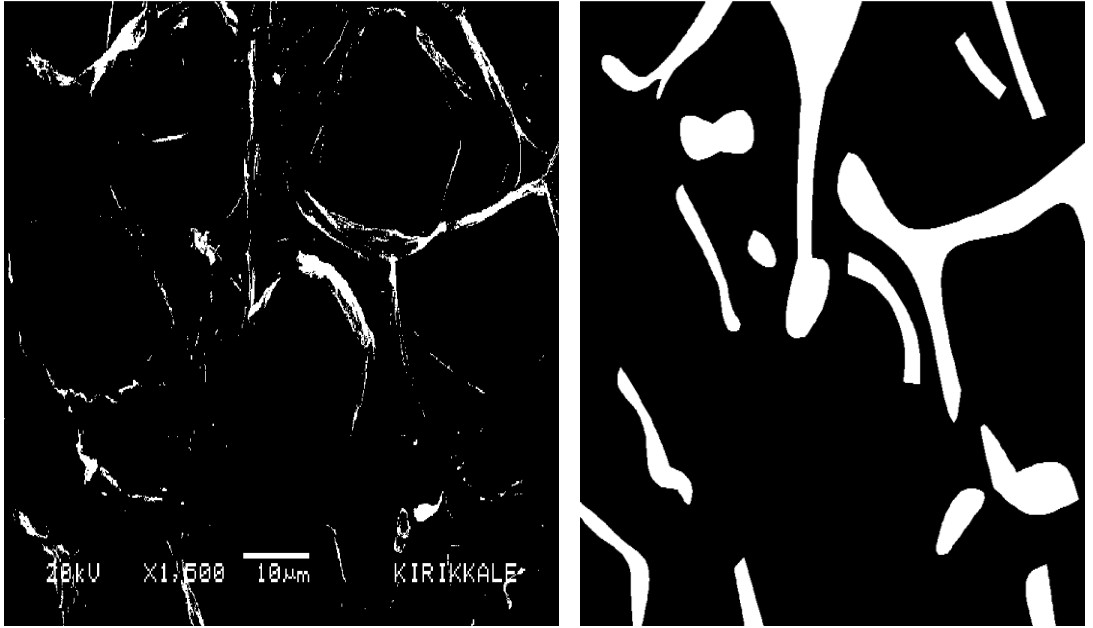
Şekil C.1. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntü Analizi



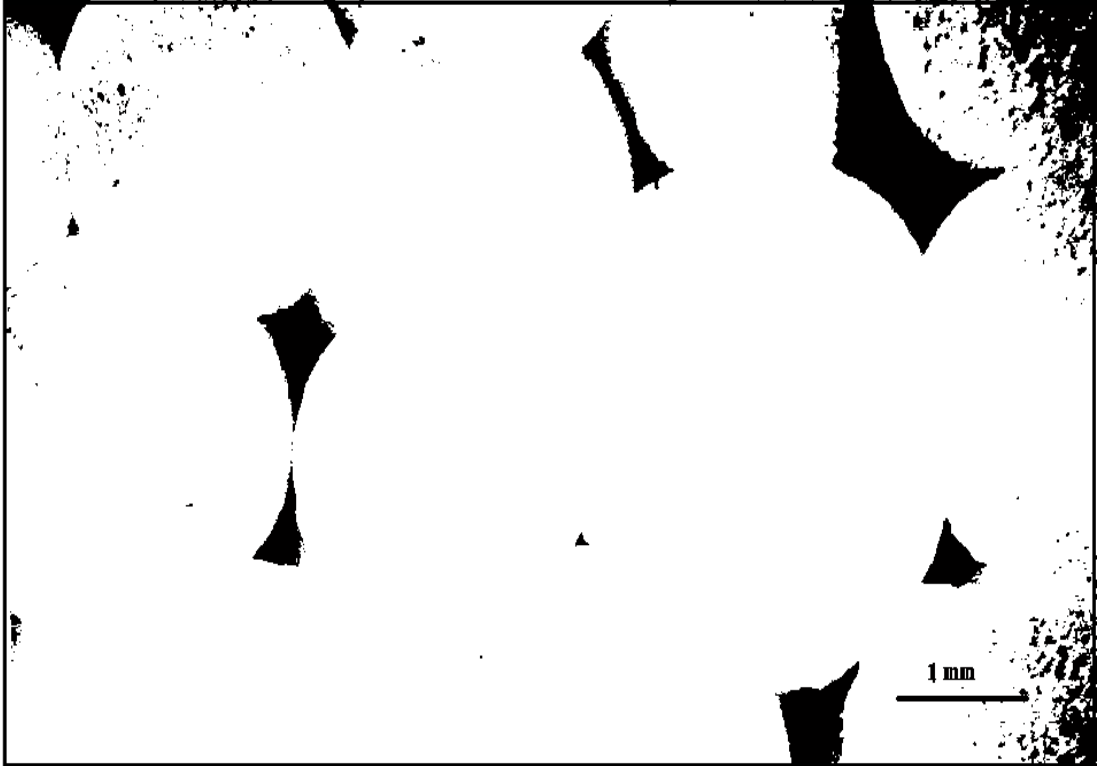
Şekil C.2. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Gambit Modeli



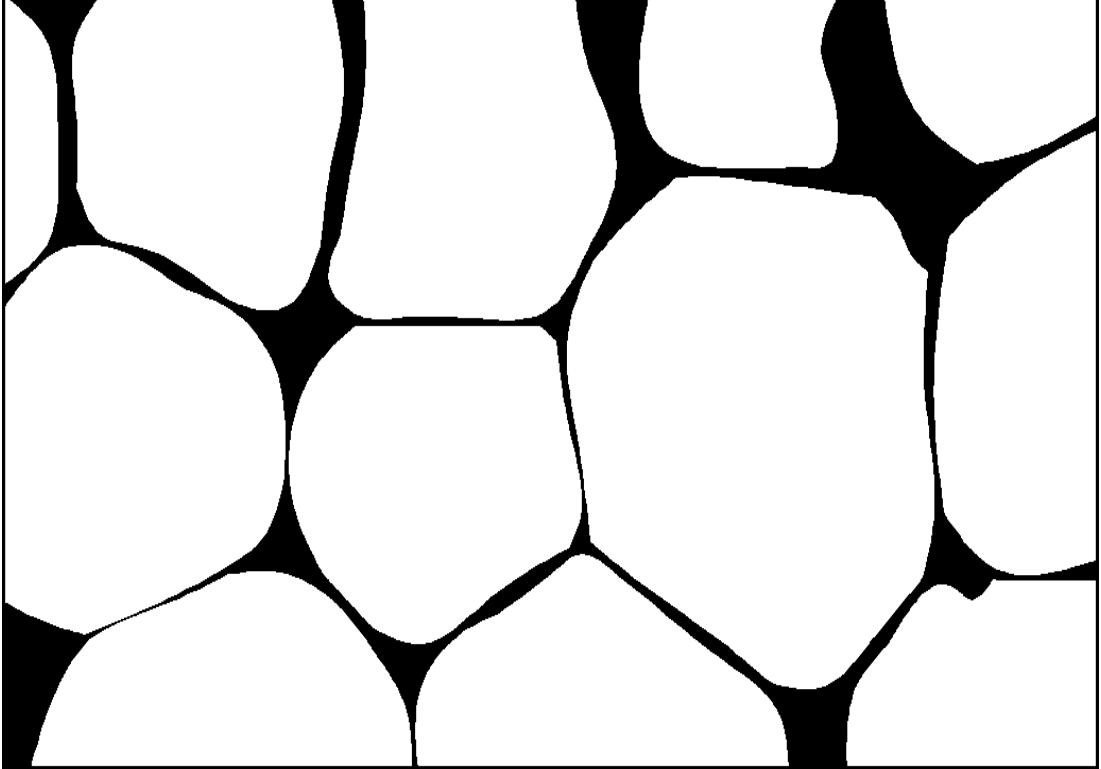
Şekil C.3. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü



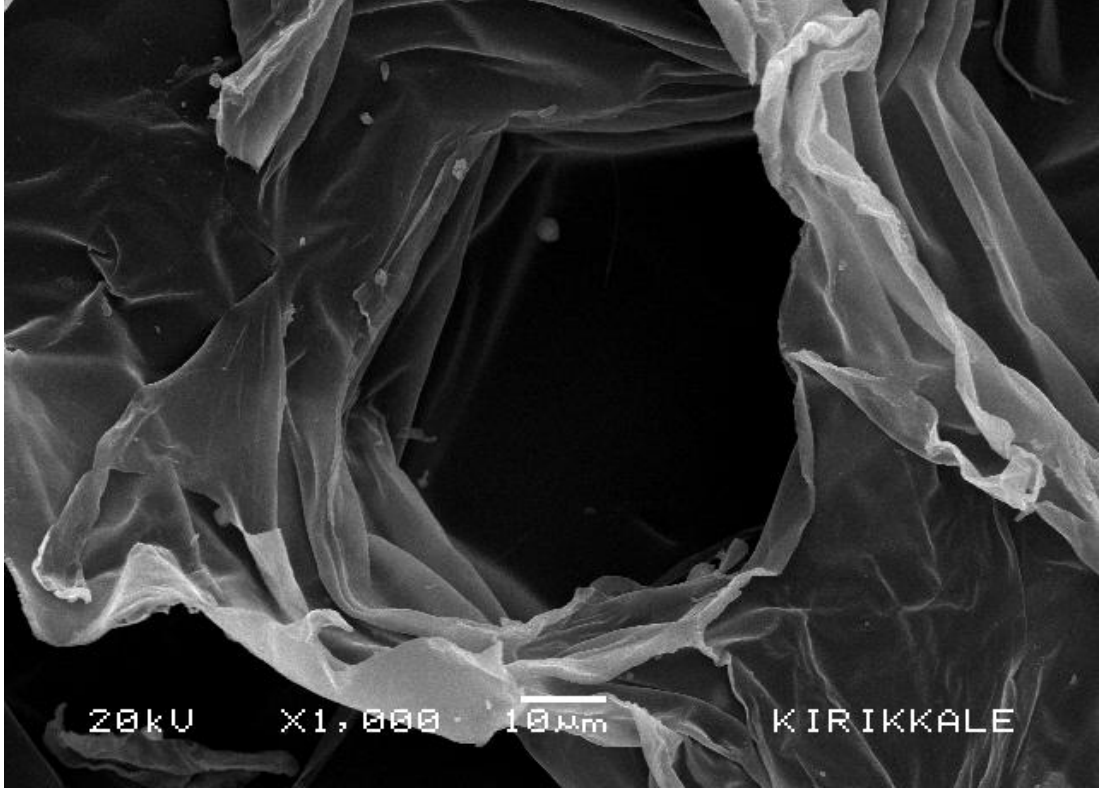
Şekil C.4. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Mikro Görüntü Analizi ve Gambit Modeli



Şekil C.5. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntü Analizi



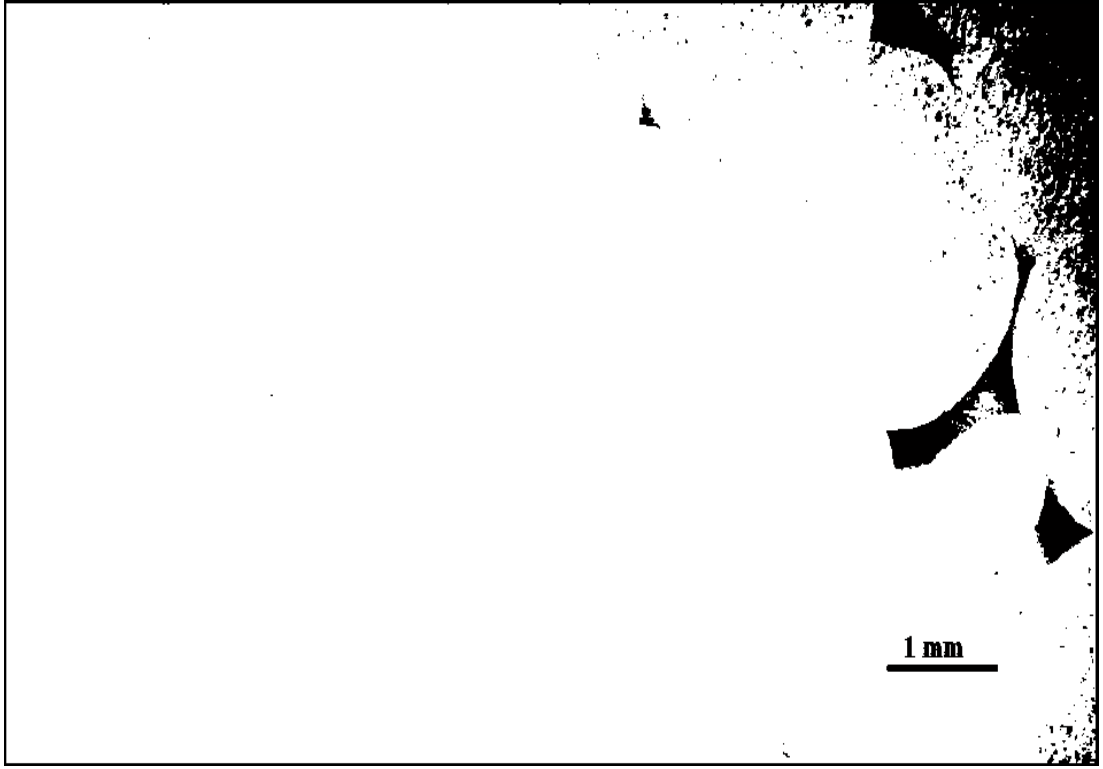
Şekil C.6. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Gambit Modeli



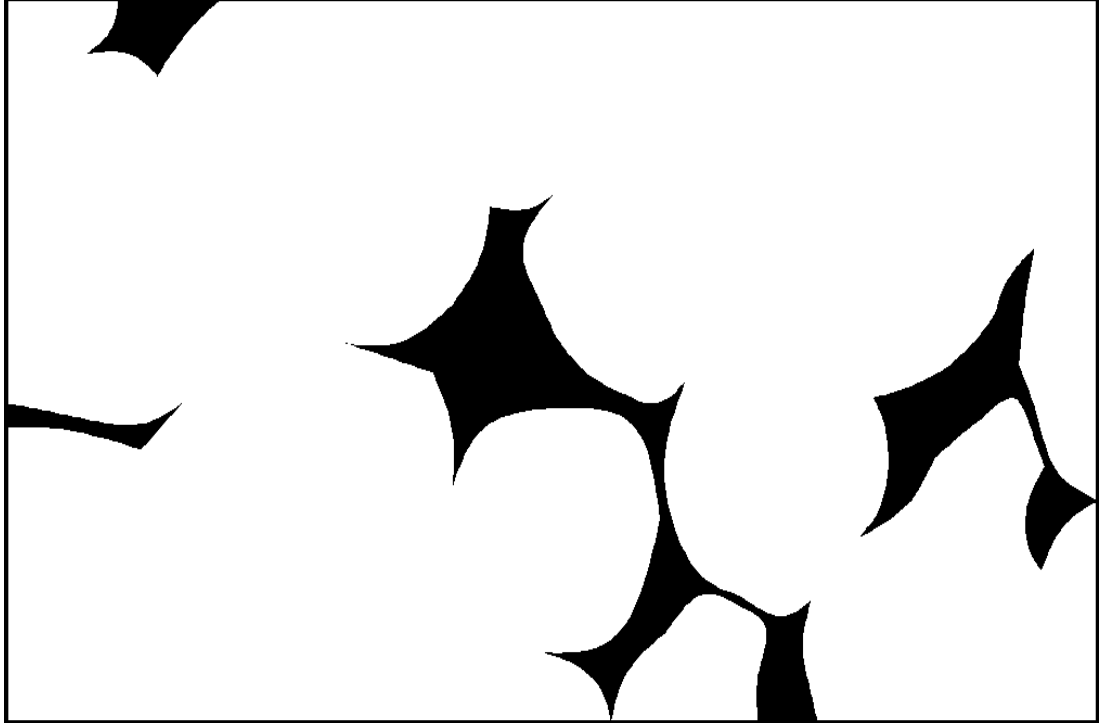
Şekil C.7. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1000 Mikro Görüntüsü



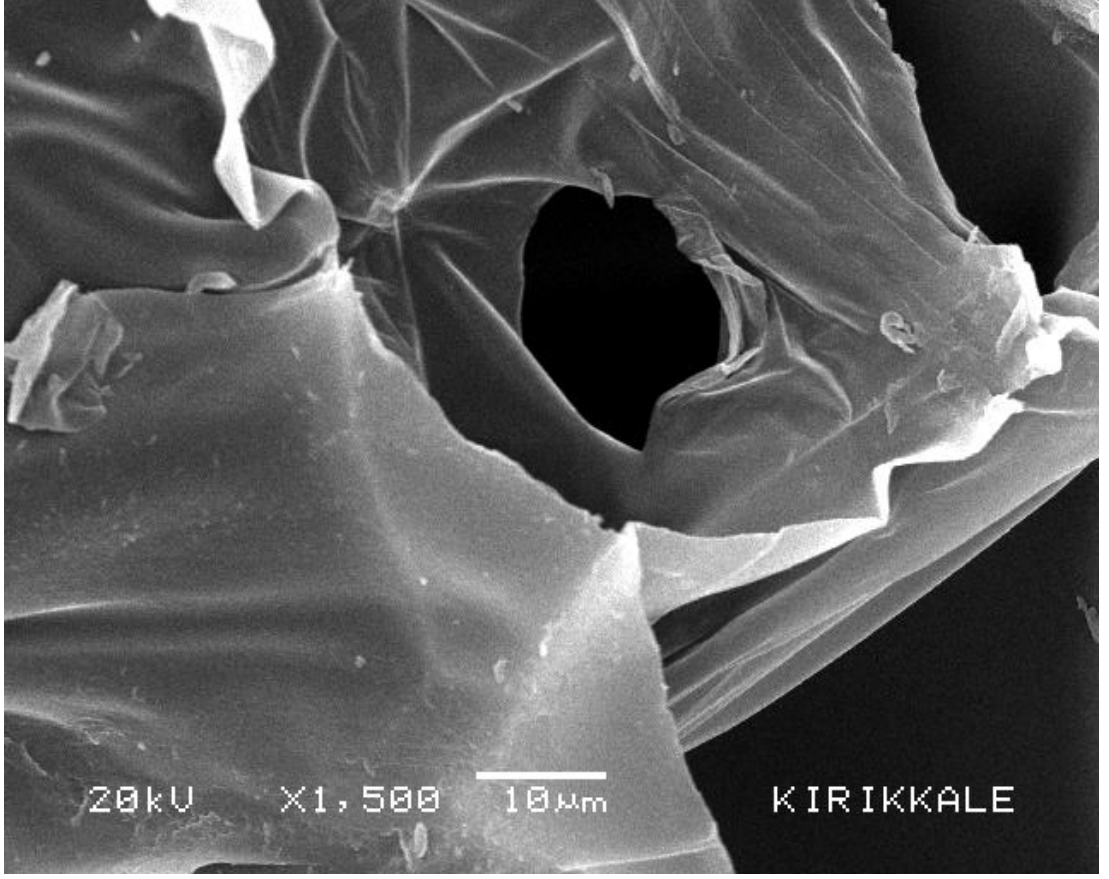
Şekil C.8. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Mikro Görüntü Analizi ve Gambit Modeli



**Şekil C.9.** 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Makro Görüntü Analizi



**Şekil C.10.** 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Gambit Modeli



Şekil C.11. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin X1500 Mikro Görüntüsü



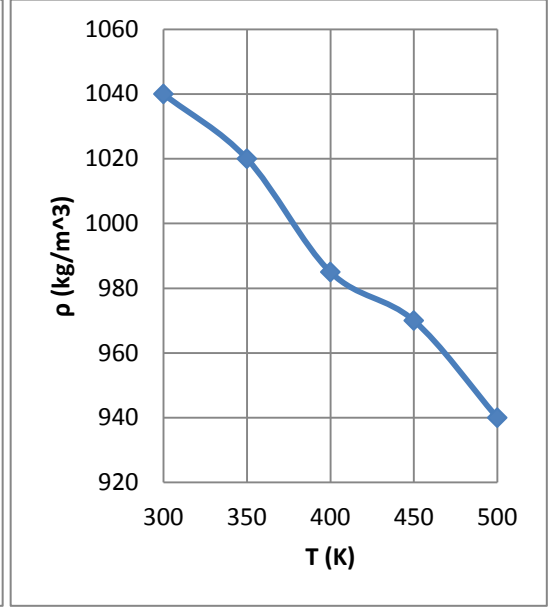
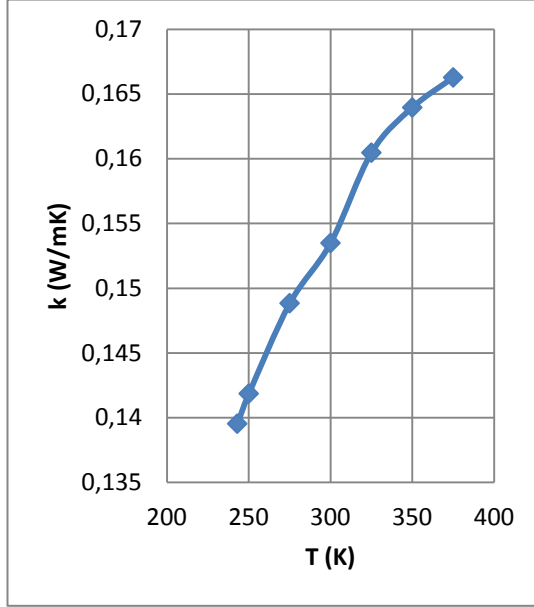
Şekil C.12. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Mikro Görüntü Analizi ve Gambit Modeli



### D.1.Havanın Termofiziksel Özellikleri [52]

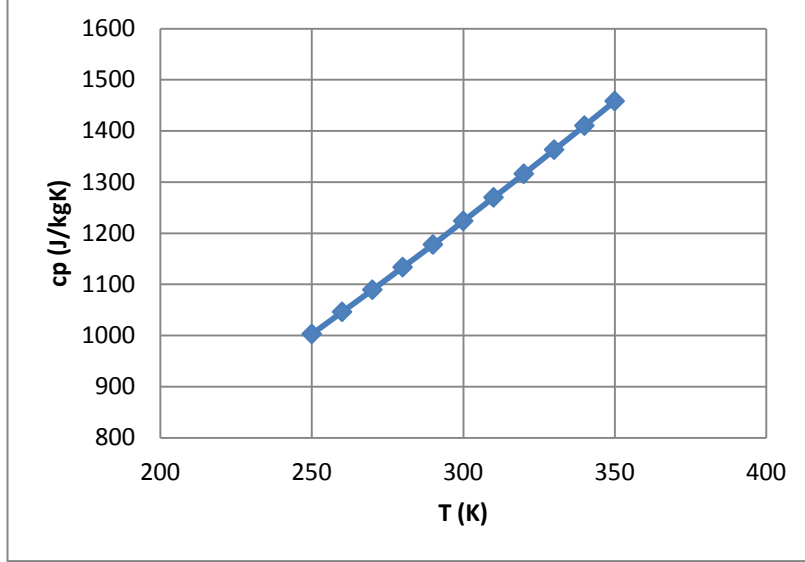
<b>T</b> <b>(K)</b>	<b><math>\rho</math></b> <b>(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b><math>c_p</math></b> <b>(kJ/kgK)</b>	<b><math>\mu \cdot 10^5</math></b> <b>(Pa.s)</b>	<b><math>\nu \cdot 10^6</math></b> <b>(m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>k</b> <b>(W/mK)</b>	<b><math>\alpha \cdot 10^4</math></b> <b>(m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Pr</b>
100	3,6010	1,0266	0,6924	1,923	0,009246	0,02501	0,770
150	2,3675	1,0099	1,0283	4,343	0,013735	0,05745	0,753
200	1,7684	1,0061	1,3289	7,490	0,01809	0,10165	0,739
250	1,4128	1,0053	1,488	9,49	0,02227	0,13161	0,722
300	1,1774	1,0057	1,983	15,68	0,02624	0,22160	0,708
350	0,9980	1,0090	2,075	20,76	0,03003	0,2983	0,697
400	0,8826	1,0140	2,286	25,90	0,03365	0,3760	0,689
450	0,7833	1,0207	2,484	28,86	0,03707	0,4222	0,683
500	0,7048	1,0295	2,671	37,90	0,04038	0,5564	0,680
550	0,6423	1,0392	2,848	44,34	0,04360	0,6532	0,680
600	0,5879	1,0551	3,018	51,34	0,04659	0,7512	0,680
650	0,5430	1,0635	3,177	58,51	0,04953	0,8578	0,682
700	0,5030	1,0752	3,332	66,25	0,05230	0,9672	0,684
750	0,4709	1,0856	3,481	73,91	0,05509	1,0774	0,686
800	0,4405	1,0978	3,625	82,29	0,05779	1,1951	0,689
850	0,4149	1,1095	3,765	90,75	0,06028	1,3097	0,692
900	0,3925	1,1212	3,899	99,30	0,06279	1,4271	0,696
950	0,3716	1,1321	4,023	108,20	0,06525	1,5510	0,699
1000	0,3524	1,1417	4,152	117,80	0,06752	1,6779	0,702
1100	0,3204	1,160	4,44	138,60	0,0732	1,969	0,704
1200	0,2947	1,179	4,69	159,10	0,0782	2,251	0,707
1300	0,2707	1,197	4,93	182,10	0,0837	2,583	0,705
1400	0,2515	1,214	5,17	205,50	0,0891	2,920	0,705
1500	0,2355	1,230	5,40	229,10	0,0946	3,262	0,705
1600	0,2211	1,248	5,63	254,50	0,100	3,609	0,705
1700	0,2082	1,267	5,85	280,50	0,105	3,977	0,705
1800	0,1970	1,287	6,07	308,10	0,111	4,379	0,704
1900	0,1858	1,309	6,29	338,50	0,117	4,811	0,704
2000	0,1762	1,338	6,50	369,00	0,124	5,260	0,702
2100	0,1682	1,372	6,72	399,60	0,131	5,715	0,700
2200	0,1602	1,419	6,93	432,60	0,139	6,120	0,707
2300	0,1538	1,482	7,14	464,00	0,149	6,540	0,710
2400	0,1458	1,574	7,35	504,00	0,161	7,020	0,718
2500	0,1394	1,688	7,57	543,50	0,175	7,441	0,730

## D.2. Polistirenin Termofiziksel Özellikleri



Şekil D2.1. Isıl İletkenlik Değerinin Sıcaklık İle Değişimi [69]

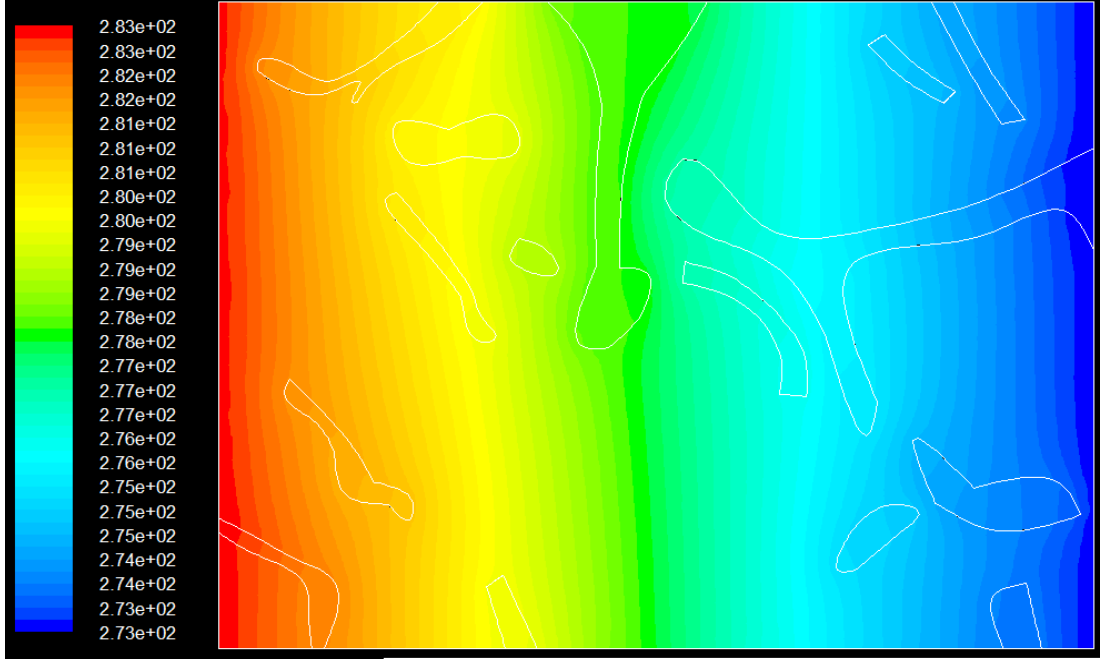
Şekil D2.2. Yoğunluğun Sıcaklık İle Değişimi [70]



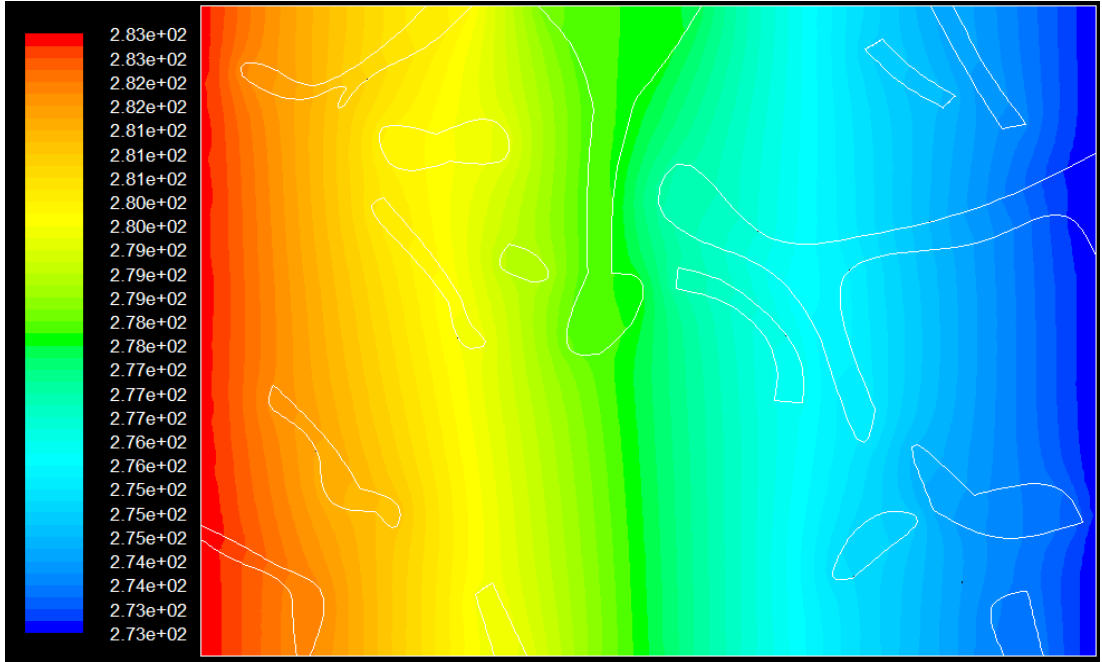
Şekil D2.3. Özgül Isının Sıcaklık İle Değişimi [71]

## EK E

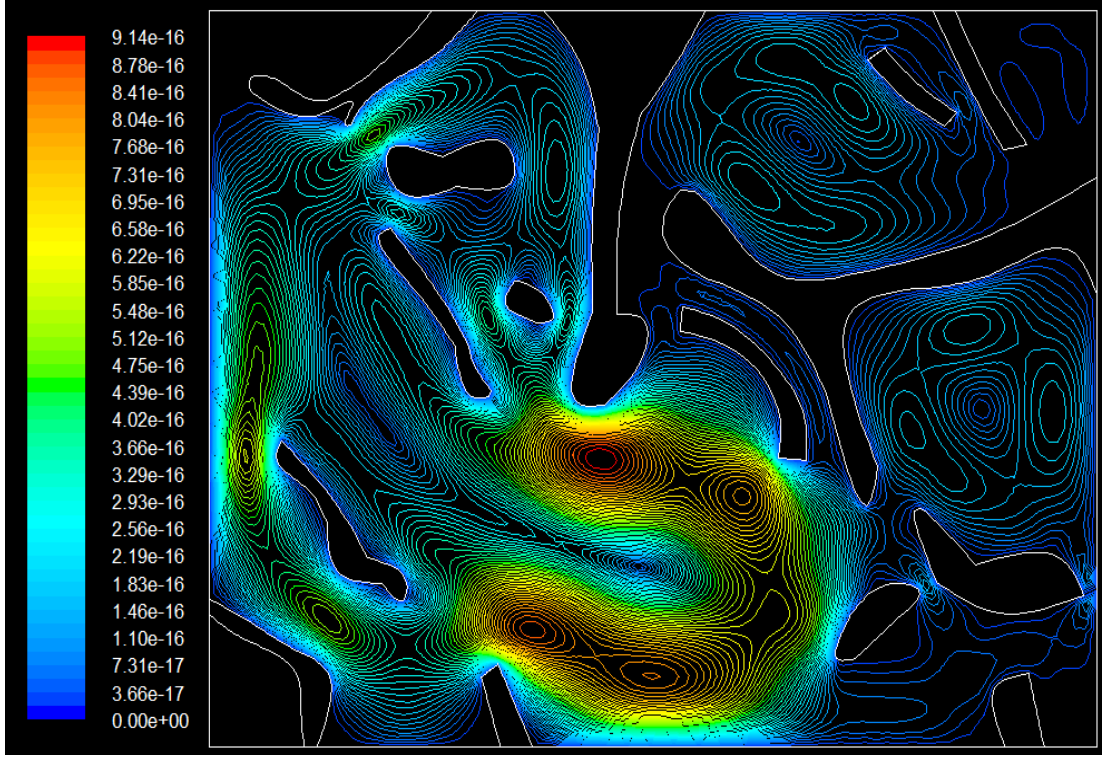
### E1.1.18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Analizi



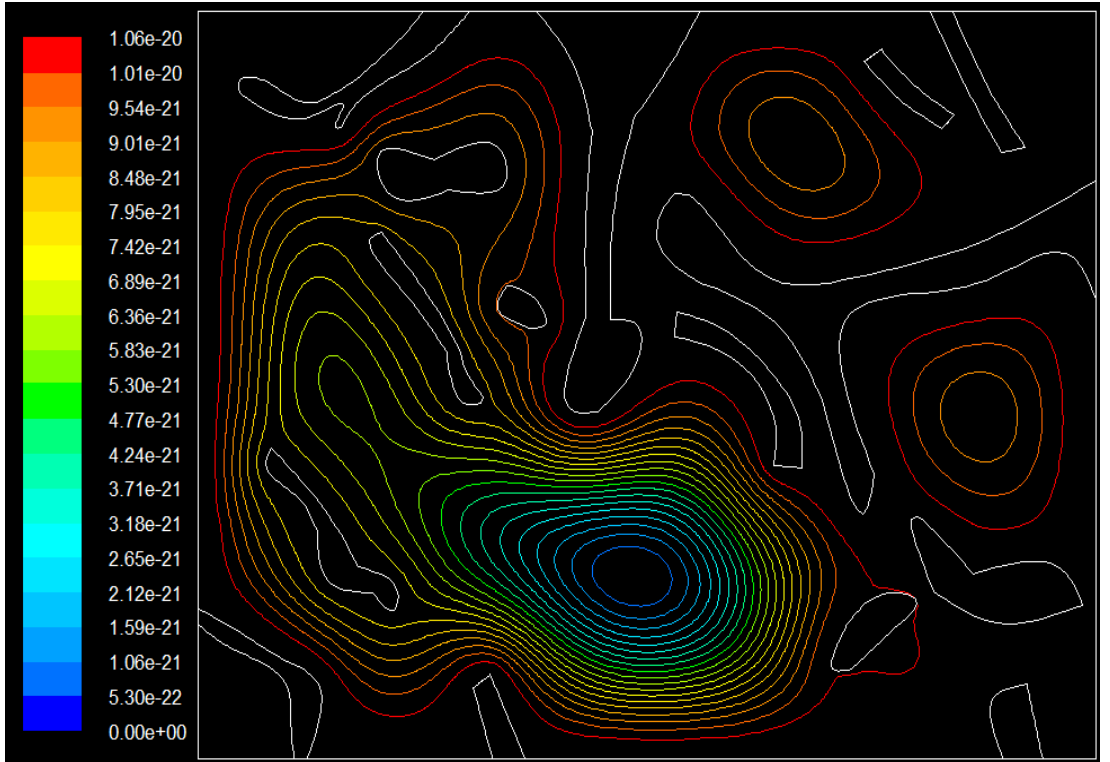
Şekil E1.1. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü



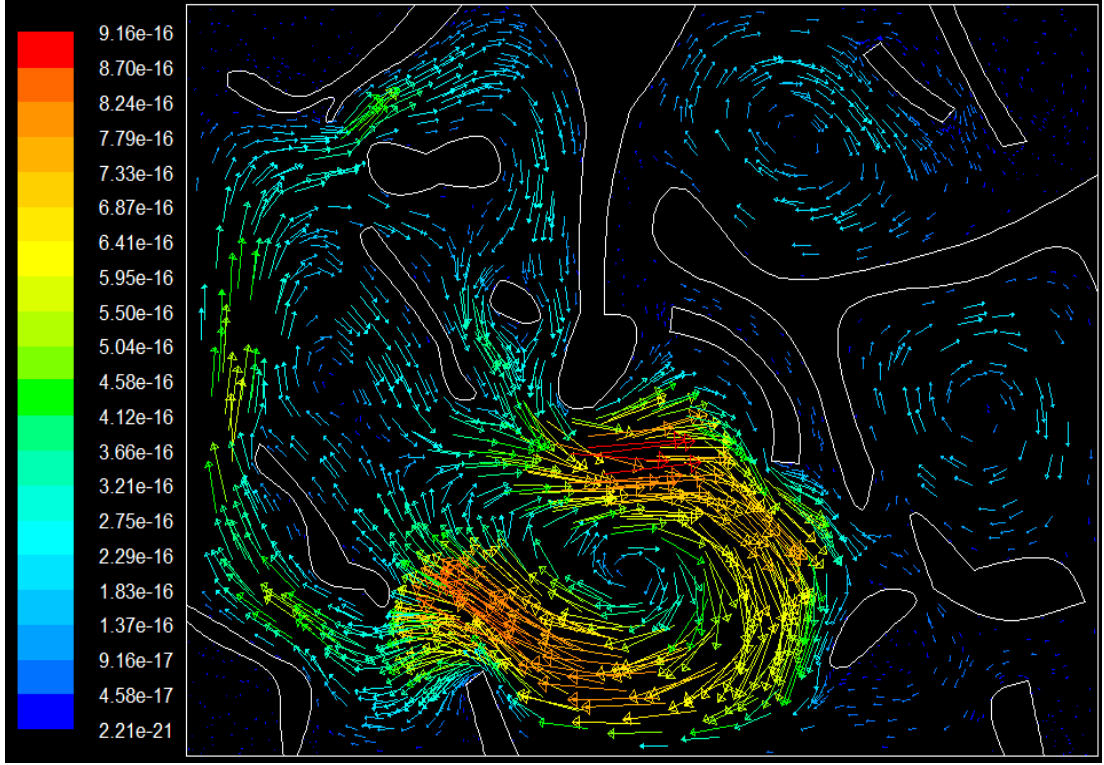
Şekil E1.2. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü



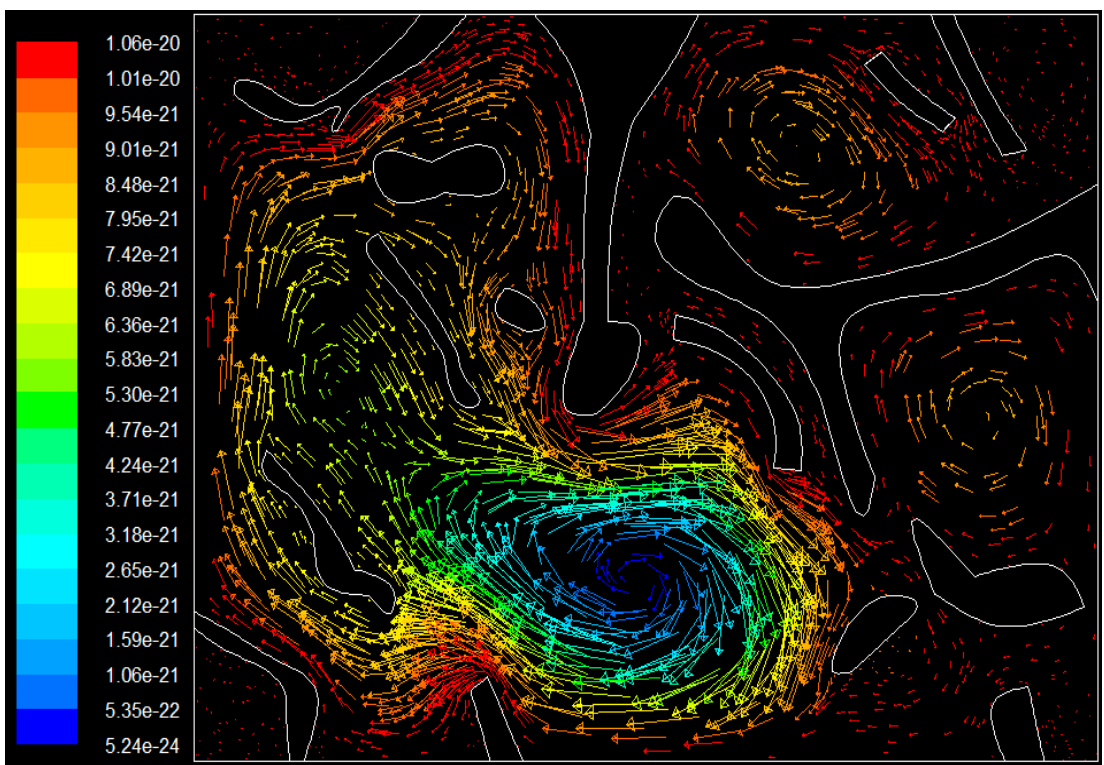
Şekil E1.3. Ortalama 278 K sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri



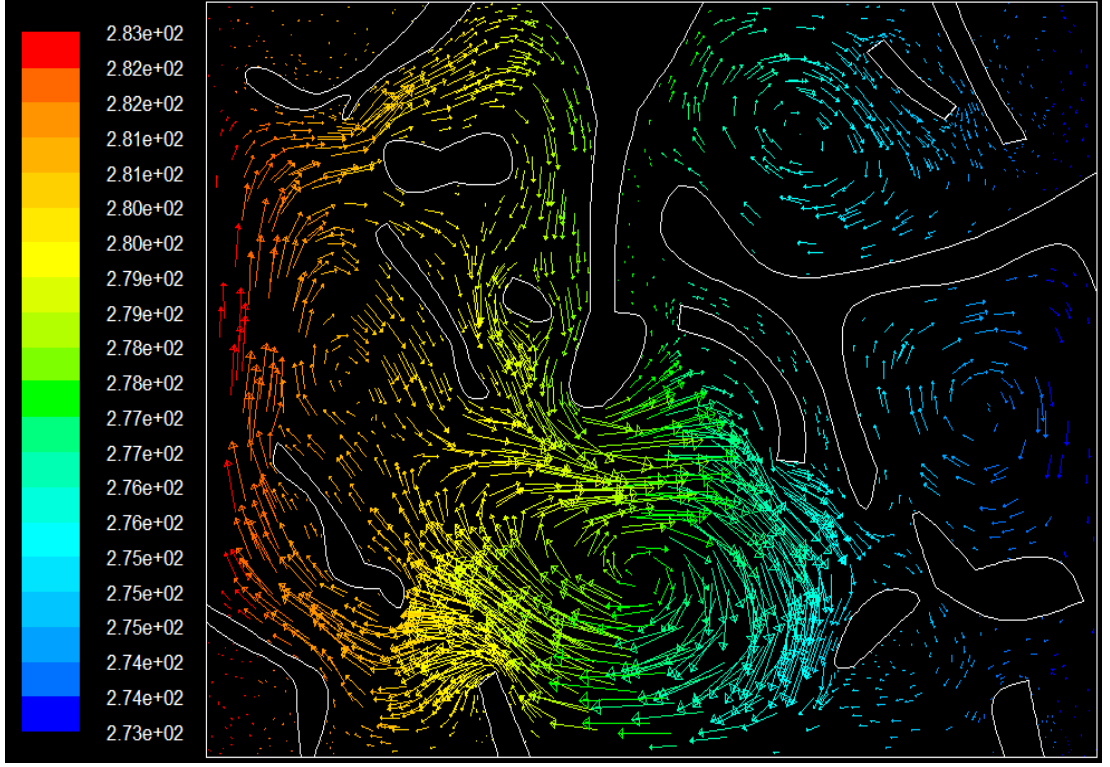
Şekil E1.4. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri



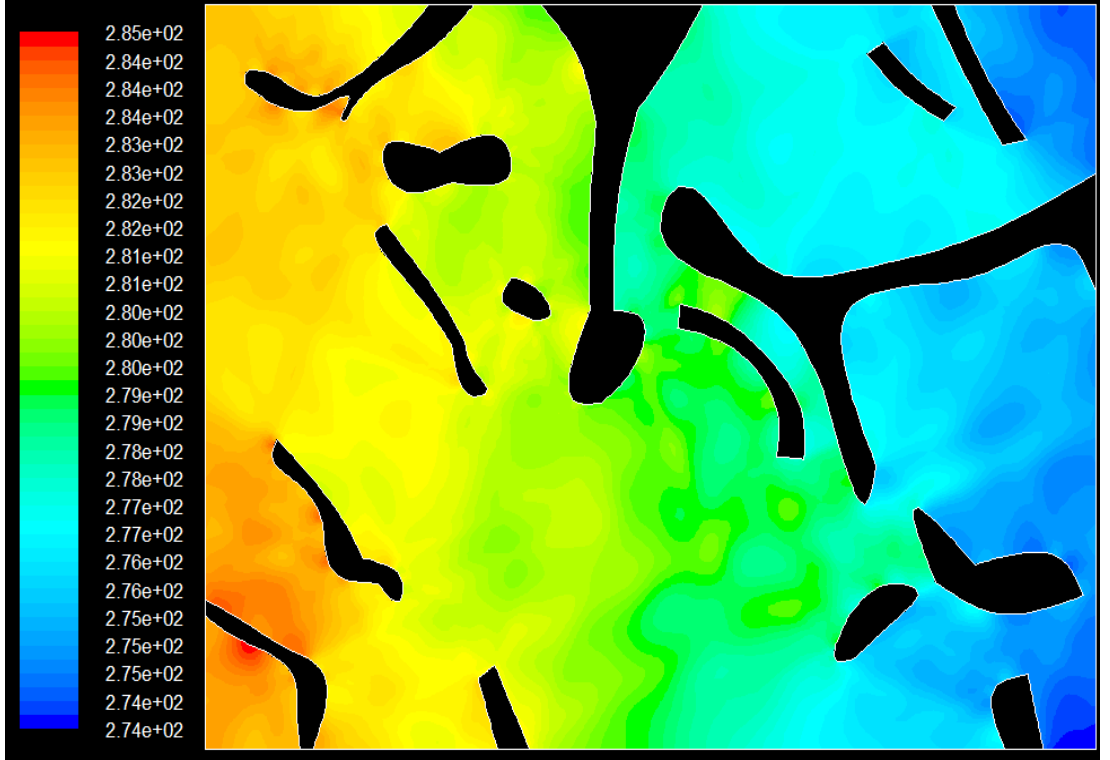
Şekil E1.5. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri



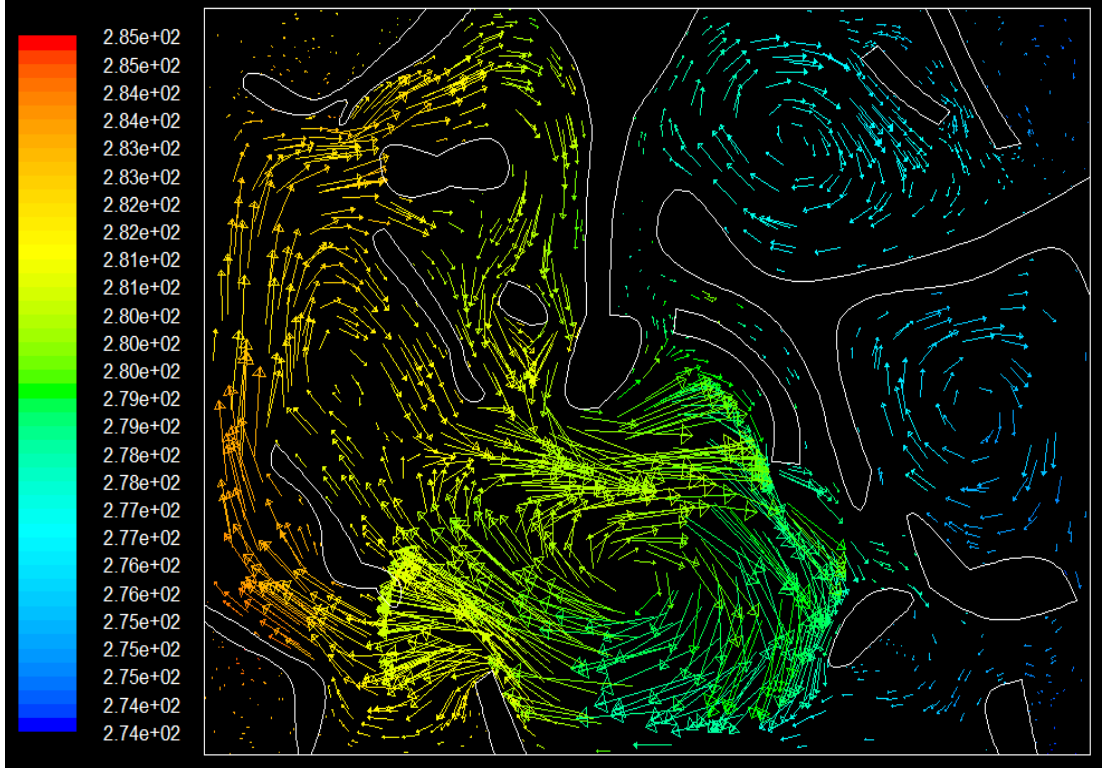
Şekil E1.6. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri



Şekil E1.7. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri

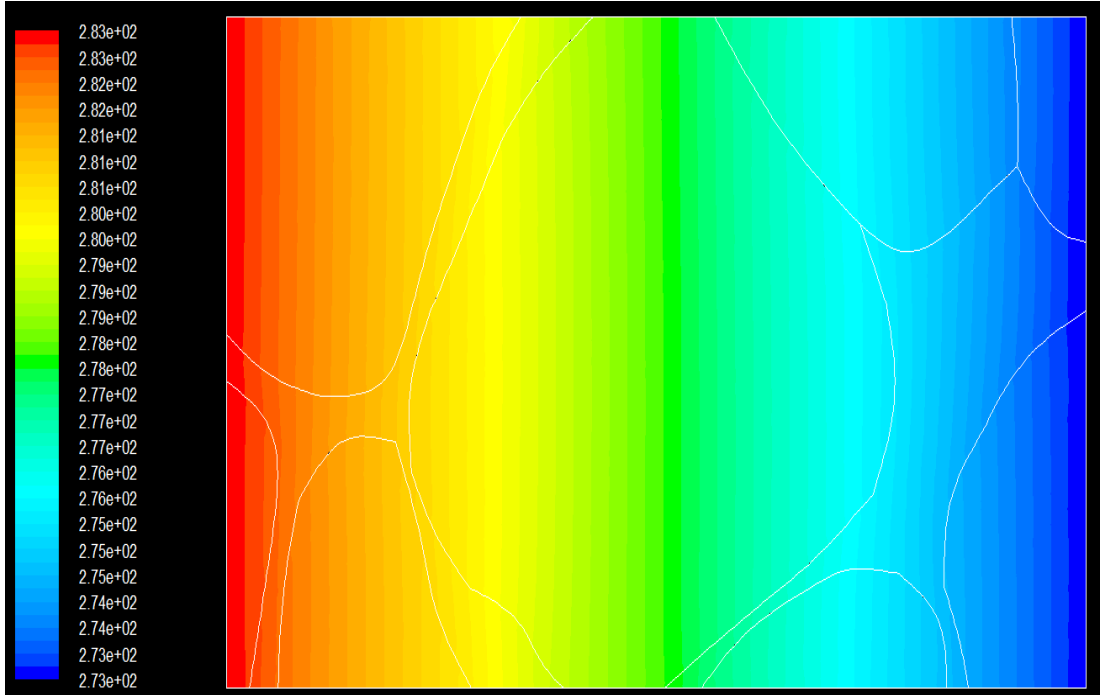


Şekil E1.8. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü

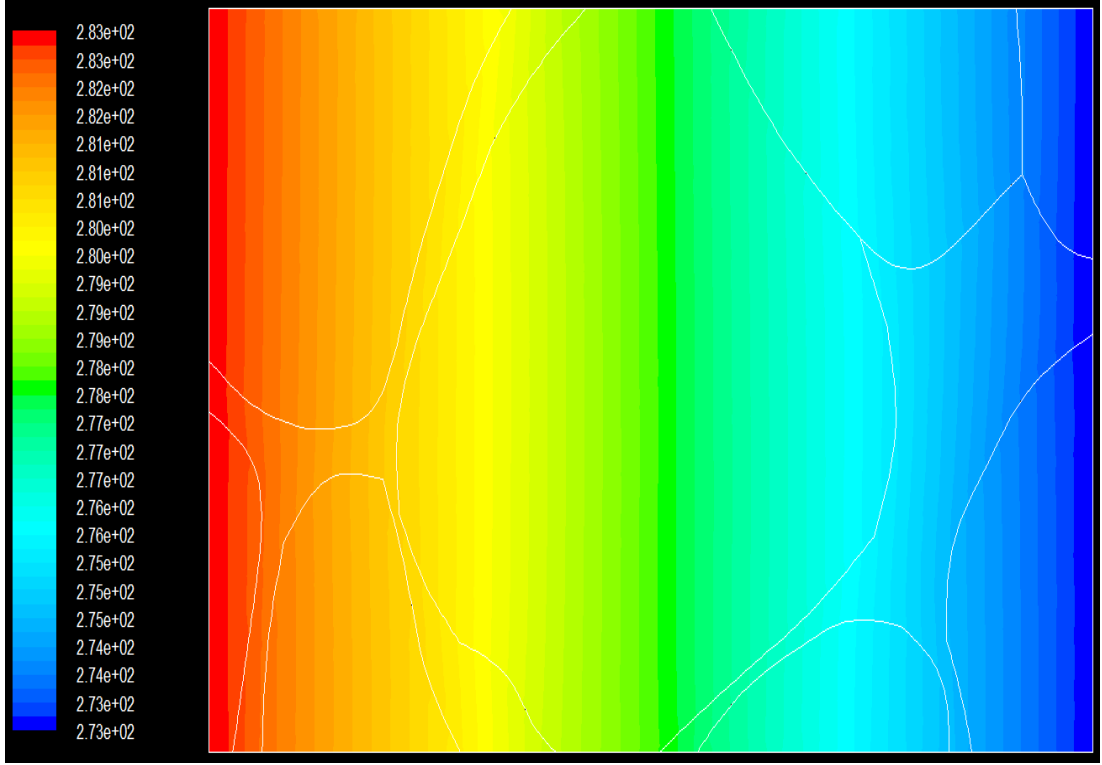


Şekil E1.9. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri

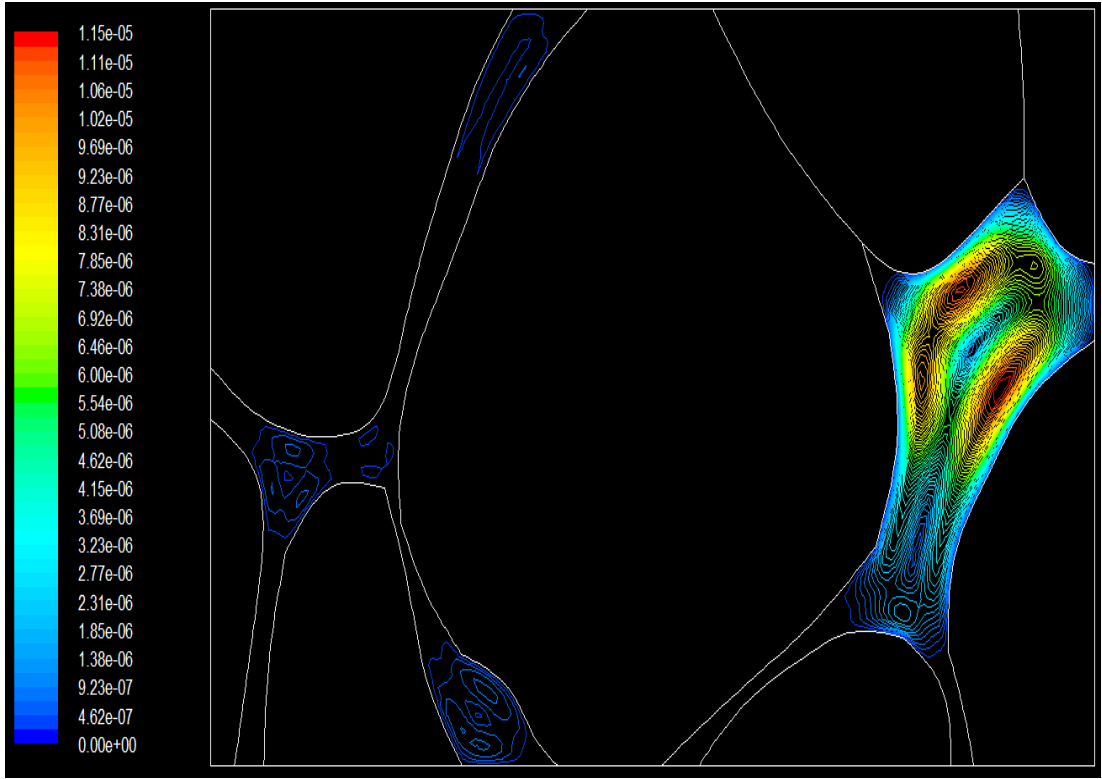
### E1.2.18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Makro Yapı Analizi



Şekil E1.10. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü

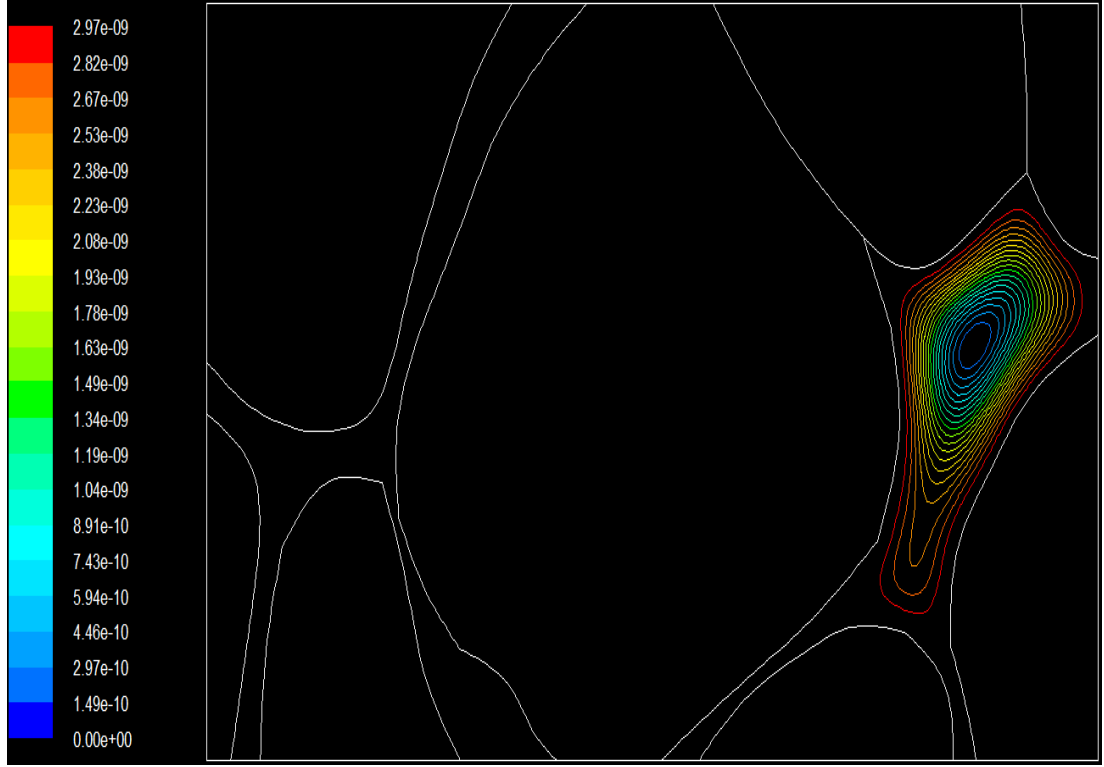


Şekil E1.11. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü

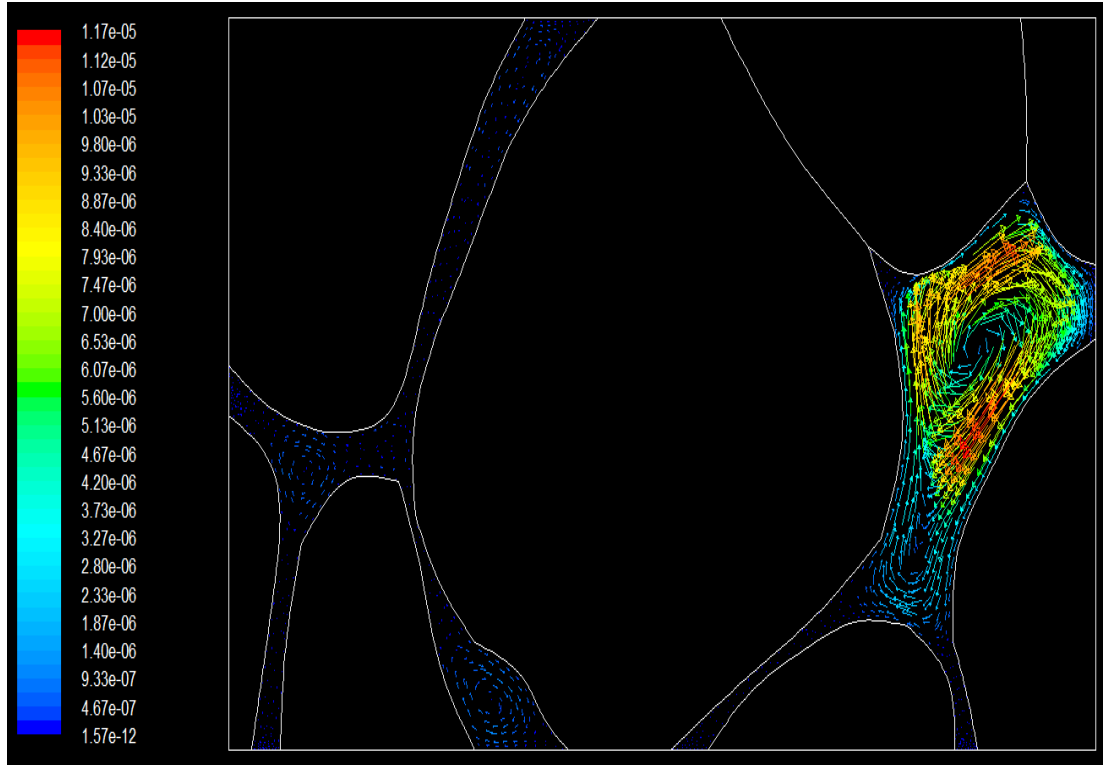


Şekil E1.12. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri

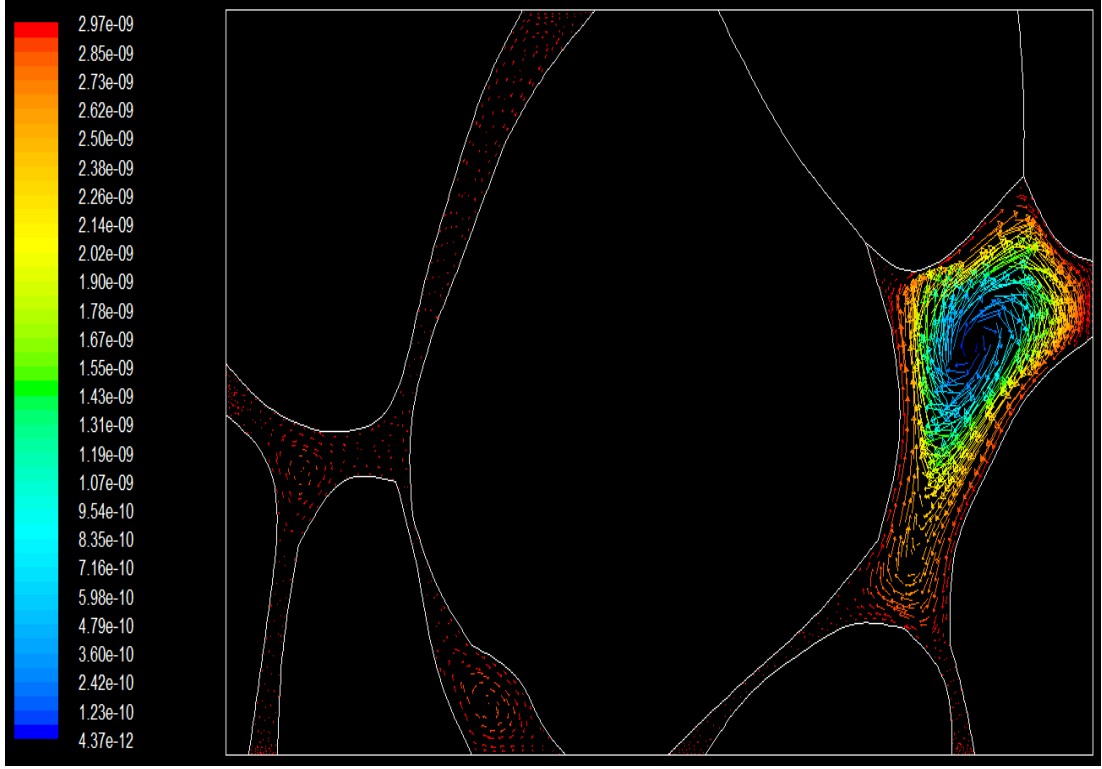




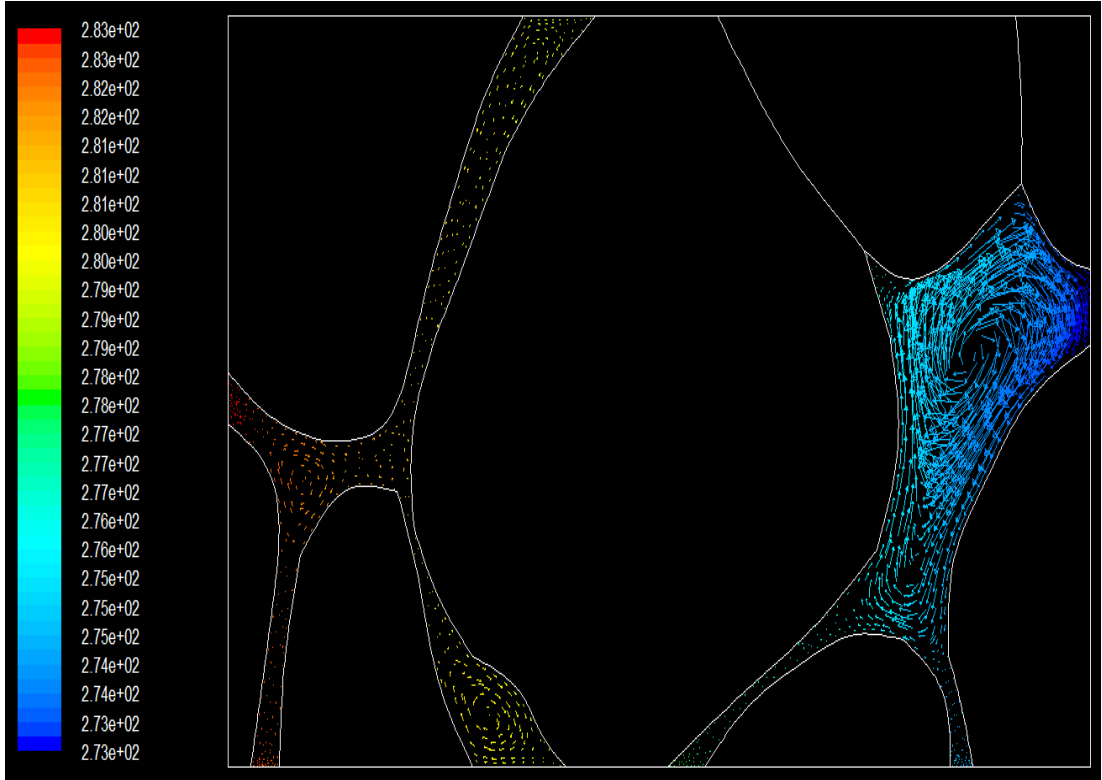
**Şekil E1.13.** Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri



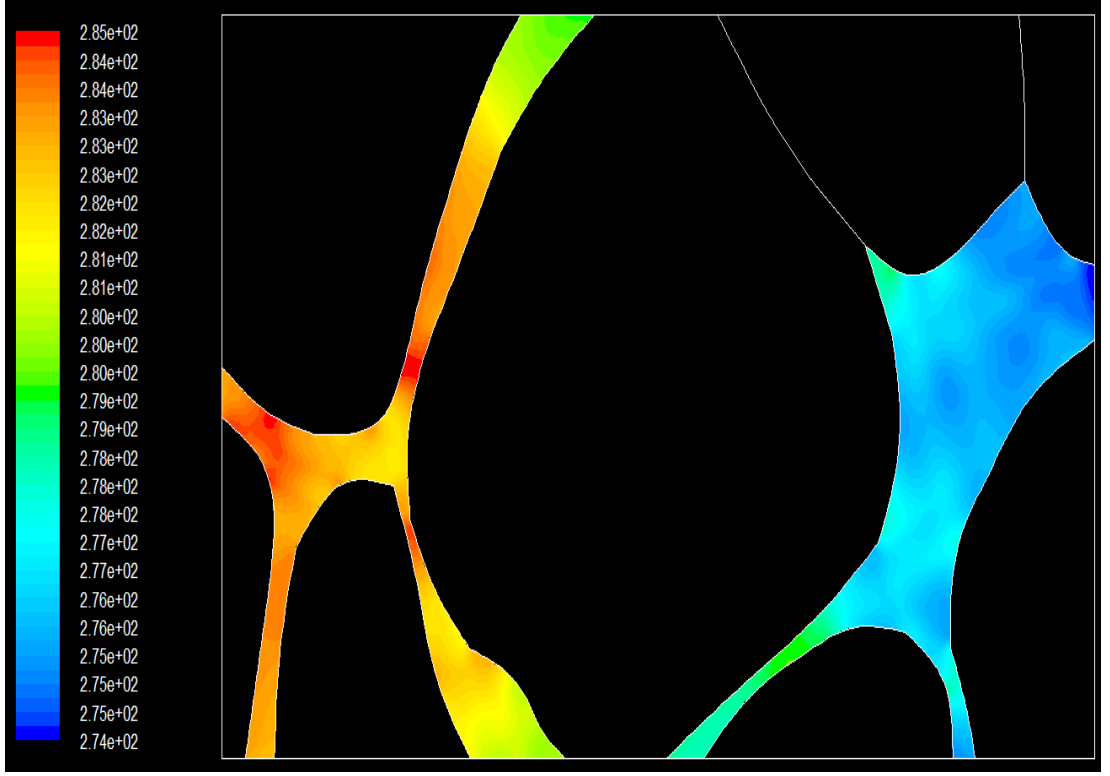
**Şekil E1.14.** Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri



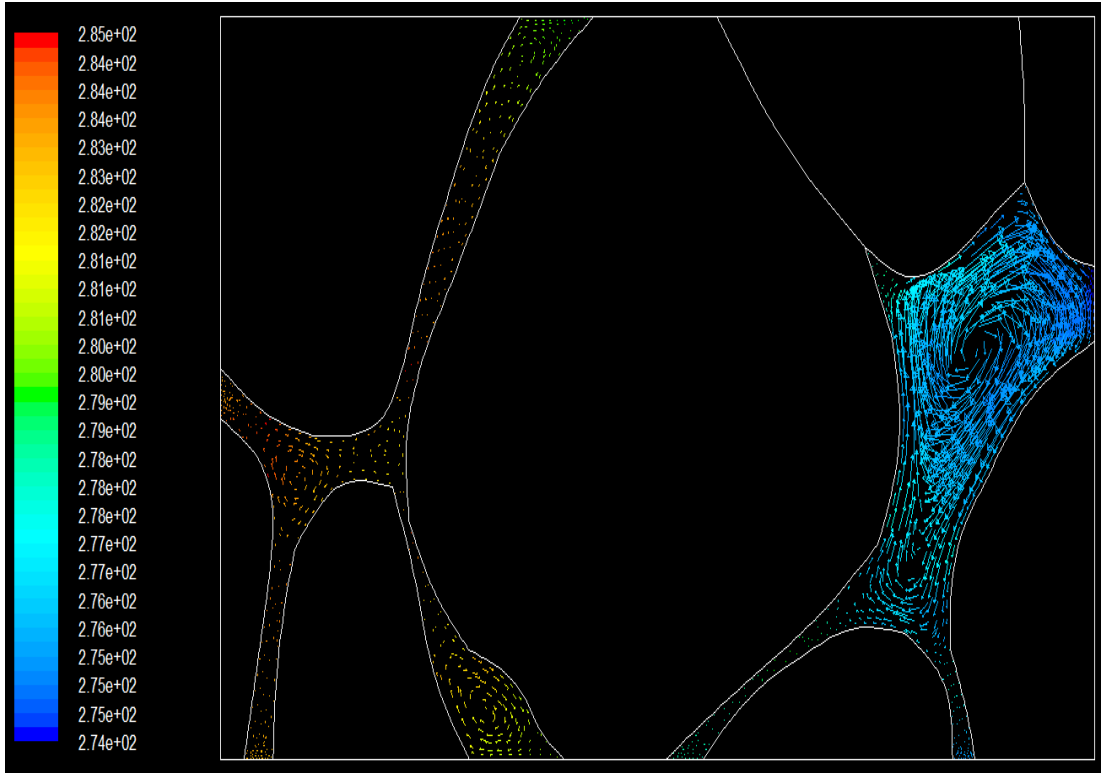
Şekil E1.15. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri



Şekil E1.16. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri

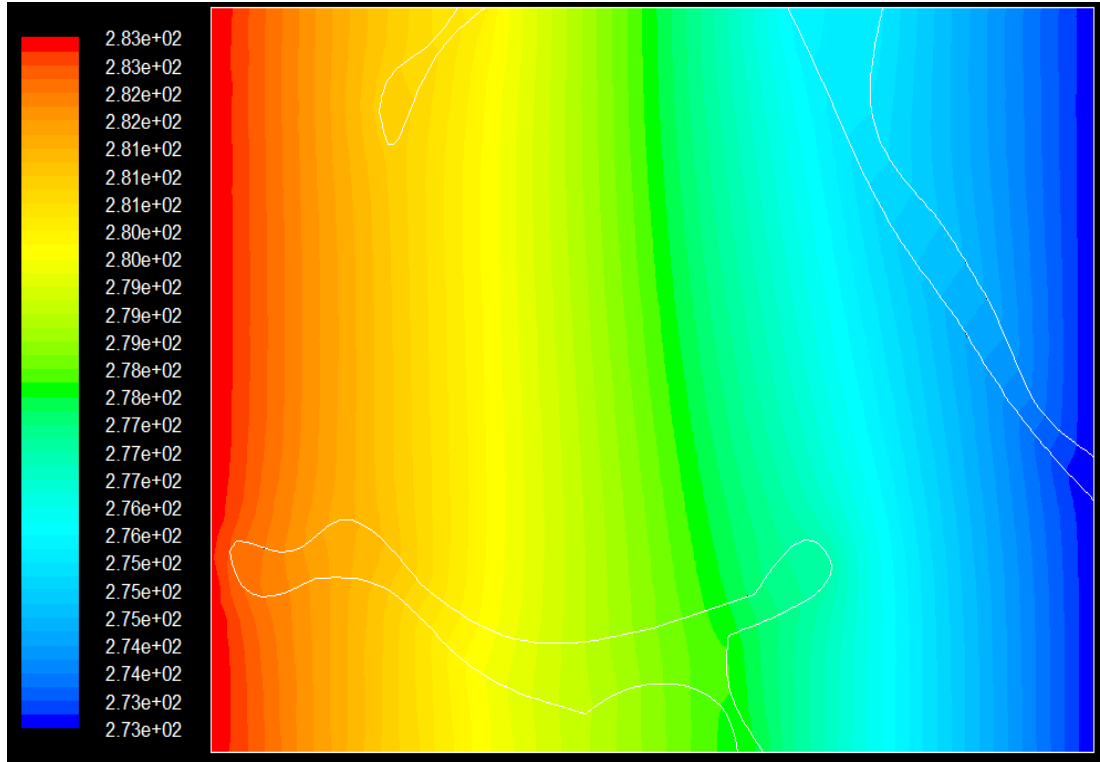


Şekil E1.17. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü

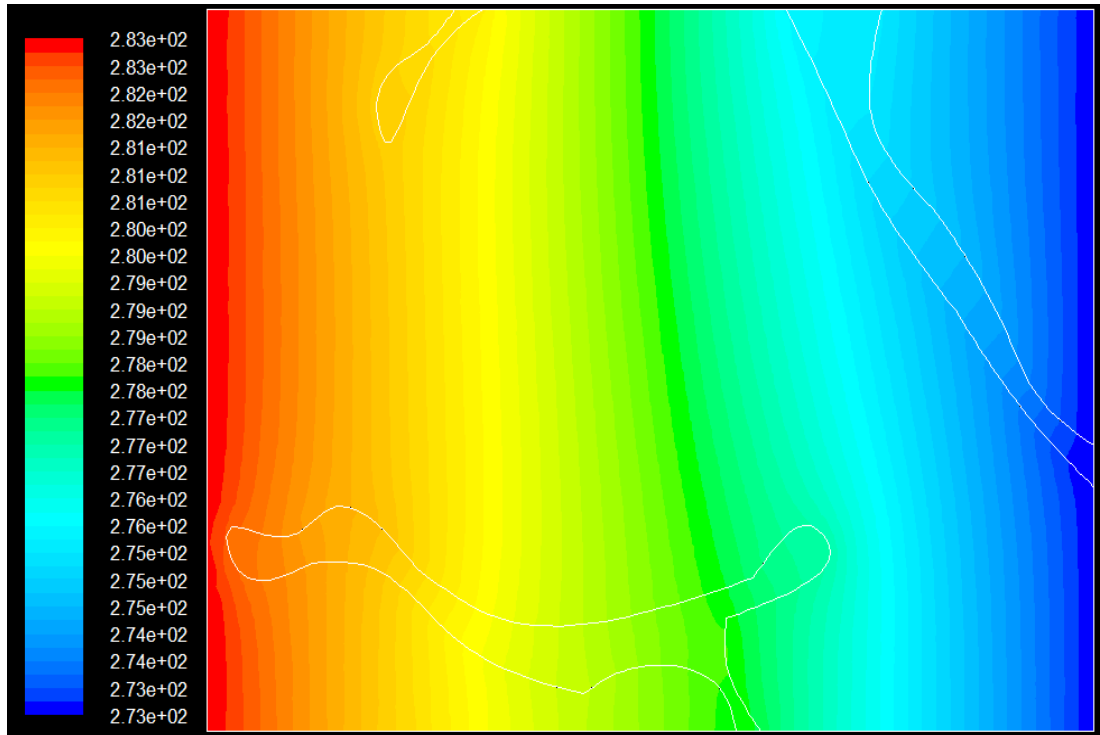


Şekil E1.18. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri

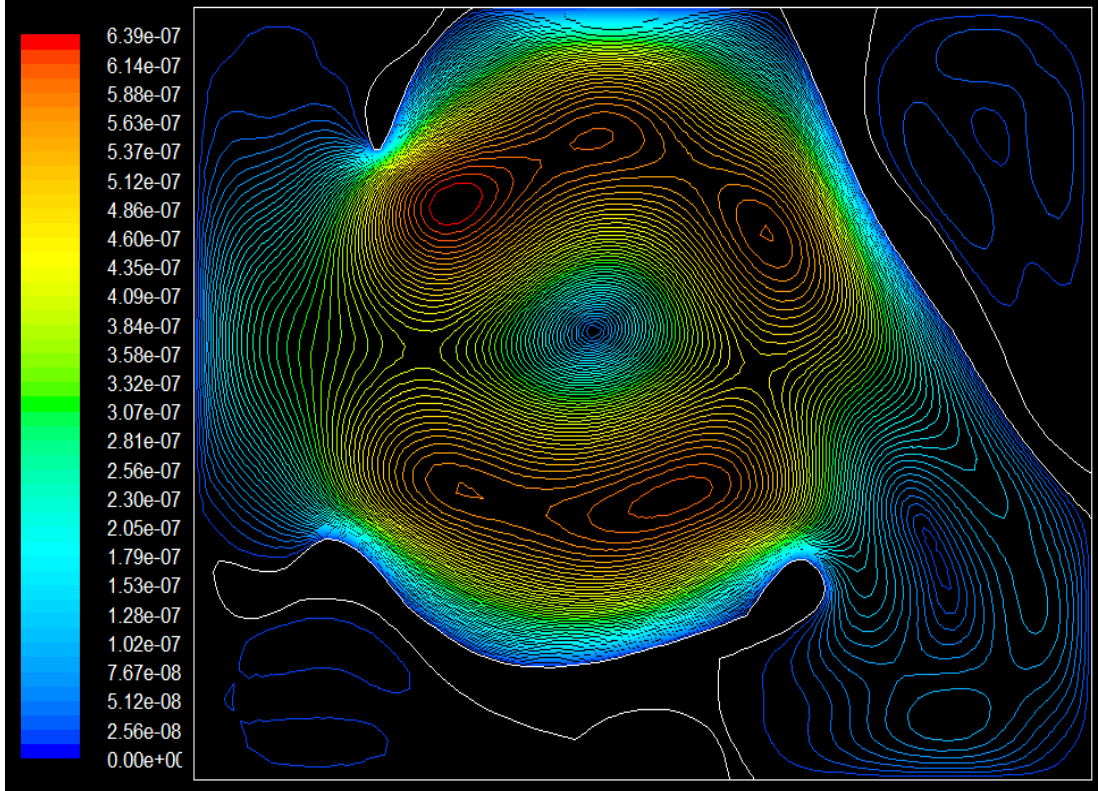
## E2.1.22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Analizi



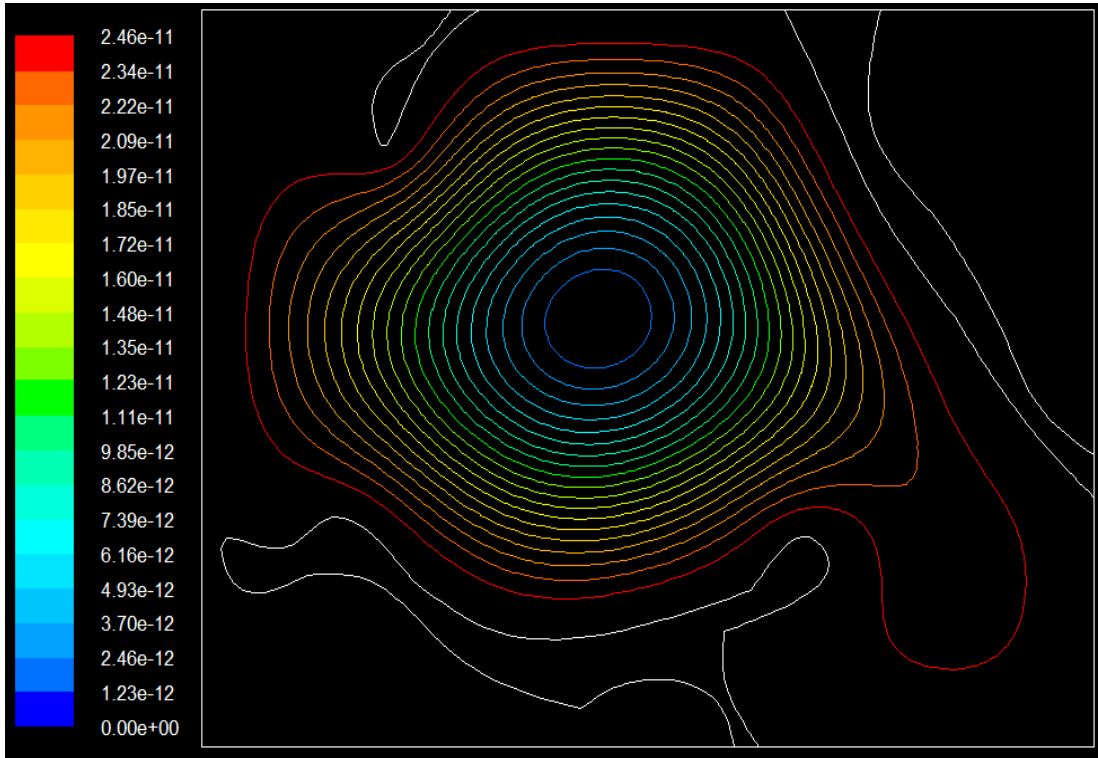
Şekil E2.1. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü



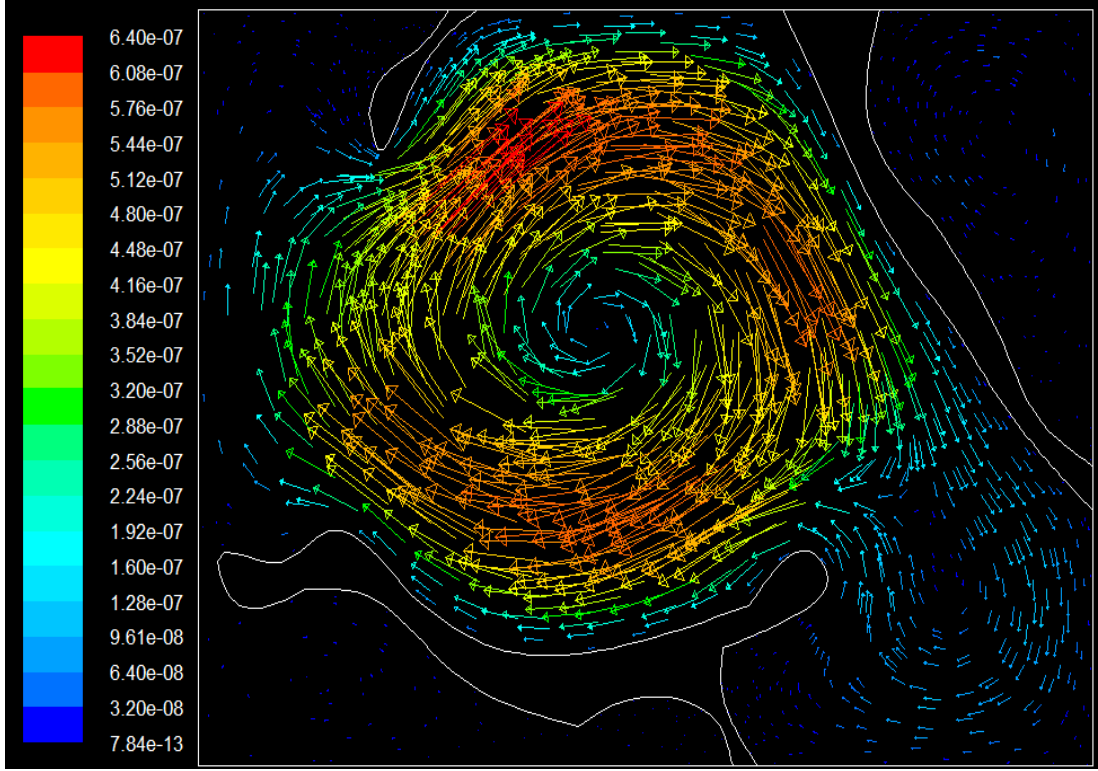
Şekil E2.2. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü



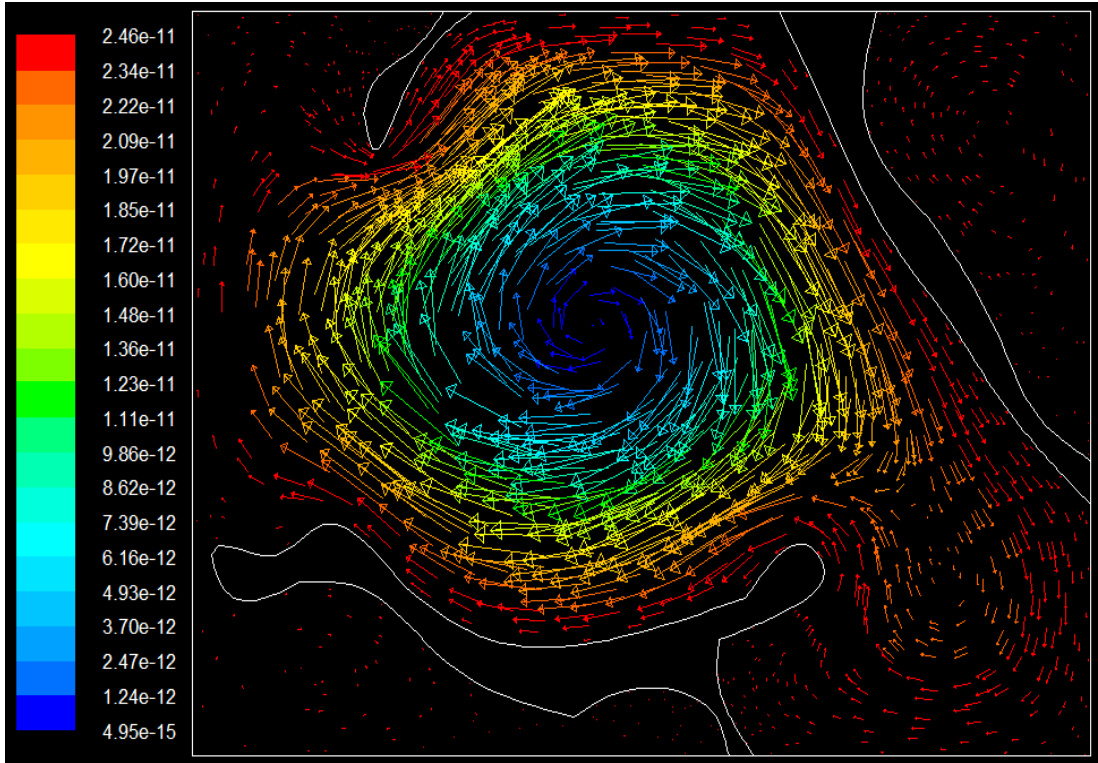
Şekil E2.3. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri



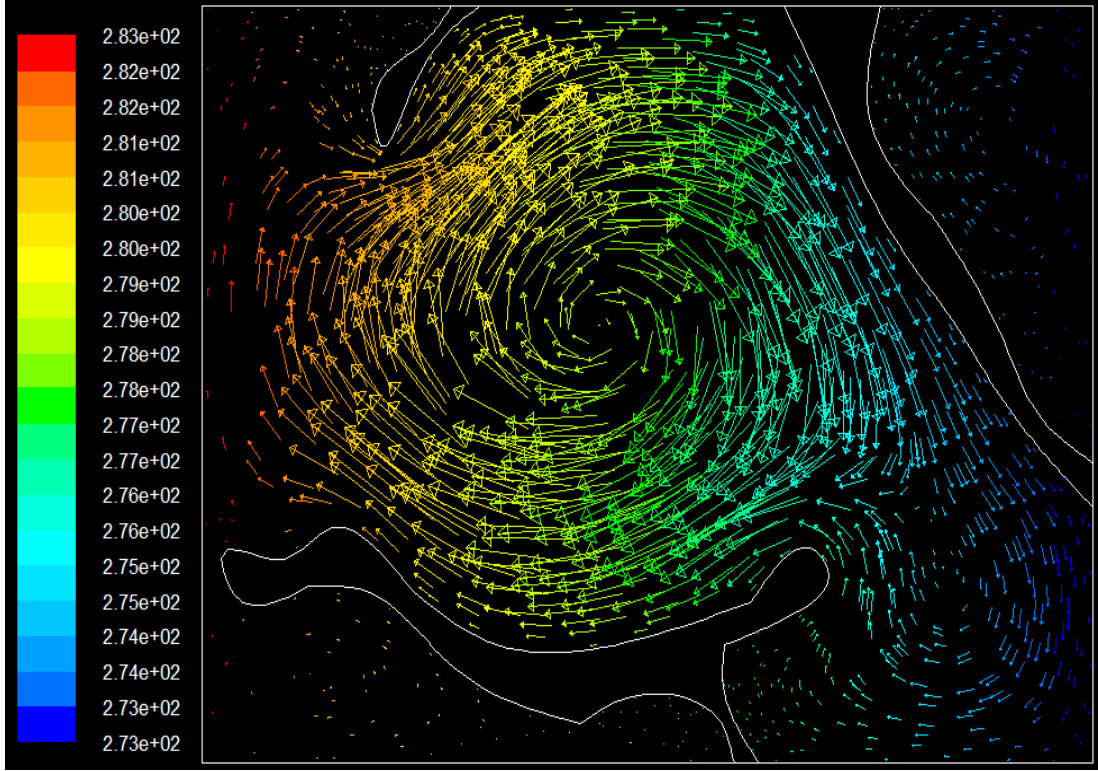
Şekil E2.4. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri



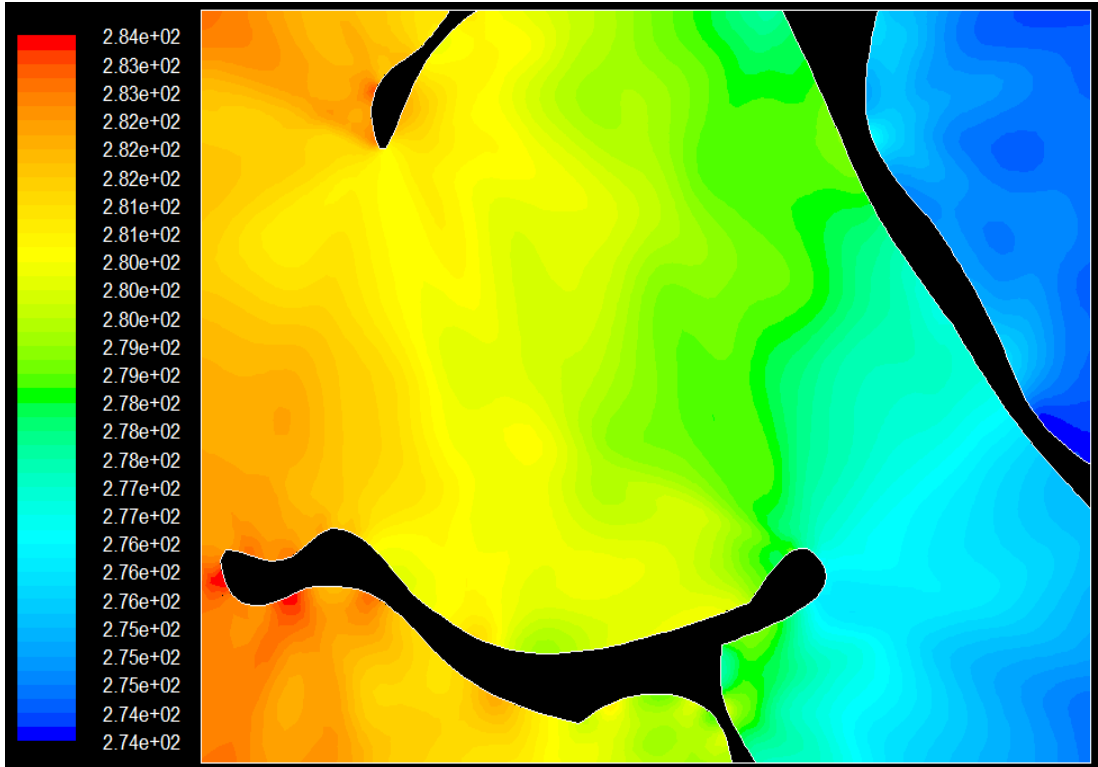
Şekil E2.5. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri



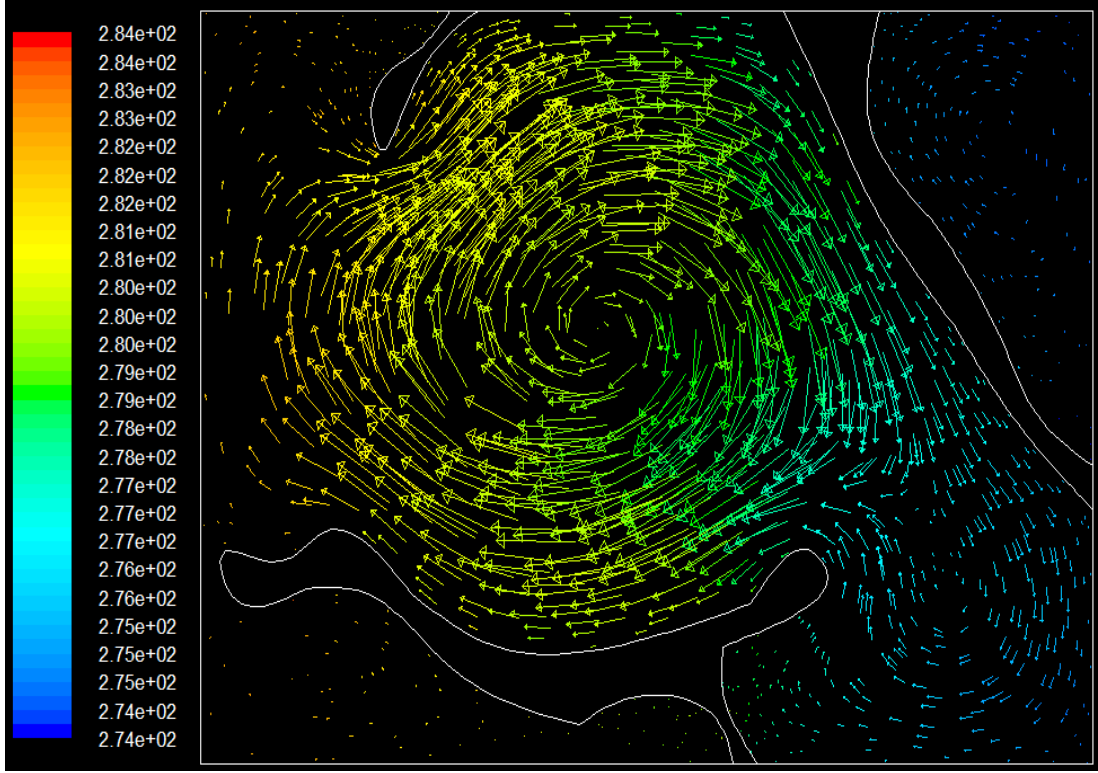
Şekil E2.6. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri



Şekil E2.7. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri

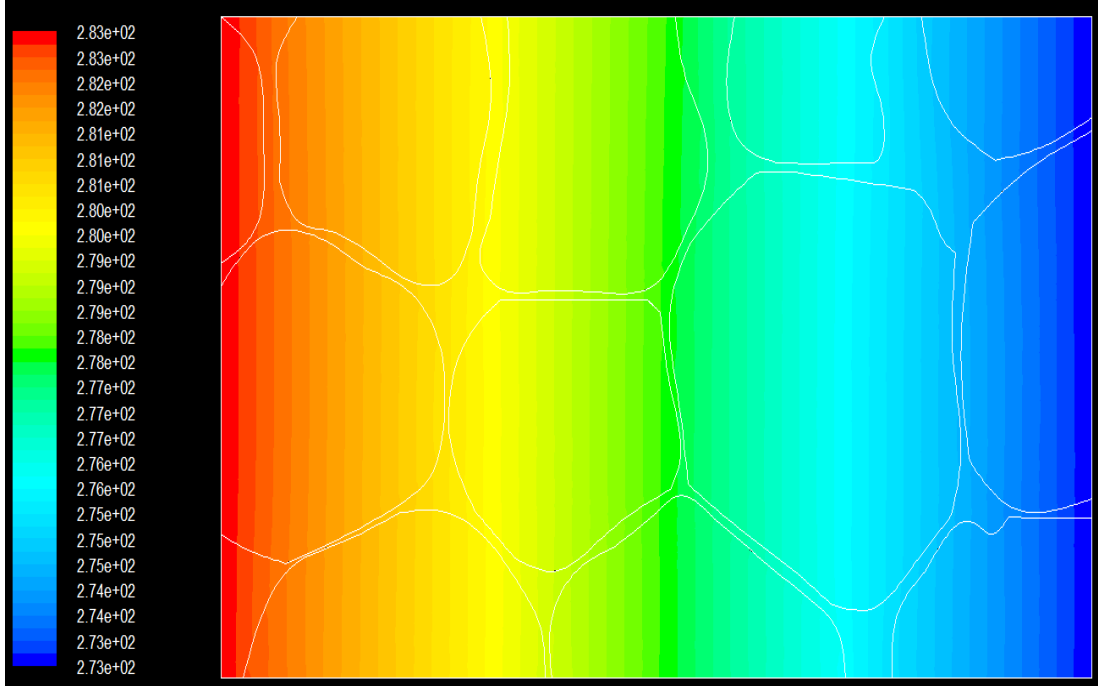


Şekil E2.8. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü



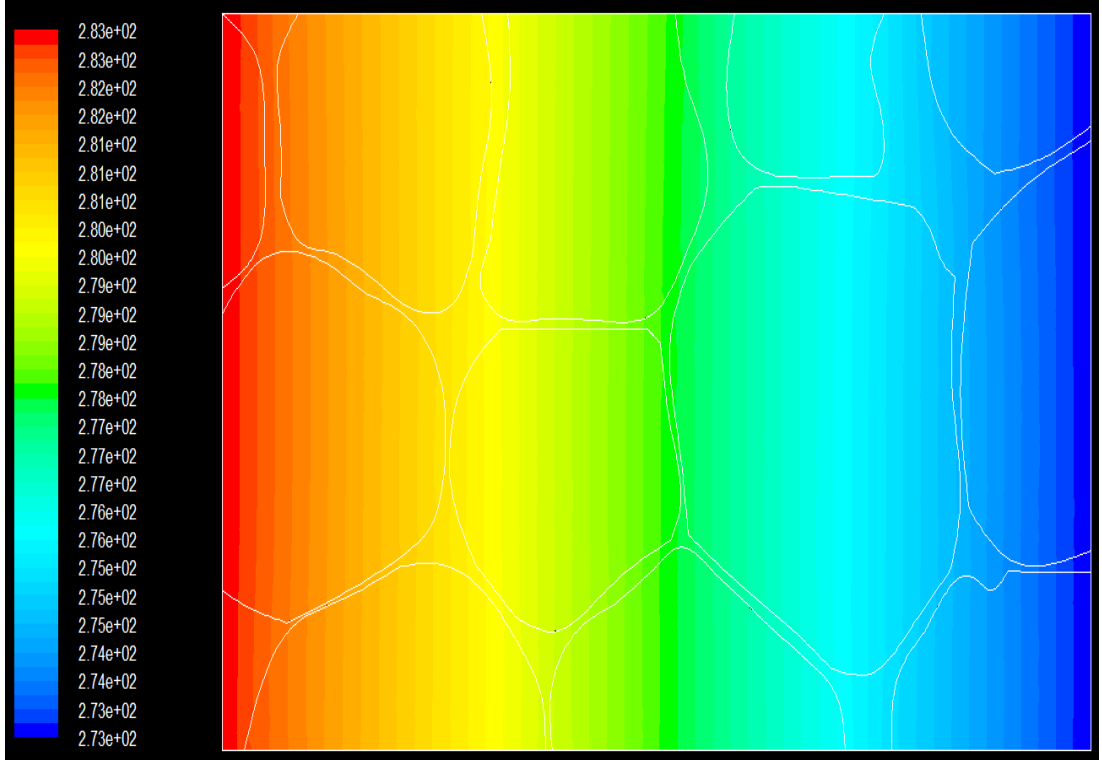
Şekil E2.9. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri

### E2.2.22 $\text{kg/m}^3$ Yoğunluğa Sahip Makro Yapı Analizi

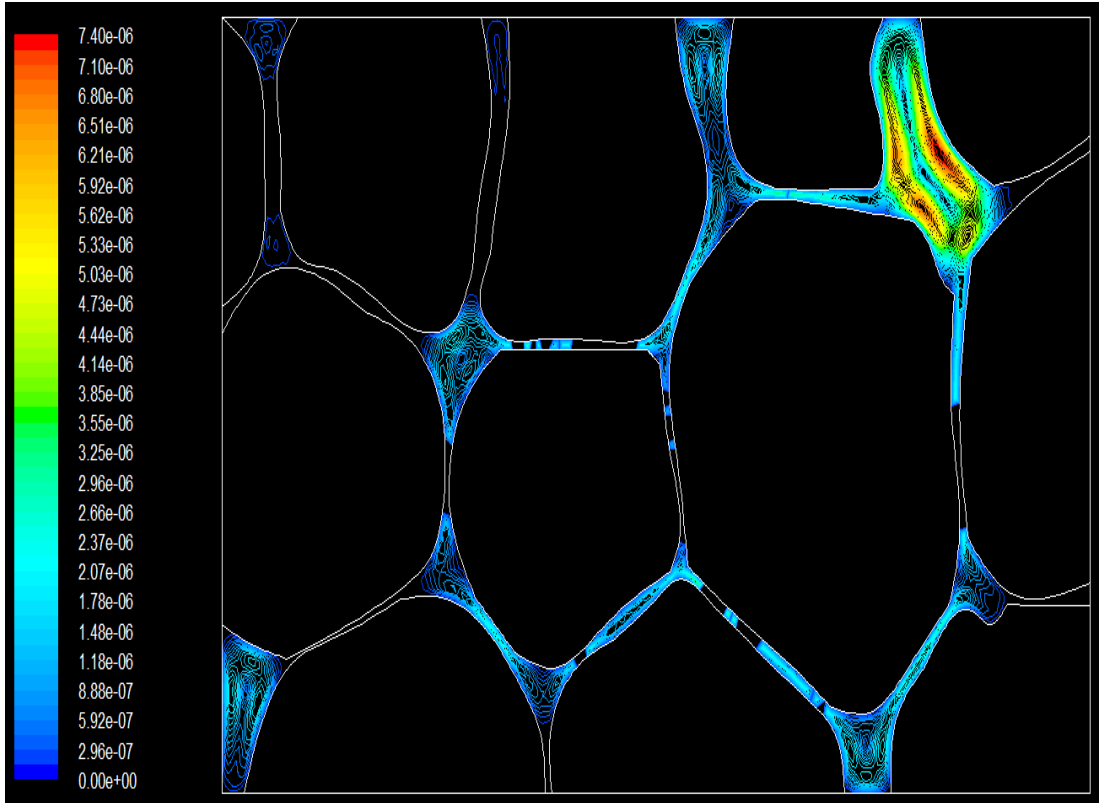


Şekil E2.10. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü

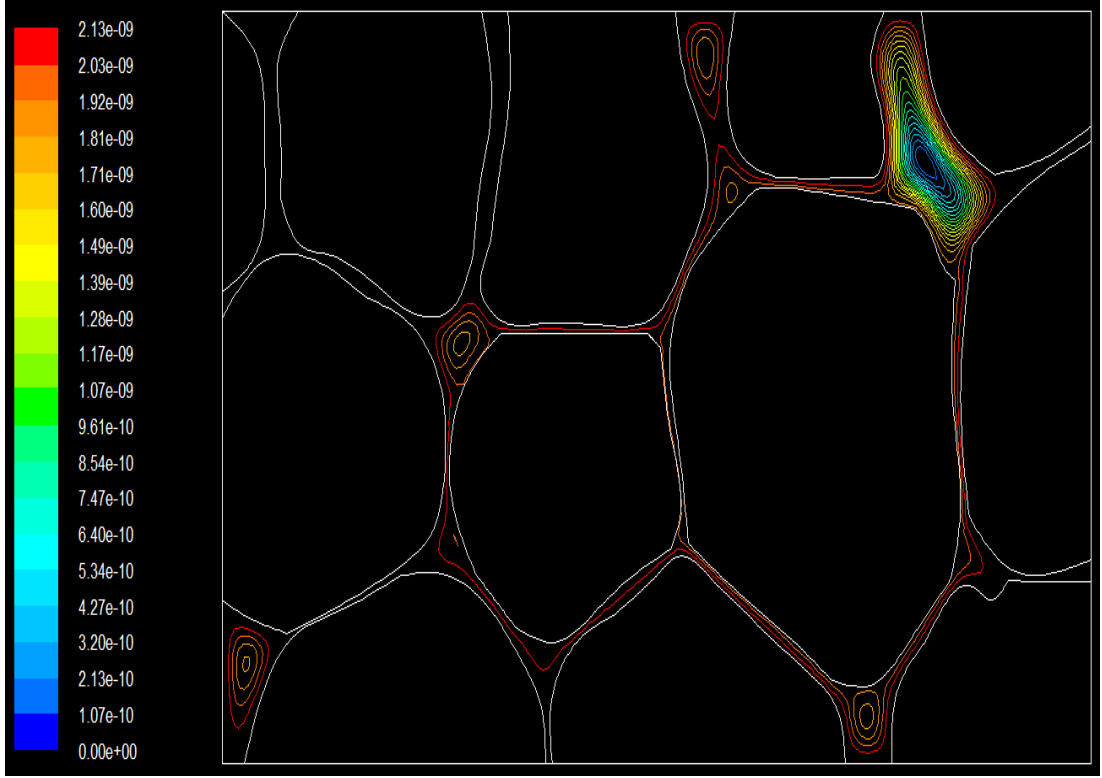




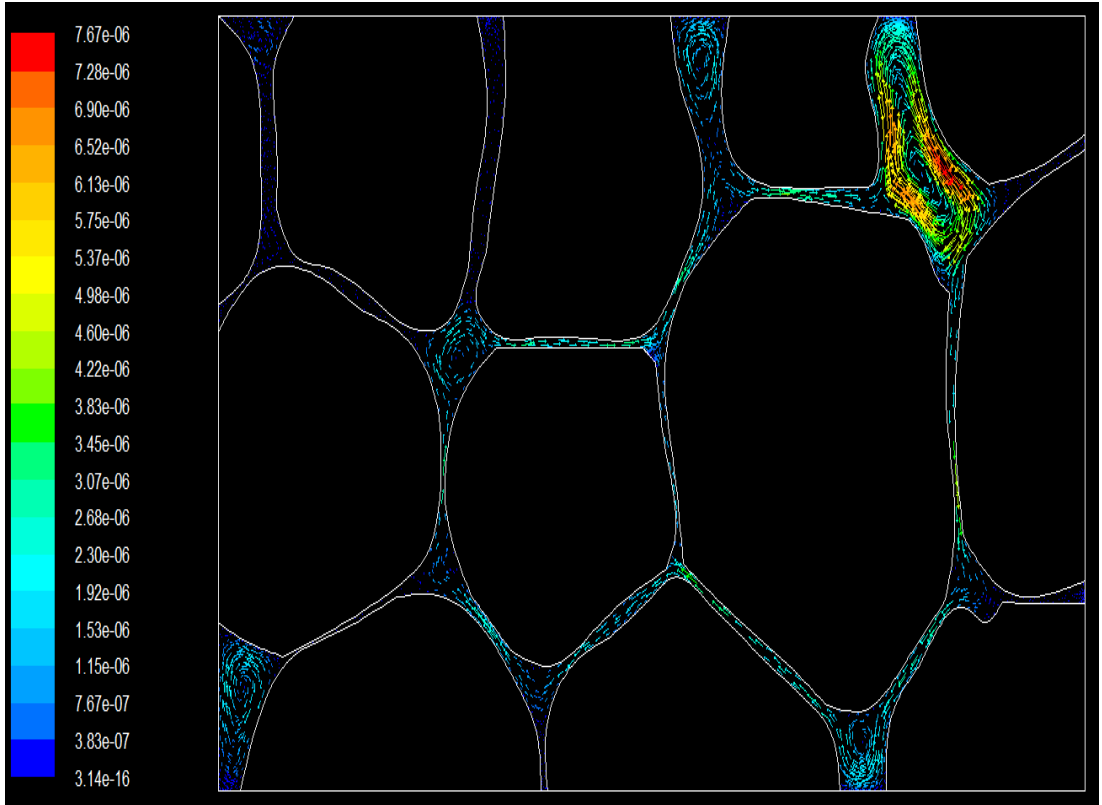
Şekil E2.11. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü



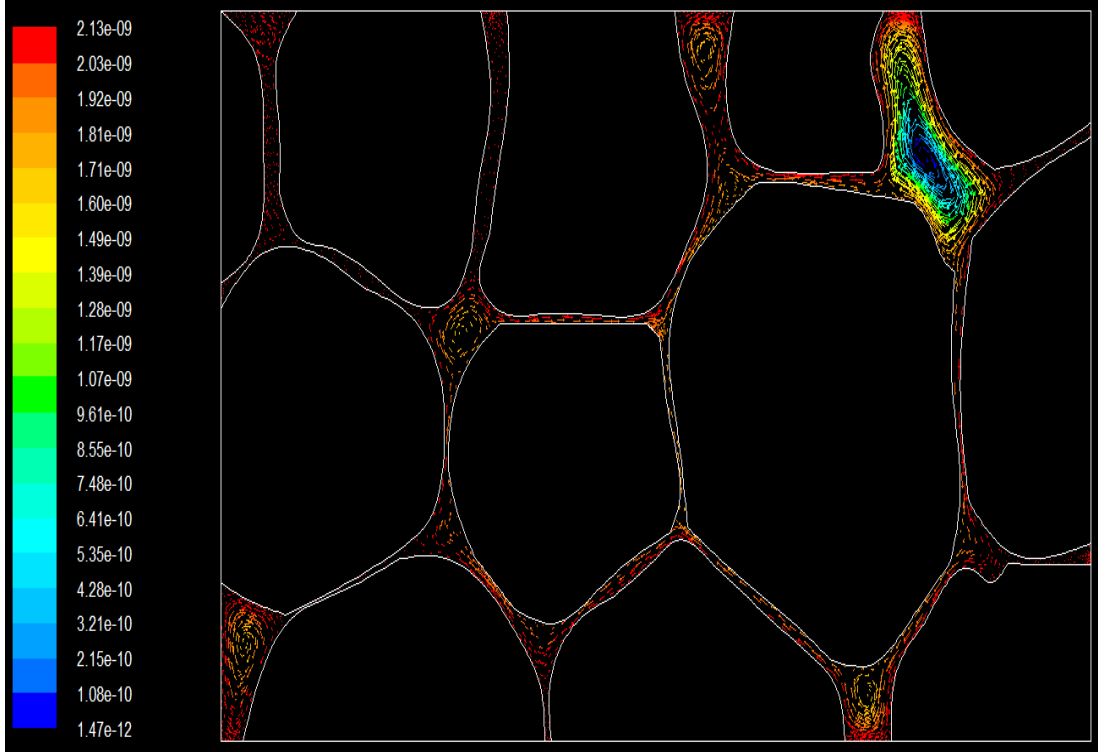
Şekil E2.12. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri



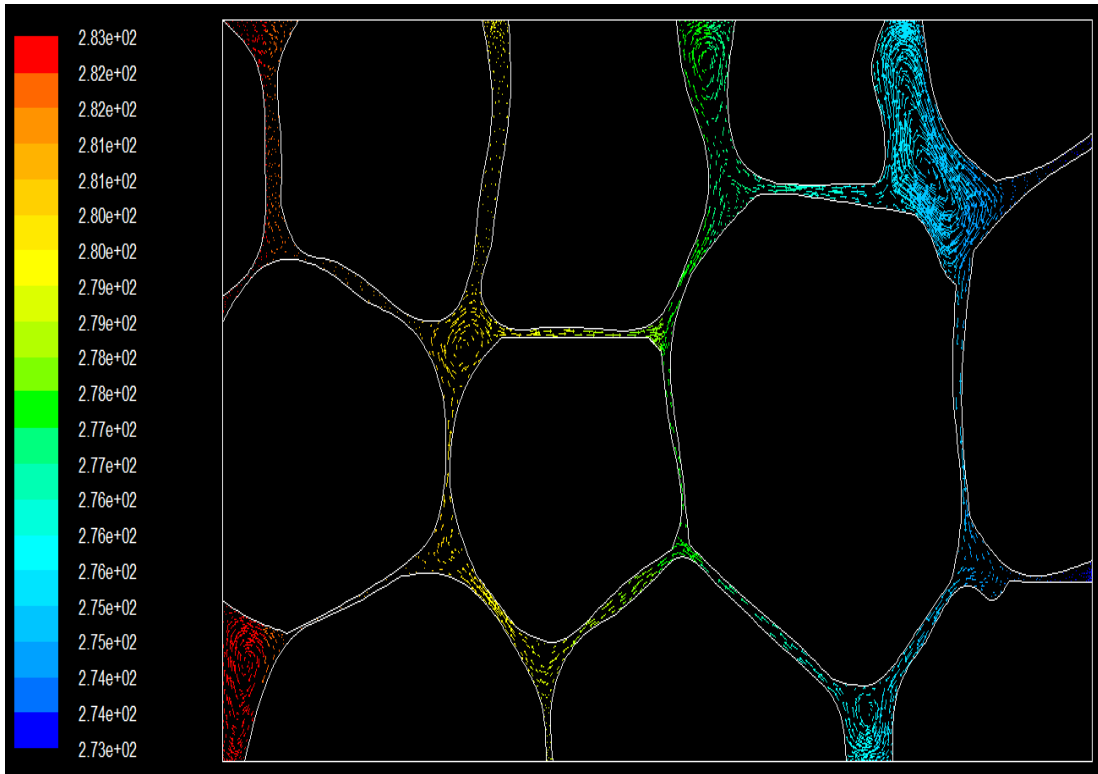
Şekil E2.13. Ortalama 278 K sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri



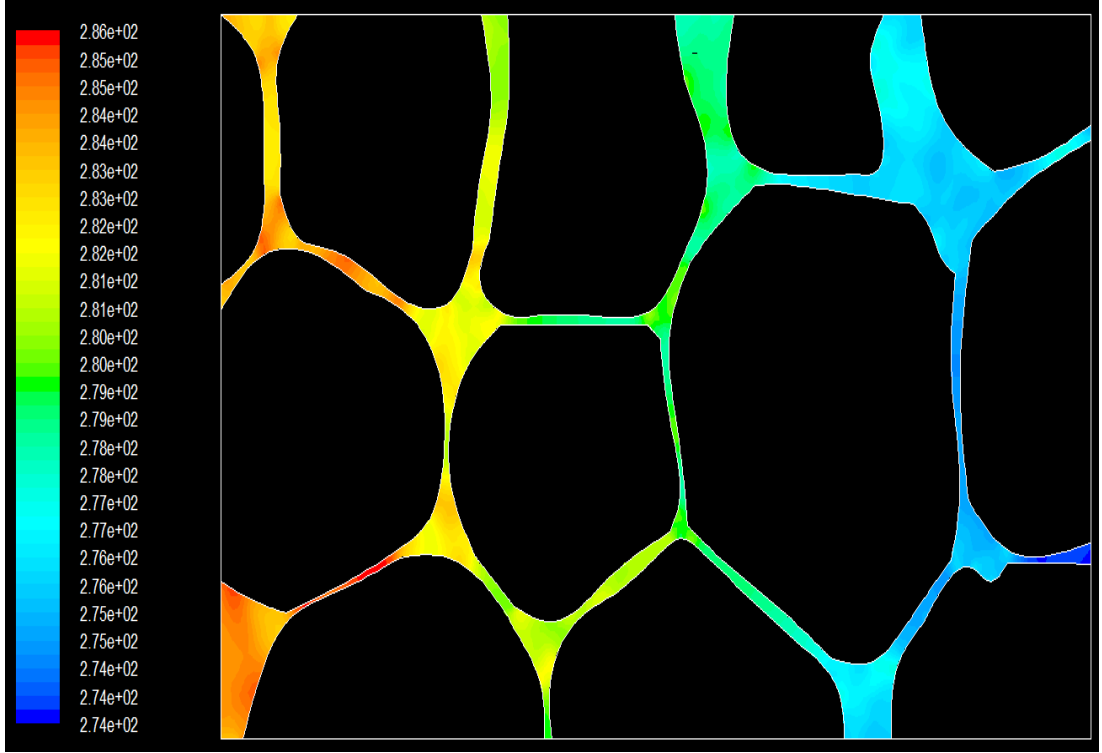
Şekil E2.14. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri



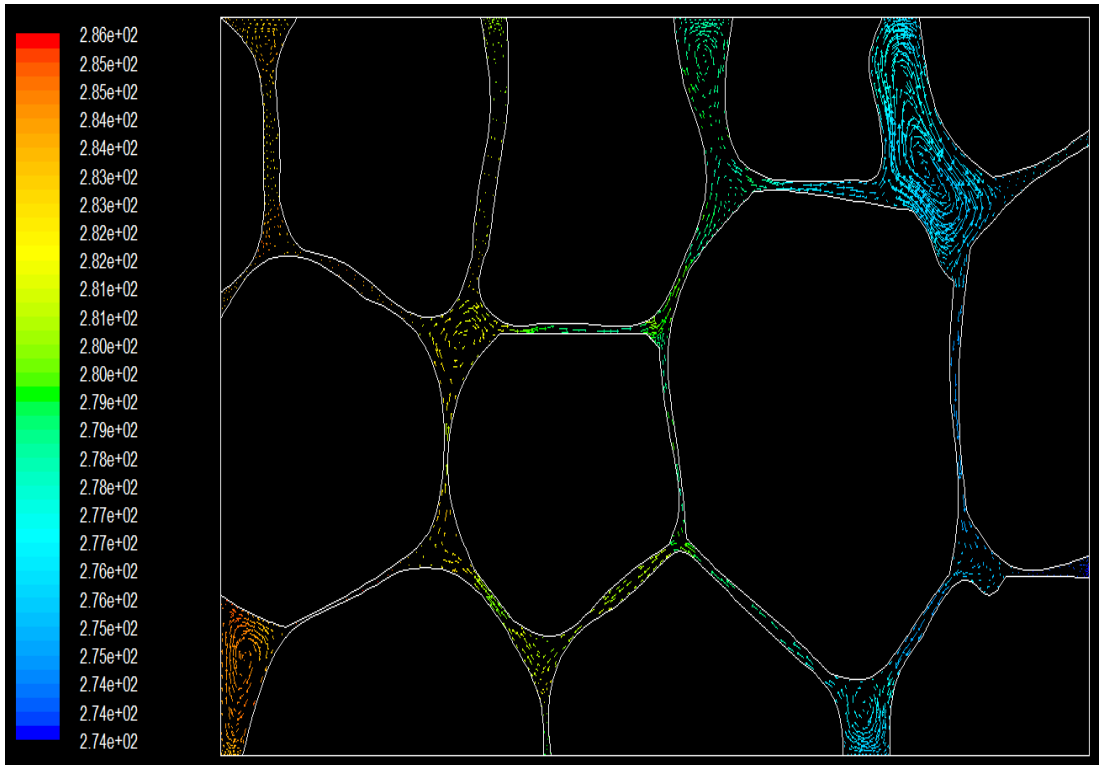
**Şekil E2.15.** Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri



**Şekil E2.16.** Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri

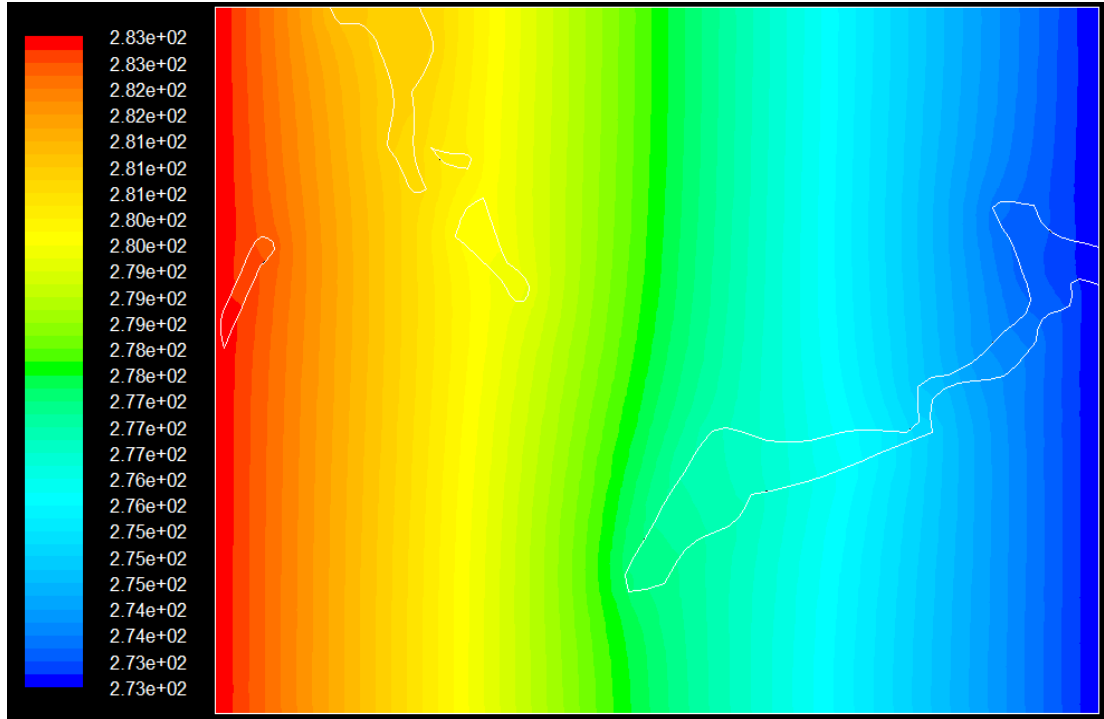


Şekil E2.17. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü

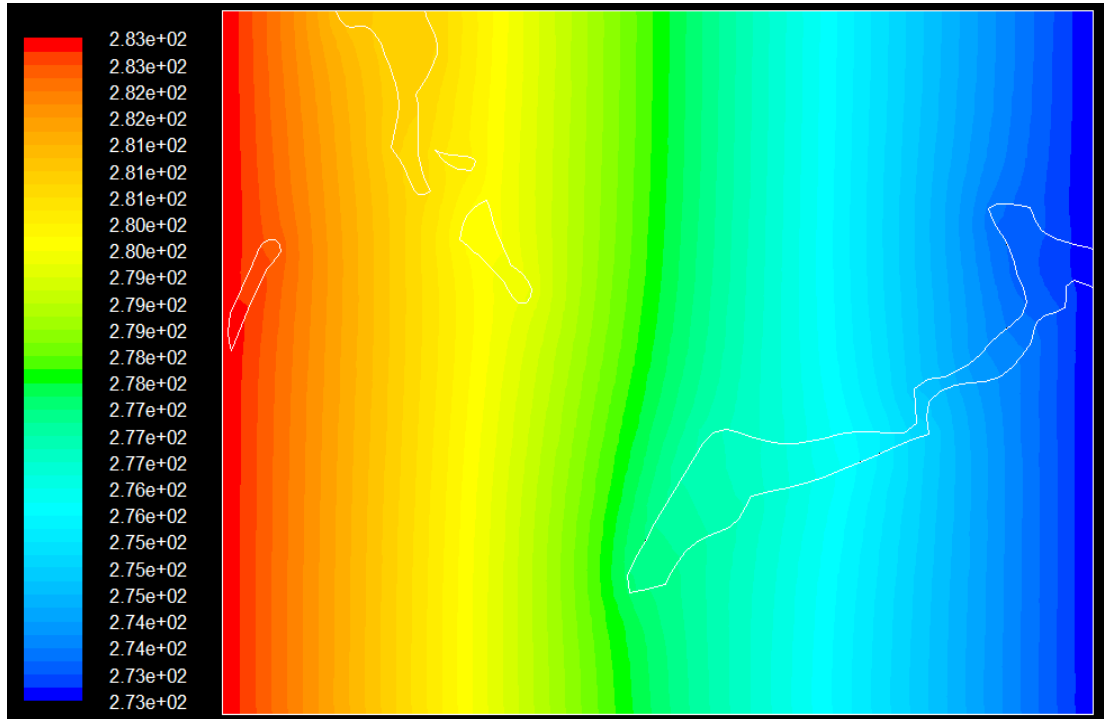


Şekil E2.18. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri

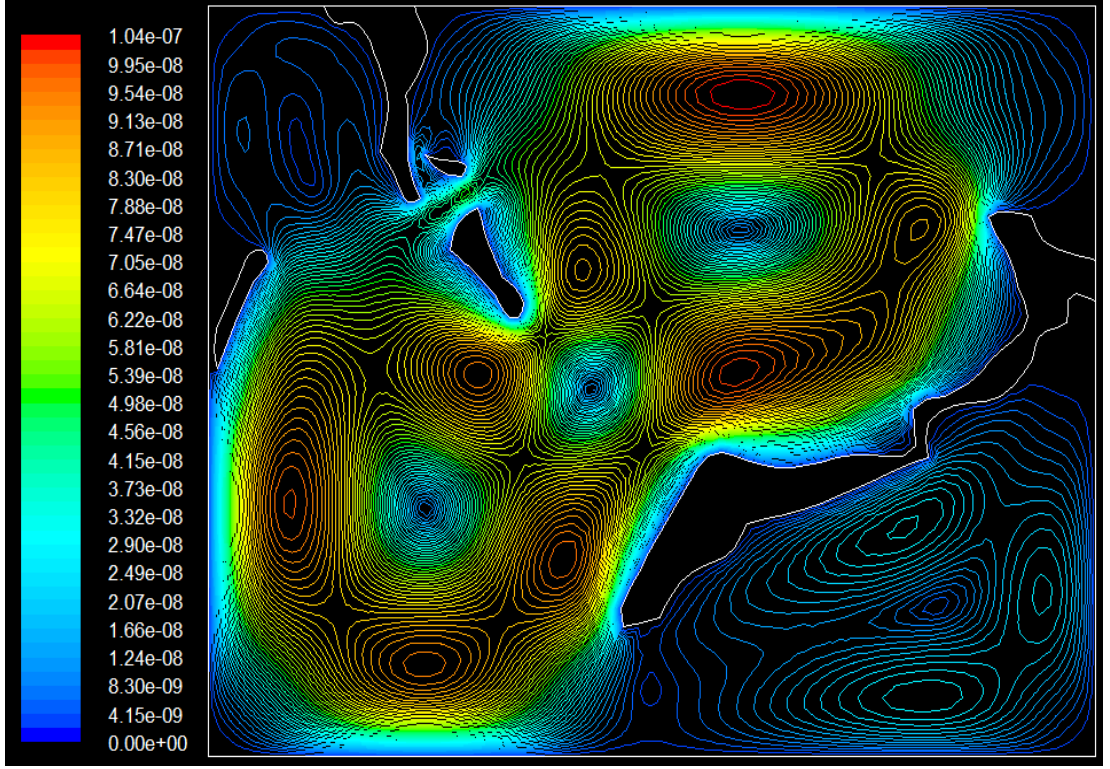
### E3.1.32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Analizi



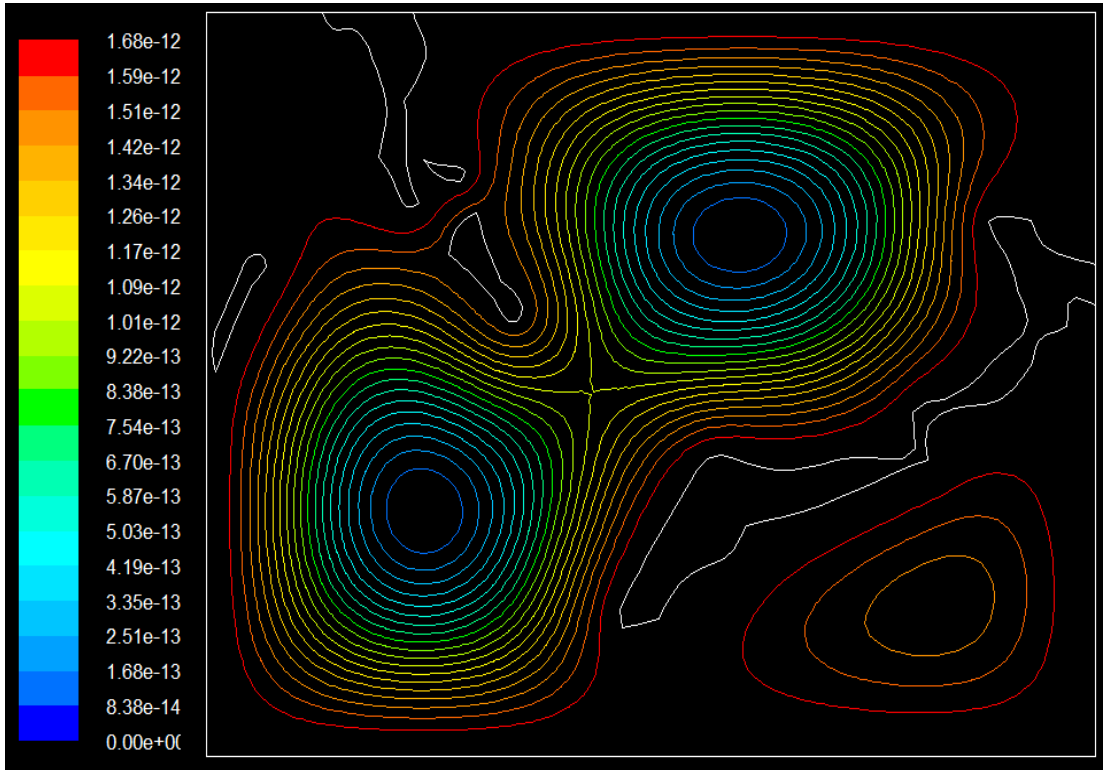
Şekil E3.1. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü



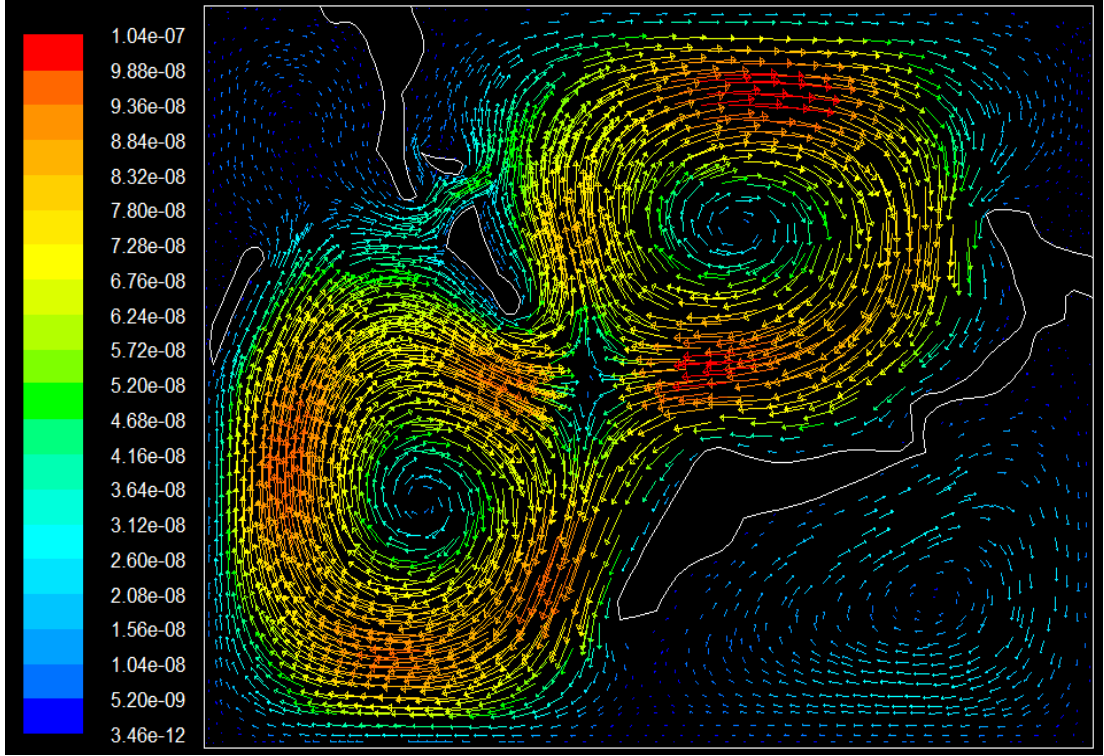
Şekil E3.2. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşınımı Çözümü



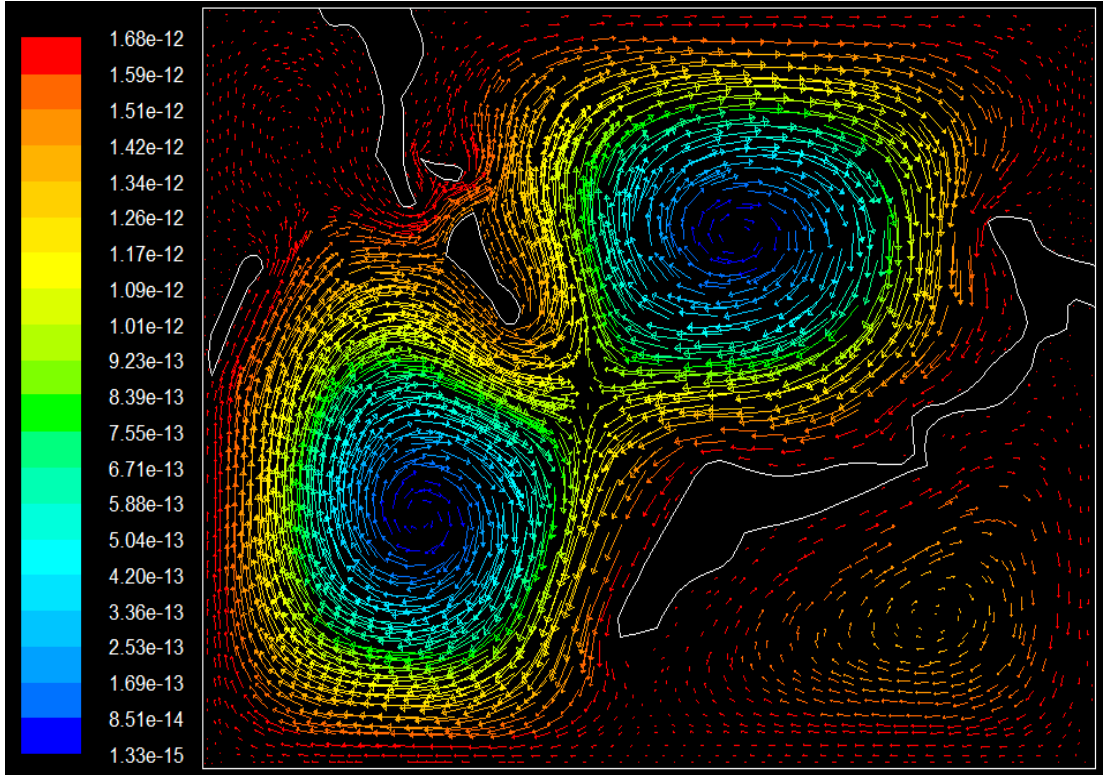
Şekil E3.3. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri



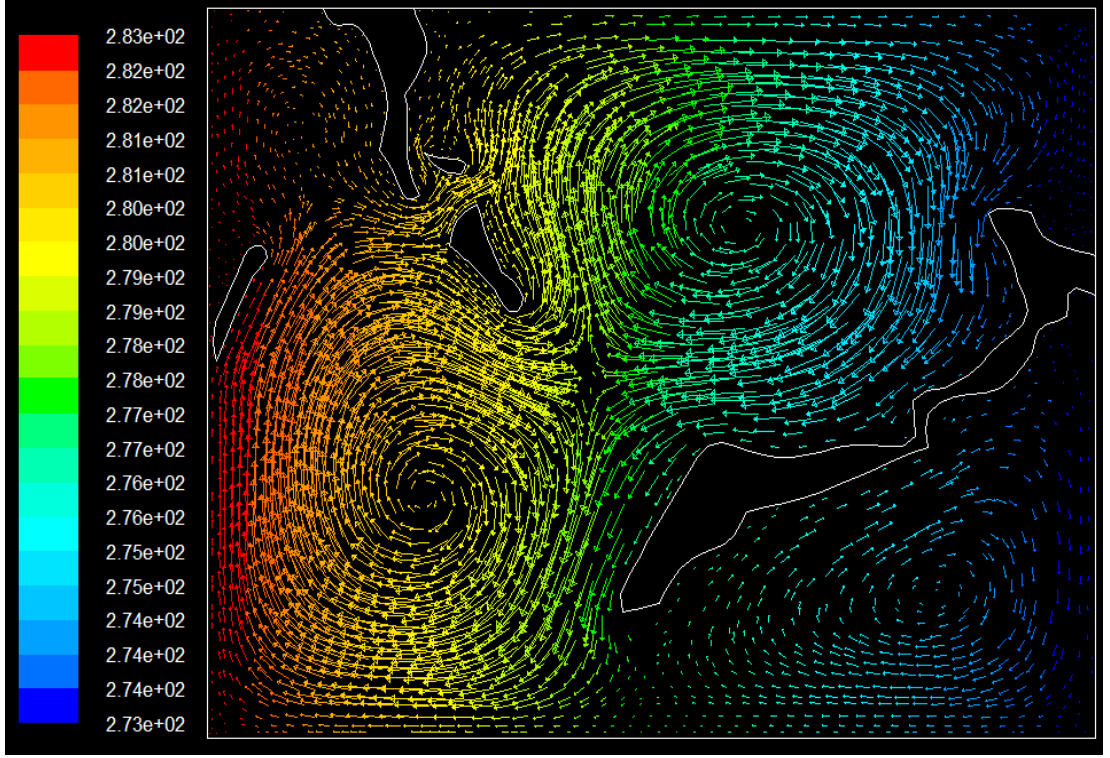
Şekil E3.4. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri



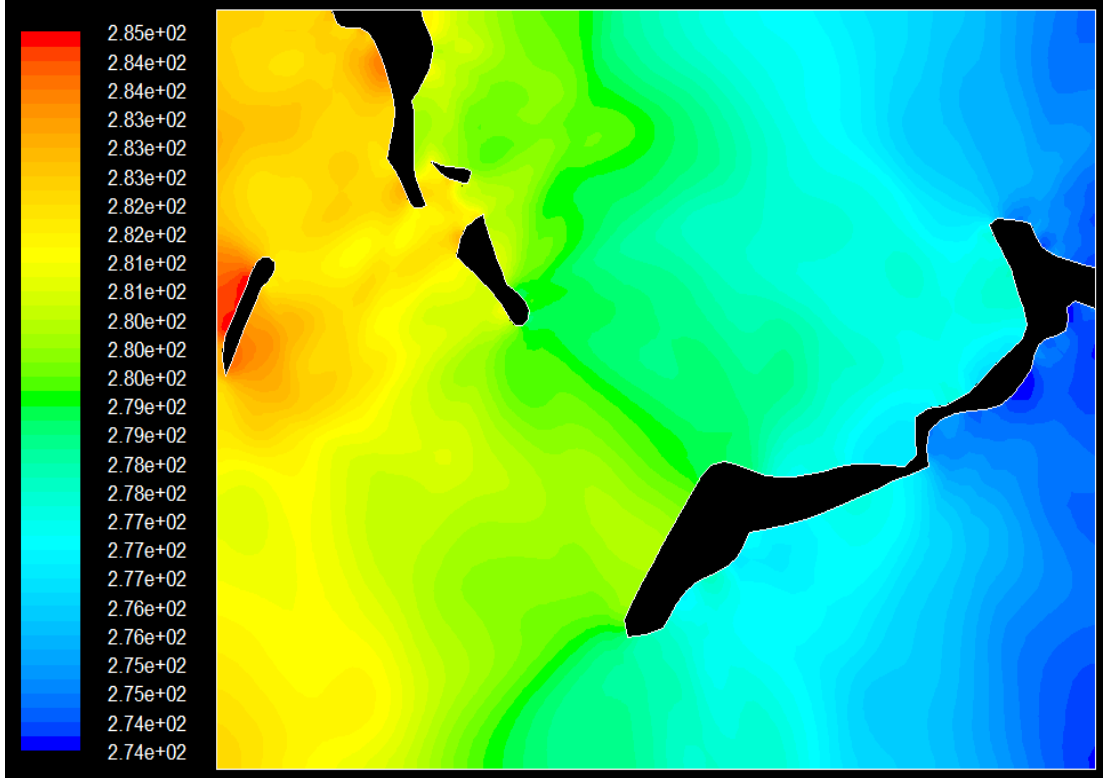
Şekil E3.5. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri



Şekil E3.6. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri

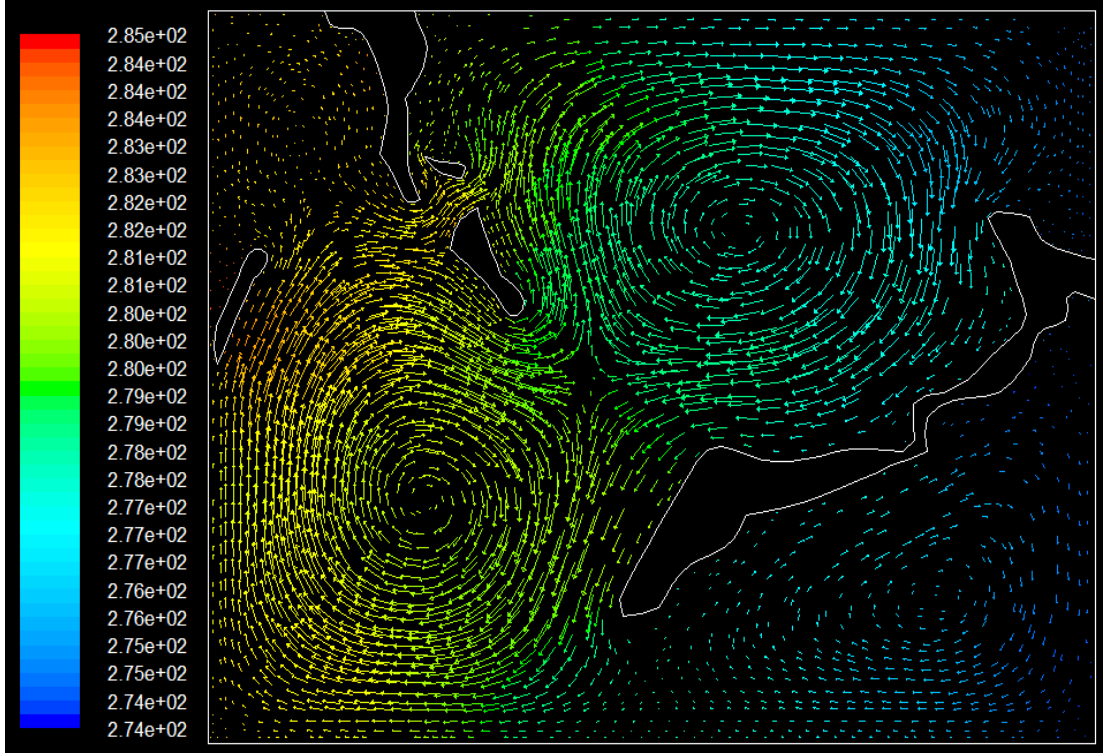


Şekil E3.7. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri



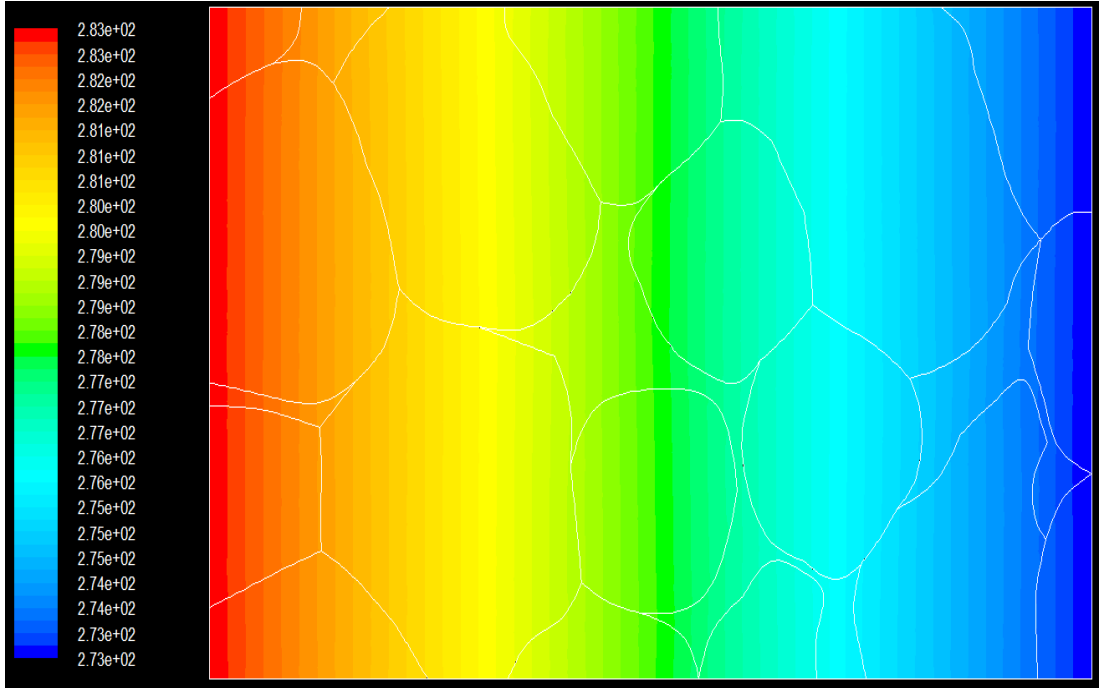
Şekil E3.8. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü



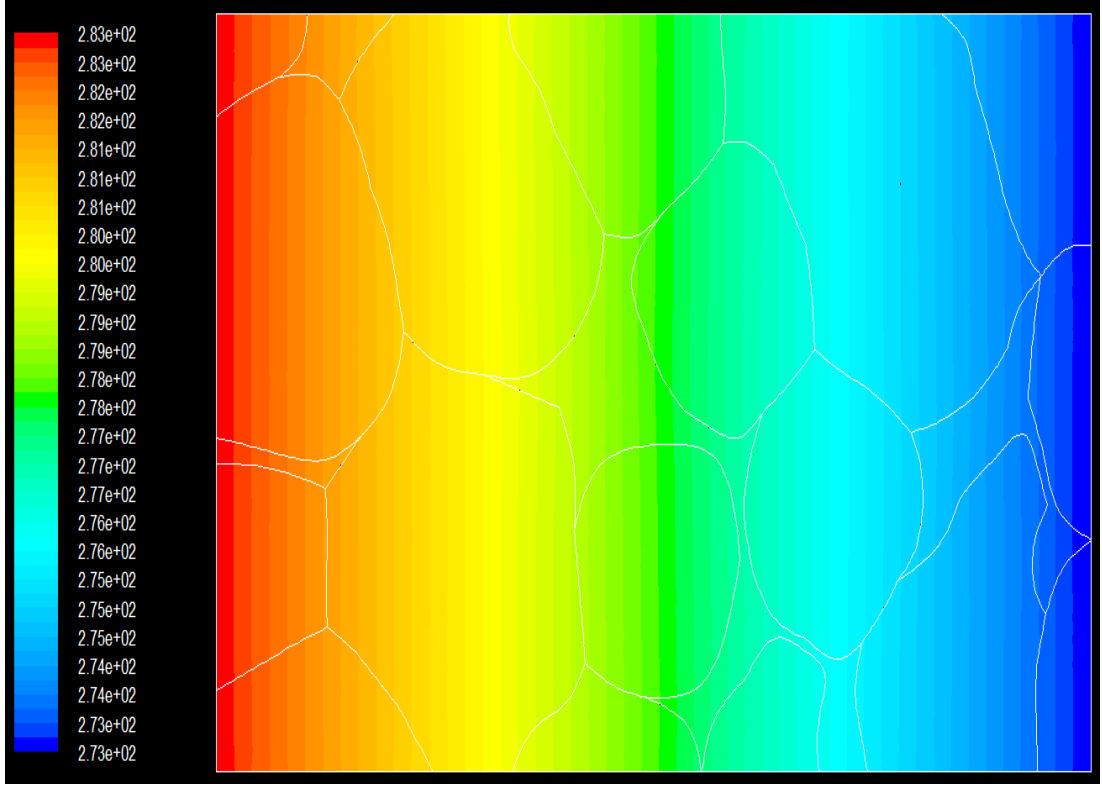


Şekil E3.9. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri

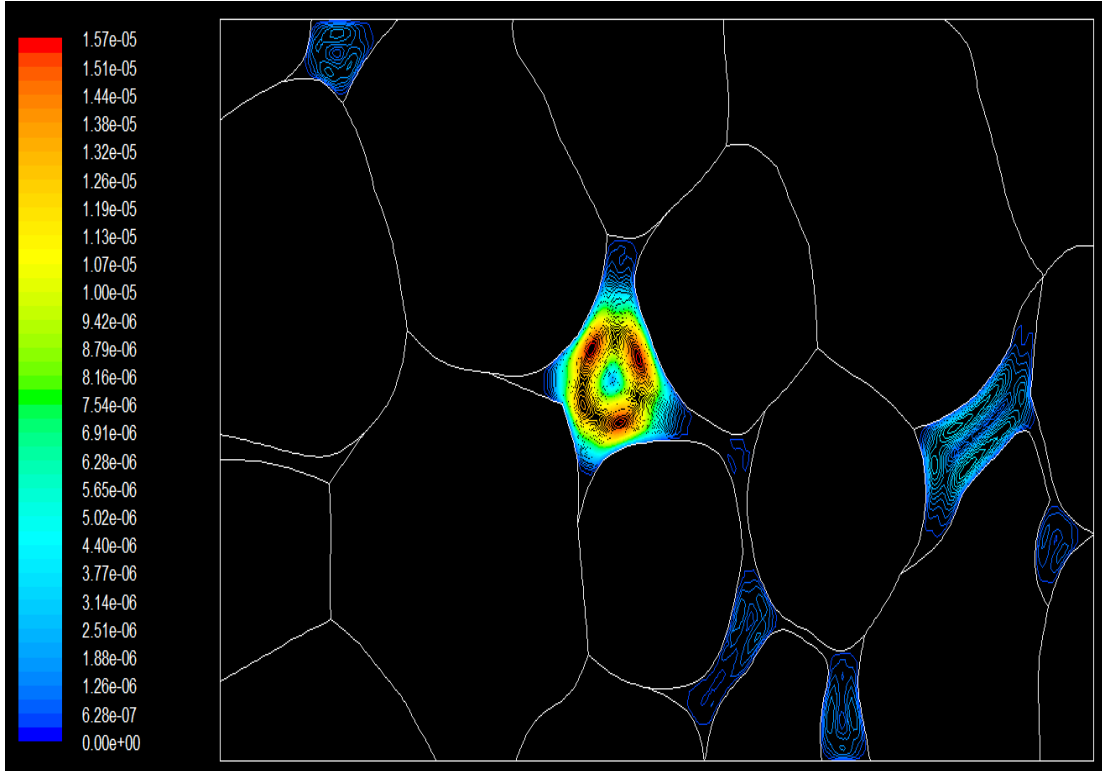
### E3.2.32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Makro Yapı Analizi



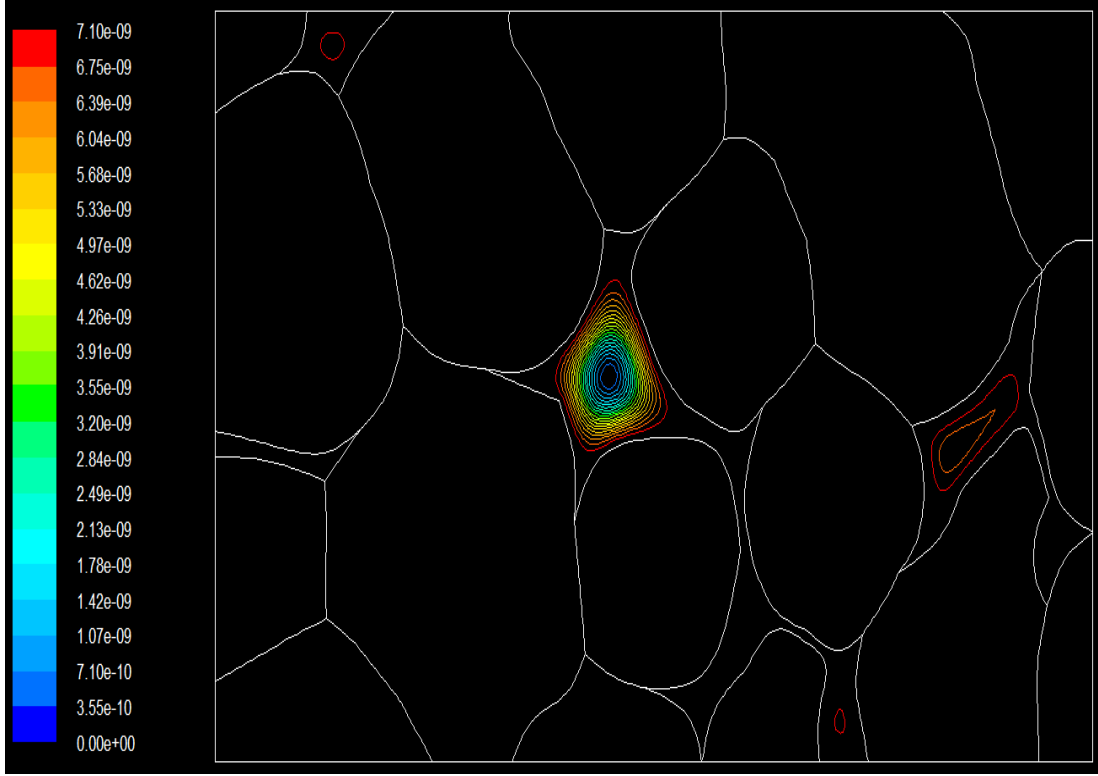
Şekil E3.10. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı İletimi Çözümü



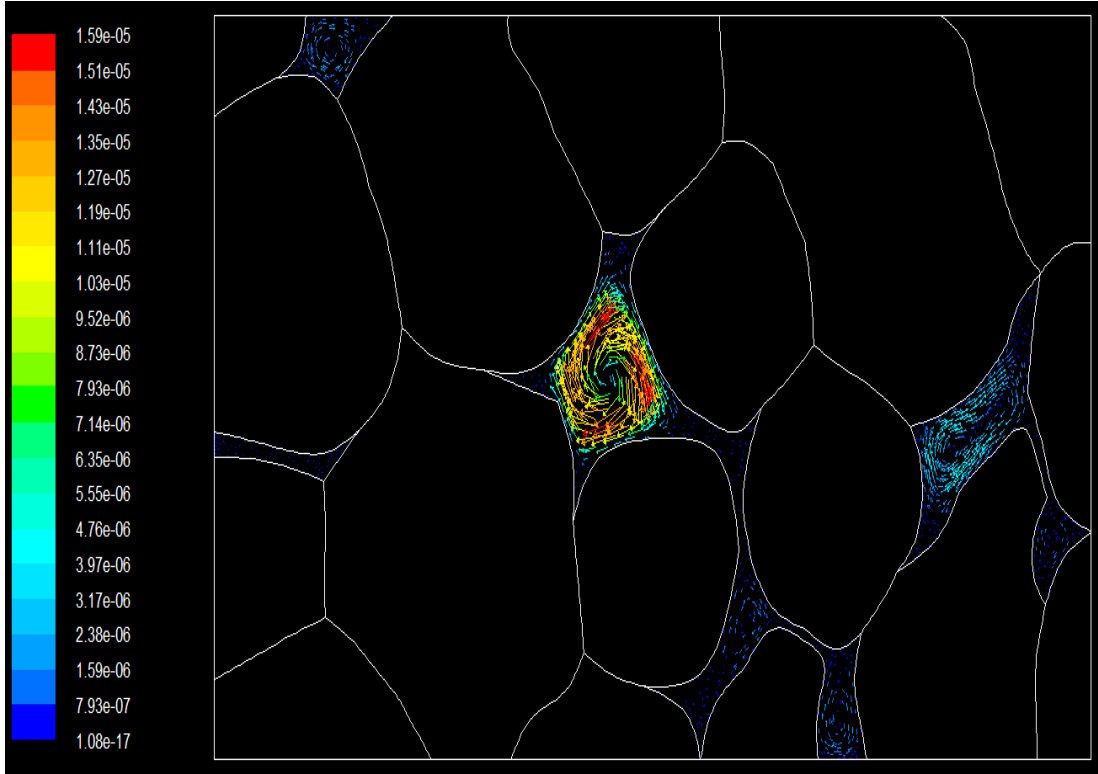
**Şekil E3.11.** Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Taşımını Çözümü



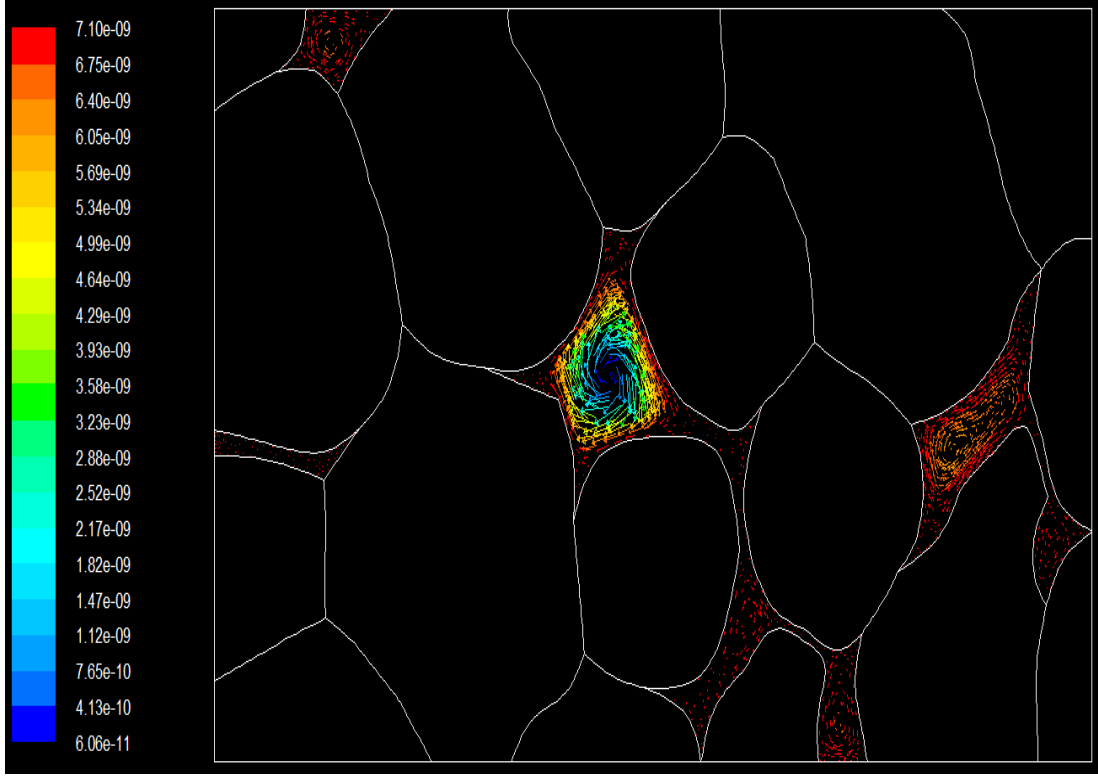
**Şekil E3.12.** Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Şiddeti İzoterm Eğrileri



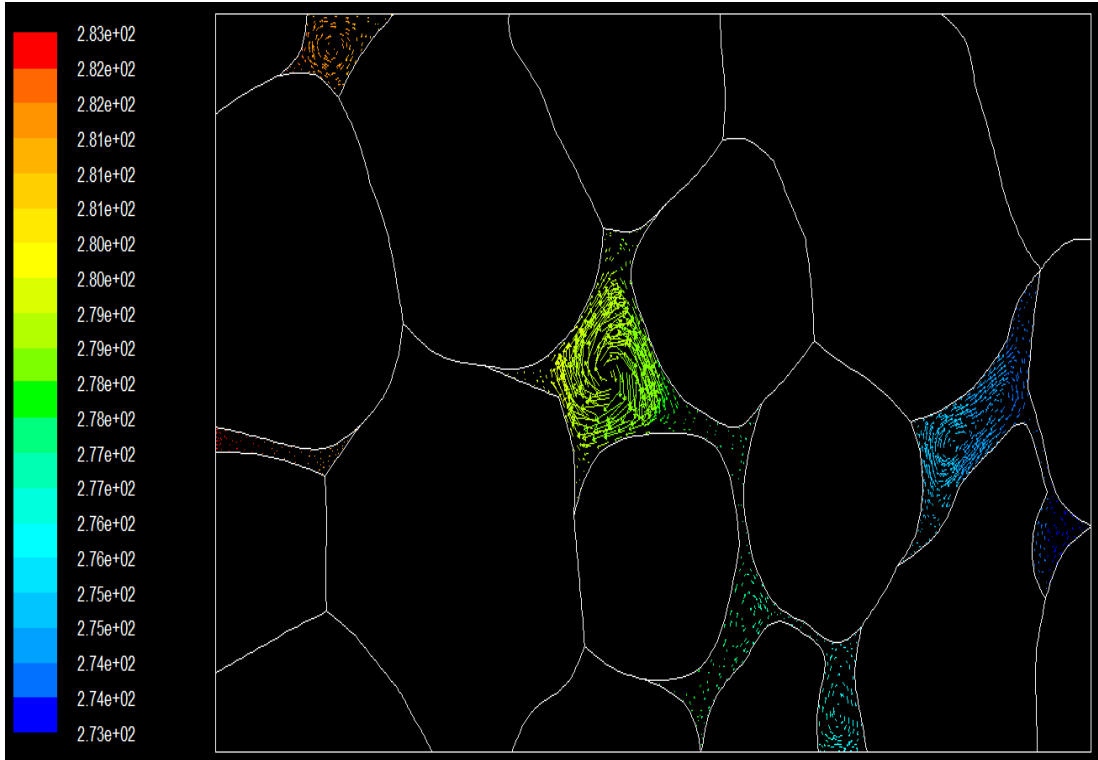
Şekil E3.13. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu İzoterm Eğrileri



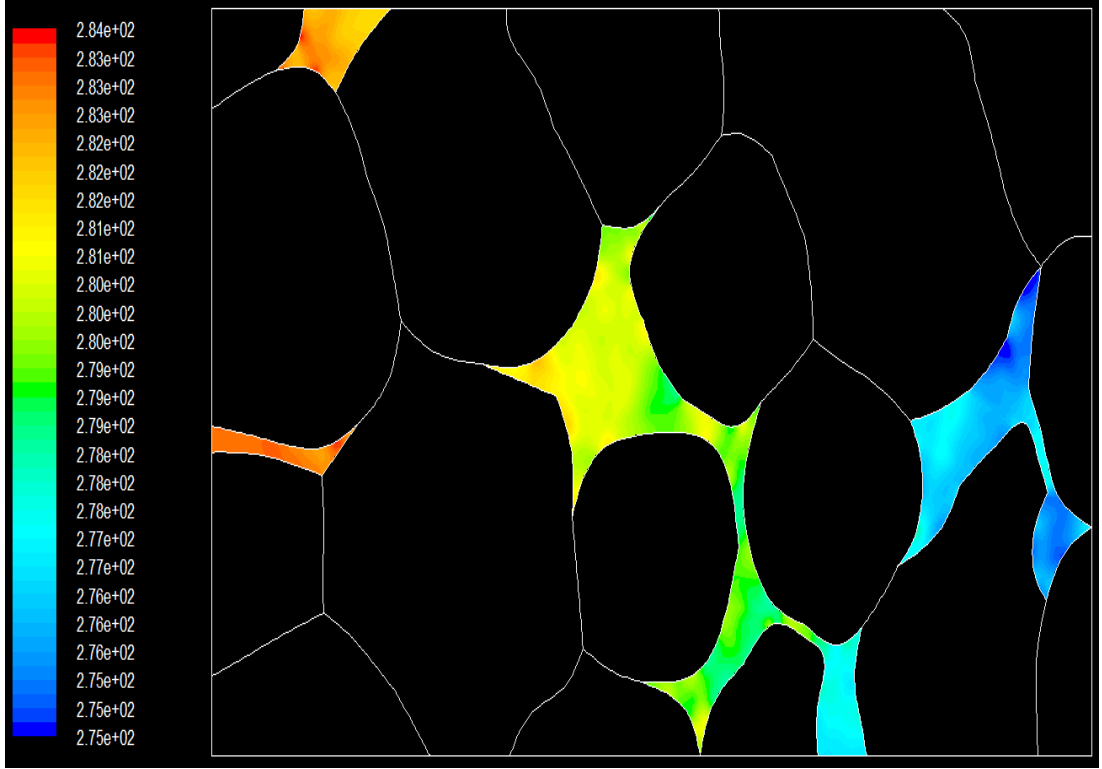
Şekil E3.14. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri



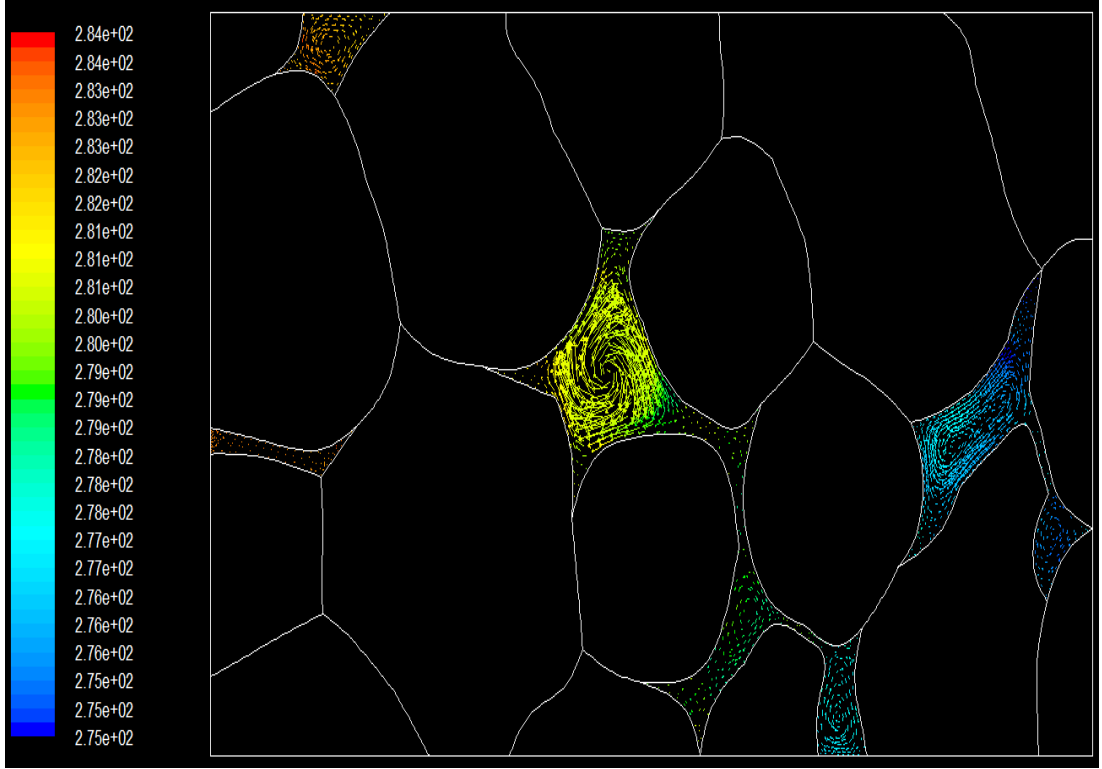
Şekil E3.15. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Akım Fonksiyonu Vektörleri



Şekil E3.16. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Sıcaklık Vektörleri



Şekil E3.17. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Isı Işınımı Çözümü



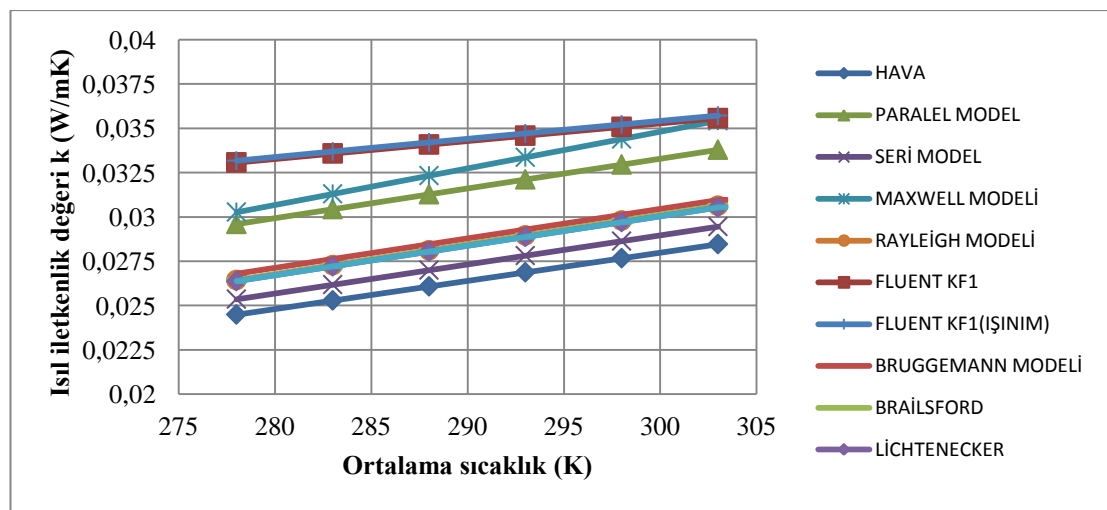
Şekil E3.18. Ortalama 278 K Sıcaklıkta Hız Vektörleri

## EK F

### F.1.18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Sayısal Sonuçlar

Çizelge F.1. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Mikro Yapı Analiz Sonuçları

Transfer Mekanizması	T (K)	q (W)	k <sub>ef1</sub> (W/mK)
İletim	278	0,248574	0,033068
	283	0,504775	0,033576
	288	0,768518	0,034079
	293	1,039713	0,034579
	298	1,318266	0,035074
	303	1,604077	0,035566
Taşınım	278	0,248574	0,033068
	283	0,504775	0,033576
	288	0,768518	0,034079
	293	1,039713	0,034579
	298	1,318266	0,035074
	303	1,604077	0,035566
Işınım	278	0,249320	0,033168
	283	0,506433	0,033686
	288	0,771189	0,034198
	293	1,043506	0,034705
	298	1,323297	0,035208
	303	1,610469	0,035707

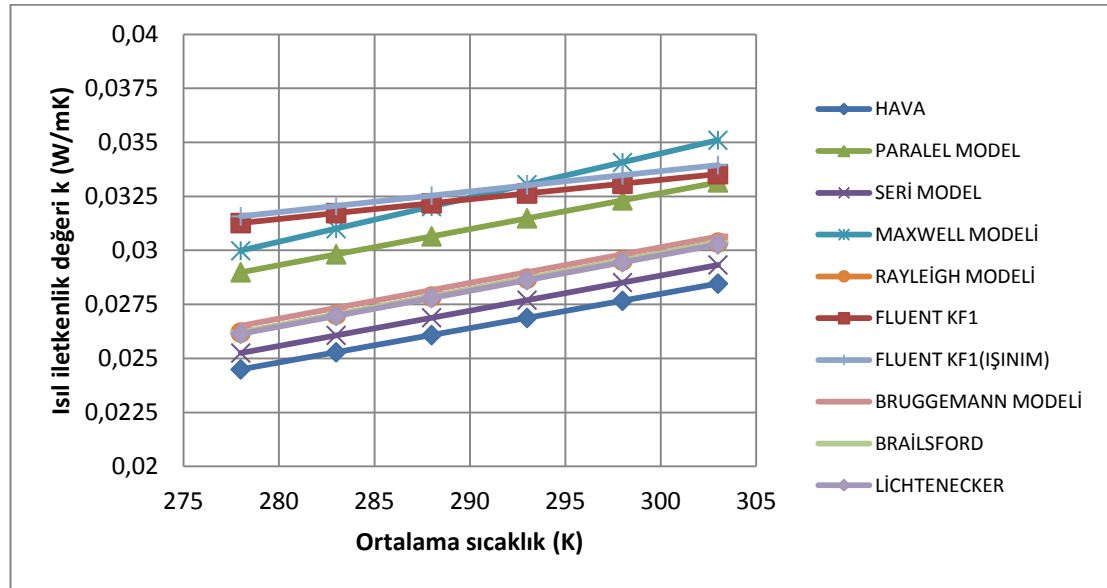


Şekil F.1. 18 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması

## F.2.22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Sayısal Sonuçlar

Çizelge F.2. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Mikro Yapı Analiz Sonuçları

Transfer Mekanizması	T (K)	q (W)	k <sub>ef1</sub> (W/mK)
İletim	278	0,234489	0,031265
	283	0,475881	0,031725
	288	0,724099	0,032182
	293	0,979064	0,032635
	298	1,240685	0,033084
	303	1,508867	0,033530
Taşınım	278	0,234489	0,031265
	283	0,475881	0,031725
	288	0,724099	0,032182
	293	0,979064	0,032635
	298	1,240685	0,033084
	303	1,508867	0,033530
Işınım	278	0,236827	0,031576
	283	0,480891	0,032059
	288	0,732074	0,032536
	293	0,990315	0,033010
	298	1,255545	0,033481
	303	1,527690	0,033948

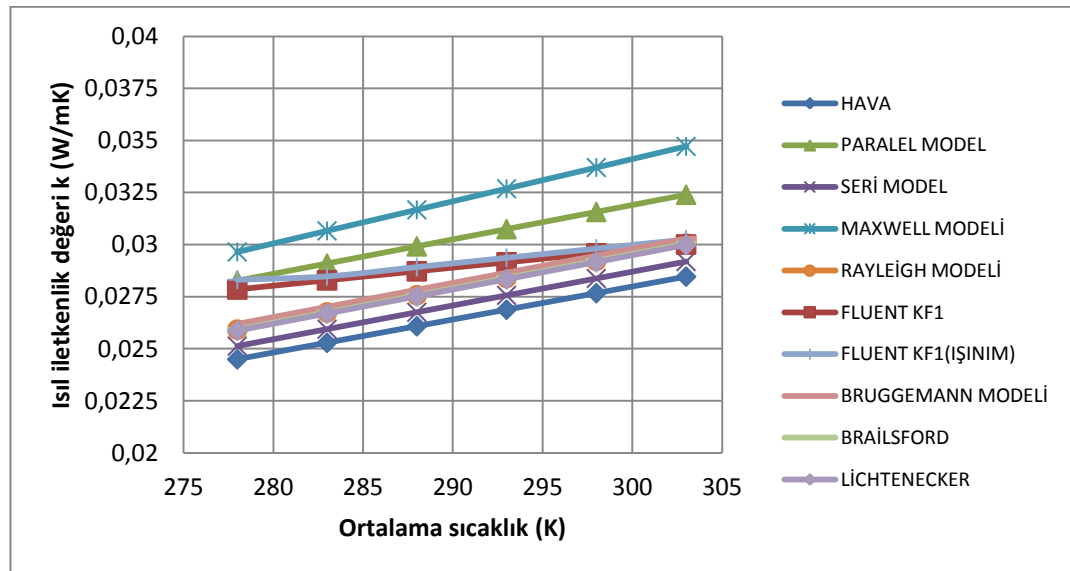


Şekil F.2. 22 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması

### F.3.32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip Mikro Yapı Sayısal Sonuçlar

Çizelge F.3. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS Mikro Yapı Analiz Sonuçları

Transfer Mekanizması	T (K)	q (W)	k <sub>eff</sub> (W/mK)
İletim	278	0,212100	0,027844
	283	0,430883	0,028283
	288	0,656281	0,028719
	293	0,888223	0,029151
	298	1,126639	0,029581
	303	1,371456	0,030007
Taşınım	278	0,212100	0,027844
	283	0,430883	0,028283
	288	0,656281	0,028719
	293	0,888223	0,029151
	298	1,126639	0,029581
	303	1,371456	0,030007
Işınım	278	0,213523	0,028317
	283	0,433877	0,028480
	288	0,661017	0,028926
	293	0,894885	0,029370
	298	1,135422	0,029811
	303	1,382569	0,030250



Şekil F.3. 32 kg/m<sup>3</sup> Yoğunluğa Sahip EPS'nin Literatür Sonuçları İle Karşılaştırılması