GÖZENEKLİ MALZEMELERİN ETKEN ISIL İLETKENLİKLERİ ÜZERİNE MEVCUT ÇALIŞMALAR

Numan YÜKSEL ve Atakan AVCI
Makine Mühendisliği, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Uludağ Üniversitesi 16059 Görükle Nilüfer/Bursa
nyuksel@uludag.edu.tr, atakan@uludag.edu.tr

(Geliş/Received: 20.04.2009 ; Kabul/Accepted: 27.07.2009)

ÖZET

Bu çalışmada, gözenekli maddelerin etken ısıl iletkenliğinin modellenmesine ve/veya tahminine yönelik literatürde mevcut çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalar, literatürde tespit edilen ve farklı uygulamaları kapsayan bazı deneysel sonuçlar dikkate alınarak analiz edilmiştir. Sonuçlar tablo halinde verilmiş ve modeller, uygulanabilirlik aralığı, kullanım kolaylığı ile değişik parametrelerin etkileri açısından değerlendirilmiştir. Sonuçta genel olarak kullanılabilecek bağıntılar elde etmek yerine belirli yapılarda ve belirli gözeneklilik aralığında sınırlı bir hata töleransı ile kullanılabilecek bağıntıları seçmenin önem kazandığı ve özellikle yüksek sıcaklığın etken ısıl iletkenliğine etkisinin çalışılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Isıl iletkenlik, gözenekli malzeme, matematik model.

THE PRESENT STUDIES ON EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITIES OF POROUS MEDIUMS

ABSTRACT

The present studies in literature related to modelling and/or predicting effective thermal conductivities of porous mediums have been reviewed in detail. These studies have been analysed by using some experimental results, including different applications and found in literature. The results are given in Tables, and these models are evaluated in terms of the effects different parameters, applicability interval, and usage convenience. It is concluded that, instead of obtaining relations which can be used generally, choosing of matematical relations to use with finite errors for specific structures and in specific porosity intervals has become important, and particularly, it is concluded that the effect of high temperature on the effective thermal conductivity needs to be studied.

Keywords: Thermal conductivity, porous medium, mathematical model.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğada ve değişik mühendislik uygulamaloarında kompozit malzeme ve/veya gözenekli ortam ile karşılaşılmaktadır. Bu ortamın etken ısıl iletkenliği, yalıtım işlemlerinde, kurutma işlemlerinde, soğutma içeren işlemlerde vb. alanlarda önemli bir özellik olarak görülmektedir. Ayrıca etken ısıl iletkenliği, bu tür malzemelerin ısıl tasarımı ve sayısal simülasyonları için önemli özelliklerdendir. Pratik uygulamalarda deneysel veriler yanında analitik veriler de kullanmaktadır. Analitik çözümler, sınırlı sayıda parametre içeren fiziksel yasalar kullanılarak türetilen matematik modellere dayanmaktadır. Herhangi bir modelin doğruluğu ise, ele alınan fiziksel özelliklerin doğruluğuna, kabullere, parametrelere ve diğer faktörlere bağlıdır. Deneysel verilerin maliyetli olması, malzemeye bağlı zorluklar içermesi ve uygulama kolaylığı açısından değişik parametrelere bağlı olarak ısıl iletkenliği verecek bağıntılara ihtiyaç gerekmekte ve bu amaçla çalışmalar yapılmaktadır.

Etken ısıl iletkenliğin tahmini için geliştirilen bağıntıların çoğunluğu malzemeyi oluşturan maddelerin ısı iletkenliği ile hacim oranlarını diğer bir ifade ile gözenekliliği kullanmaktadır. Bazı modeller ise ilave olarak yapıdaki bileşenlerin veya gözeneklerin şekil, boyut, düzen, sıcaklık, temas etkisi veya faktörü gibi ilave parametrelerden bazılarını da dikkate almaktadır. Bu çalışmada etken ısı iletkenliğin tahmini için kullanılabilecek matematik modeller basitten genele doğru incelenmiş ve değişik maddelerde ve özelliklerde elde edilmiş deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. ISIL İLETKENLİK MODELLERİ (THERMAL CONDUCTIVITY MODELS)

Literatür, heterojen ve kompozit malzemelerin ısıl iletkenliği tanımlamak için birçok model içermektedir. Önerilen bazı modeller yüksek oranda belirli malzeme ve grubuna ait özelliklerini içermektedir. Bazı modeller de, temel modellerden (Maxwell gibi) türetilmektedir veya ampirik olarak elde edilmektedir. Daha fazla parametre etkisini dikkate alan çalışmalar artmaktadır. Bununla beraber uygulama kolaylığı da önemli olup kolay ve genel uygulanabilir bir model bulunmamaktadır. Gözenek yapısı, gözenekteki fazlar, gözenek büyüklüğü, açık veya kapalı olamaması veya oranı gibi parametrelerin varlığı ve doğru olarak tanımlanmasının zorluğu dikkate alınırsa problemin güçlüğü daha iyi anlaşılabilir. Ayrıca birkaç modelden elde edilen sonuçtan hangisinin daha doğru olduğunu tahmin etmekte zordur. Bunun için modelin önerilen uygulama yeri ve aralığını dikkate almak daha doğrudur.

Literatürdeki birçok etken ısıl iletkenlik modeli, temel yapısal modellerin bir veya birkaçına dayanmaktadır. Bunlar özellikle seri, paralel modeller, geometrik ortalama model, farklı formları ile Maxwell modelleri ve efektif ortam modelleridir.

2.1. Seri ve Paralel Modeller (Series and Parallel Models)

İki bileşenli bir malzeme için en basit bağıntı, bileşenlerin hacim oranlarına uygun olarak ısı akışı yönüne paralel veya seri yerleştirilmiş kompozit duvar yaklaşımına dayanır. Bu yaygın ve kolay uygulanabilir bir yaklaşımdır. Paralel ve seri modeller, bileşenlerin hacim oranları ve ısıl iletkenlikleri bilinen herhangi bir heterojen malzemenin etken ısıl iletkenliği için maksimum ve minimum sınırları tanımlar. Bu sadece iletimle ısı transferi mekanizmasını içerir. Sıcaklık farkı az olan uygulamalarda etken ısıl iletkenliği bu iki sınır arasında değişir. Paralel ve seri model, ağırlıklı aritmetik ortalama ve harmonik ortalama şeklinde de verilmektedir [1, 2, 3, 4, 5]. Daha fazla bileşen için benzer olarak ortalama yazılabilir [6]. Buna göre paralel model,

$$k_{e(II)}=(V_f.k_f)+(\varepsilon.k_m) \qquad (1)$$

ve seri model,

$$k_{e(\perp)}=[(V_f/k_f)+(\varepsilon/k_m)]^{-1} \qquad (2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada k_m, k_f ve ε, sırasıyla sürekli fazın ısıl iletkenliği, dolgu fazının ısıl iletkenliği ve gözeneklilik olarak verilmektedir.

2.2. Geometrik Ortalama Model (Geometric Mean Model)

İki bileşenli gözenekli bir malzemede etken ısıl iletkenliği, bileşenlerin ısı iletkenliği ile hacim oranlarına bağlı olarak ağırlıklı geometrik ortalaması ile verilmektedir [4, 7, 8, 9]. Buna göre etken ısıl iletkenliği,

$$k_e=k_m^{\varepsilon}.k_f^{(1-\varepsilon)} \qquad (3)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Daha çok bileşen (gaz, sıvı, katı) için genel ilişki aşağıdaki gibi verilebilir [10]:

$$k_e=\prod_{i=\varepsilon,f,K} k_i^{V_i} \qquad (4)$$

Burada k_e, etken ısıl iletkenliktir. V_i ve k_i farklı fazların hacim oranları ve ısıl iletkenlikleridir. Ayrıca bu model, sürekli ve süreksiz ortam iletkenliklerinin (k_m, k_f) seri ve paralel model olarak ele alınmasıyla genişletilmiştir [11].

2.3. Maxwell Modeli (Maxwell Model)

Maxwell [12] yaklaşımına göre bir kompozit yada gözenekli yapıda dağılı haldeki fazların birbirleri ile temazsız olduğu kabul edilir [13]. Bu kabulden dağılı fazın asla sürekli iletim yollarını oluşturmadığı anlaşılmaktadır. Maxwell modelinde ısı iletimi, sürekli faz yönünde maksimum eğilim içindedir. Maxwell, potansiyel teoriyi kullanarak, homojen ortamda gelişigüzel dağılı ve etkileşimsiz homojen kürelerin etken ısı iletkenliği için [3, 4, 14],

$$k_e=k_m\left[\frac{2k_m+k_f-2(k_m-k_f).V_f}{2k_m+k_f+(k_m-k_f).V_f}\right] \qquad (5)$$

bağıntısını elde etmiştir. Burada V_f dağılı fazın hacim oranıdır ve (1-ε) olarak ta ifade edilebilir. Bu model dağılı fazın düşük konsantrasyonu halinde etken ısıl iletkenliğini daha iyi tahmin etmektedir. Yüksek konsantrasyonlarda ise başlangıçta yapılan kabullerden dolayı sapma artmaktadır [14]. Maxwell modelinde iki bileşenden birinin gözenekliliği 0,25'i ve ısıl iletkenlik oranı (k_f / k_m) 10'u aşmadığı zaman sonuçların güvenilir olduğunu belirtmektedir [7]. Ayrıca, bu denklem Hashin ve Shtrikman tarafından iletkenlik sınırları olarak şeklinde sunulmaktadır [14]. Bunun yanısıra bu denklem, akışkan ve katı sürekli ortamlar ele alınarak [15] yada sürekli ve süreksiz ortam olabilmesi açısından iki farklı formda verilebilmektedir [16]. Ayrıca bazı çalışmalarda denklemdeki 2 sayısı yerine $[f^2/(1-f^2)]$ veya (n-1) parametreleri tanımlanarak modifiye edilmiştir [16, 17, 18, 19].

2.3.1. Nielsen Modeli (Nielsen Model)

Nielsen'e [20] göre bir kompozit malzemenin ısıl iletkenliği, matriks ve dolgu fazının ısıl iletkenliği (k_m ve k_f) ile hacimleri arasındaki ilişki,

$$k_e = k_m \left[\frac{(1 + AB\,V_f)}{|1 - \beta B\,V_f|} \right] \tag{6}$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada B ve β parametreleri, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$B = k_m \left[\frac{((k_f/k_m) - 1)}{((k_f/k_m) + A)} \right] \tag{7}$$

ve

$$\beta = 1 + \left[(1 - V_M)/V_M^2 \right].V_f \tag{8}$$

Burada V_M dolgu fazının maksimum yığın hacmidir ve değeri, parçacıklara bağlı olarak verilmektedir. A ise dolgu parçacıklarının geometrisine bağlı boyutlu şekil faktörüdür. A parametresi, çeşitli özelliklere sahip katı ve sıvı mevcut elemanlar için verilmiş olan genelleştirilmiş Einstein katsayısı (k_E) ile ilişkilidir. A değeri, bazı parçacıklar için 2 ve 0,5 olarak verilmektedir [20, 21]. Pezzotti ve ark.'nın makalesinde [22] Alüminyum nitrit/polystyrene kompozit örneklerin oda sıcaklığındaki ısıl iletkenliği yukarıdaki gibi verilirken bazı çalışmalarda [23, 24] farklı formlarda yer almaktadır. Bunun yanısıra polimer kompozitlere A şekil faktörü verilerek bu model uygulanmaktadır [4, 25].

2.3.2. Halphin-Tsai Modeli (Halphin-Tsai Model)

Tek yönlü faza sahip bir kompozit tabaka için benzer bir model aşağıdaki gibi verilmektedir [26]. Bu denklem, farklı bir çalışmada tekyönlü kısa lif kompozitlerin ısıl iletimini tanımlamak için kullanılmıştır[25].

$$k_e = \frac{1 + 2.\alpha.\mu.V_f}{1 - \mu.V_f}.k_m \tag{9}$$

Bu bağıntıdaki $\alpha = (k_f/k_m)$ ve μ,

$$\mu = \frac{(k_f/k_m) - 1}{(k_f/k_m) + 2(L/d_f)} \tag{10}$$

şeklinde tanımlanır. Burada d_f, lif çapıdır. Lif takviyeli kompozit malzemelerin enine ısıl iletkenliği için de Halphin-Tsai eşitliği kullanılmaktadır [27, 28]. Burada $2(L/d_f)$, ξ ile tanımlanarak,

$$\log \xi = \sqrt{3} \log \left(\frac{a}{b} \right) \tag{11}$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada a ve b ısıl iletkenliğin lif eksen yönüne paralel ve dik yönde ölçüm verileridir.

2.3.3. Levy Modeli (Levy Model)

Maxwell-Eucken modeline dayanan sürekli ve dağılı haldeki faz ayırımını belirgin hale getiren bir modeldir [29]. Rijit modeller arasında verilen Levy modeli [16, 17],

$$k_e = k_f \left[\frac{2k_f + k_m - 2(k_f - k_m)F}{2k_f + k_m + (k_f - k_m)F} \right] \tag{12}$$

şeklinde tanımlanır. Bu bağıntıdaki F,

$$F = 0{,}5 \left[\left(\frac{2}{G} \right) - 1 + 2V_f - \sqrt{ \left((2/G) - 1 + 2V_f \right)^2 - (8V_f/G) } \right] \tag{13}$$

bağıntısı ile verilmektedir. Bu bağıntıdaki G,

$$G = \frac{(k_f - k_m)^2}{(k_f + k_m)^2 + (k_f k_m / 2)} \tag{14}$$

şeklinde verilir. Bu ifadede ki k_e, k_e (k_i, v_i, F) bağıntısı olarak verilmektedir. Bu parametreler farklı çalışmalarda farklı sembollerle gösterilse de genel ilişki aynıdır [2, 31]. Becker ve Fricke'in çalışmasında [30] bağıntı, V_f'in parametrik tanımı ile birlikte verilmektedir.

2.4. Efektif Ortam Teori (EMT) Modeli (The Effective Medium Theory Model)

Bu modelde sürekli ve dağılı faz ile iki bileşenden oluşan, fazın gelişigüzel dağıtılmış olduğu heterojen malzemede, bileşenlerin bağıl miktarlarına bağlı olarak bileşenlerden birinin sürekli ısı iletim yolları oluşturduğu ve sürekli fazı temsil ettiği kabul edilmektedir [32, 33, 34]. Bu model (EMT), rijit modellerde ($k_e = k_e(k_i, v_i)$) genel form ile tanımlanmakta[14, 16, 17] ve birçok bileşene sahip malzeme için genel olarak,

$$\sum_i v_i . \frac{k_i - k_e}{k_i + 2k_e} = 0 \tag{15}$$

şeklinde verilmektedir. İki bileşen için bu genel ilişki aşağıdaki denklem şeklinde açık olarak yazılabilir.

$$k_e = \frac{1}{4}\left[(3\varepsilon - 1)k_m + (3(1-\varepsilon) - 1)k_f + \sqrt{\left[(3\varepsilon - 1)k_m + (3(1-\varepsilon) - 1)k_f\right]^2 + 8k_m k_f}\right] \quad (16)$$

Burada k_m ve k_f, sürekli faz (olarak havanın) ısıl iletkenliği ve dağılı faz (olarak yoğuşan) sıvının ısıl iletkenliği ile tanımlanmaktadır. Bu model, Xue ve ark. çalışmasında [35] Bruggeman'ın efektif ortam teori modeli olarak verilirken Belova ve Murch [5] ise Brailsford ve Major model olarak kullanılmaktadır.

Bu model, alt ve üst sınır olarak bazı çalışmalarda tanımlanmaktadır [16, 18]. Gıdaları gaz ve yoğuşan fazın (katı ve/veya hareketsiz sıvı) ikili karışımı şeklinde varsayarak isotropik dış gözenekli malzemelerin etken ısıl iletkenliği için EMT modeli ile üst sınır değerleri, isotropik iç gözenekli malzemeler için ise EMT modeli ile alt sınır değerleri elde edilmektedir. EMT model'in modifiye edilmiş hali ise, parametreler (F, n gibi) ilave edilerek esnek modeller (k_e= $k_e(k_i, v_i, F)$) formunda verilmektedir [16, 18]. Efektif ortam teori modelindeki 2 sayısı yerine modifiye edilmiş EMT modelinde Carson [18] $[F/(1-F)]$ ifadesini kullanırken Kirkpatrick [33] ise 2 yerine $[0,5F-1]$ ifadesini kullanmaktadır. Burada F ampirik parametredir veya dağıtım oranıdır. Cernuschi ve ark. [8] F için (d-1) kullanmaktadır. Burada d, boşluk boyutudur.

2.5. Krischer Yaklaşımı (Krischer Approach)

Bu yaklaşım karmaşık bir yapıyı daha basit yapıların karışımı olarak ele almaktadır. Burada daha basit yapıların her birinin bağıl miktarları ampirik olarak tanımlanarak karışımın ısıl iletkenliği belirlenmektedir [36]. Krischer, birleşik yapının etken ısıl iletkenliğini seri ve paralel iletkenliklerin ağırlıklı harmonik ortalaması olarak tanımlamaktadır [14, 16, 18]. Bu sınırlar arasında ağırlık oranı dağıtım faktörü (F) ile tanımlanmaktadır. Esnek modeller arasında verilen Krischer modeli $k_e = k_e(k_i, v_i, F)$ formunda aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [16]:

$$k_e = \left[\left(\frac{1-F}{k_{\Gamma}}\right) + \left(\frac{F}{k_{\perp}}\right)\right]^{-1} \quad (17)$$

F parametresi sıfır olduğunda Krischer'in modeli paralel modele indirgenmektedir. F=1 olduğunda ise seri modele ($k_{e(1)}$) ulaşılmaktadır. Bu yüzden 0 ve 1 arasında değerlerle Wiener sınırları ile sınırlı bölgede herhangi bir değer elde edilebilmektedir. Bu yüzden Krischer'in modelinden, F değeri uygun tahmin edilirse kabul edilebilir tahminler beklenebilir. Bu model, gıda mühendisliği literatüründe en fazla kullanıma sahip model olarak verilmektedir. Fakat isotropik modeller için bunun yerine modifiye edilmiş modeller tavsiye edilmektedir[16].

Hamdami ve ark.[37], Maroulis ve ark.'nın [38] tanımladığı gibi, yüksek gözenekliliğe sahip gözenekli gıdanın etken ısıl iletkenliği için Krischer modelini geliştirmişlerdir. Özellikle gözenekli gıda malzemesi, çok bileşenli üç fazlı sistem olarak analiz edilmektedir. Bu sistem, başlangıç donma noktası altında kuru madde, su, buz kristalleri ve gaz fazı (hava ve su buharı içeren) şeklinde karmaşık dört oranın karışımı olarak tanımlanmaktadır. Gıda malzemelerinin açık ısıl iletkenliği yoğuşma-buharlaşma olayı nedeniyle karmaşıktır. Bir başka çalışmada gözeneklerdeki etken ısıl iletkenlik, sıcaklık nedeniyle oluşan gizli ısı taşınımın etkisini dikkate alarak yoğuşma-buharlaşmanın ve havanın ısıl iletkenlikleri ile verilmektedir [39].

Wang ve ark. [31]'nin makalesinde ağırlıklı model, krischer'in yaklaşımını kullanarak F ve (F-1) ağırlık değerlerine sahip beş temelden herhangi birisinin bileşimi ile tanımlanmaktadır. Eğer yapı, beş temel modelden biri ile modellenirse yapının ısıl iletkenliği, bileşenleri ele alınarak hesaplanmaktadır. Bu yapılarının ısıl iletkenliği ile de etken ısıl iletkenlik elde edilmektedir. Örneğin Maxwell-Eucken model 1 + Efektif Ortam Teori model kullanılarak etken ısıl iletkenlik hesaplanabilir.

$$k_e = \frac{k_m V_m \left(\frac{1-2V_f V_{fm}}{2V_m}\right) + k_f V_f V_{fm} \frac{3k_m}{2k_m + k_f}}{V_m \left(\frac{1-2V_f V_{fm}}{2V_m}\right) + V_f V_{fm} \frac{3k_m}{2k_m + k_f}} \quad (18)$$

Burada

$$V_{fm} = (0{,}1353 \ln(k_m/k_f) - 0{,}1193) V_m^3 + (0{,}2551 \ln(k_m/k_f) - 0{,}1711) V_m^2 + (0{,}1203 \ln(k_m/k_f) - 0{,}0523) V_m + 0{,}5$$

şeklinde tanımlanır. ($1 \leq k_m/k_f \leq 100$) aralığında değişmektedir.

Ochs ve ark. [6] da, nemli ve kuru gözenekli malzemelerin ısıl iletkenliği olarak iki tip tanımlanmaktadır. Serbest su doyma noktası altındaki nem içeriklerinde ve 80 °C'ye kadar sıcaklıklarda gözenekli hacim malzemelerin etken ısıl iletkenliğinin detaylı bir tanımı bu model ile verilmektedir. Katı parçacıkların özellikleri ve gözenek oranı hakkında bilgi yanında nem varlığından dolayı gözenek yapısı veya su özellikleri gibi diğer malzeme özellikleri de düşünülmektedir. Nemli gözenekli malzemelerin ısıl iletkenliği, katı, sıvı su, açık ve kapalı gözeneklerdeki nemli hava ve kuru hava içeren seri ve paralel tabakaların ısıl iletkenlikler toplamı olarak ifade edilmektedir.

2.6. Russell Modeli (Russell Model):

Russell [40], elektrik analojisini kullanarak eski model sistemlerinden birini geliştirmiştir. Tavman [4], kompozit malzemelerin ısıl iletkenliği için aşağıdaki gibi vermektedir. Bu model, matriks malzeme içinde dağılı olan aynı boyutlu izole küpler halindeki fazlar varsayımına dayanmaktadır.

$$k_e = k_m \cdot \left[\frac{V_f^{2/3} + (k_m/k_f)(1 - V_f^{2/3})}{V_f^{2/3} - V_f + (k_m/k_f)(1 - V_f^{2/3} + V_f)} \right] \tag{19}$$

Tseng ve ark. [41] ise bu bağıntıyı ışınımla ısı transferinin etkisini ilave ederek tanımlamıştır.

3. MODELLERİN UYGULANMASI (APPLICATIONS OF MODELS)

Etken ısı iletkenliği bulunacak malzemenin özellikleri dikkate alınarak bu çalışmada verilen modellerden sisteme uygun bir model seçilebilir. Bu çalışmada, üstte verilen modeller dikkate alınarak bulunan değerler literatürde farklı gözenekli/katkılı malzemeler için deneysel olarak elde edilen etken ısıl iletkenlik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Modeller sadece bileşenlerin hacim oranları ve ısıl iletkenliklerine bağlı değil aynı zamanda ampirik parametreye bağlı veya bağlı olmaksızın verilmektedir. Bazı modellerde n, F, α gibi tanımlanan parametreleri tahmin etmenin zorluğu nedeniyle hesaplarda sabit bir değer alınmaktadır. Bu çalışmada, Halphin-Tsai Modelindeki (L/d_f) parametresi, Maxwell-Hamilton Modelindeki n parametresi, Nielsen Modeldeki A parametresi, Krischer Modelindeki F parametresi ve diğer modellerdeki parametrelerin 0- 1 aralığında değişmesi gerektiği düşünülerek hesaplarda sabit 0,5 değeri kabul edilerek etken ısıl iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Diğer yandan bu parametrelerin uygun sonuç verebilmesi için alması gereken değer aralıkları Tablo.1'de verilmektedir. Bu tabloya göre herbir yapı için modellerde ki bu parametreler ya deneysel ya da deneyim ile ancak belirlenebilir. Tablo.2'de bu parametre değerlerine göre literatürdeki mevcut modellerin tahmini yapılarak deneysel sonuçlarla birlikte verilmiştir. Diğer yandan modifiye EMT modeli [16, 17], Kirkpatrick Modeli [16, 17], Bruggmen Modeli [8] ve/veya simetrik model olarak Bruggmen Modeli [8] ve Bruggmen'in EMT Modeli [35] gibi modellerde bağıntı kapalı formda olduğundan hesap zorluğu bulunmaktadır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Esas olarak teorik modeller malzemelerin bazı fiziksel ve ısıl parametrelerini dikkate alarak etken ısı iletim katsayısını tahmin etmeye çalışmaktadır. Ancak bu ısıl ve fiziksel parametrelere bağlı hesaplanan değerler ile deneysel sonuçlar arasında oluşan fark genelde dar bir alan dışında kabul edilebilir seviyelerde değildir. Esnek modellerde geçerlilik alanı daha genişletilebilmekte isede bunun için uygulama alanına uygun parametrik değerlerin deneysel olarak veya deneyime göre bilinmesi gerekir. Bu amaçla etken ısıl iletkenlik modelleri (Seri, paralel, Maxwell ve türevi modelleri, Maxwell-Eucken modellerinin iki formu, efektif ortam teori modeli gibi) amaca uygun olarak ve gerekli ise deneysel verileri kullanarak sonuca ulaşılabilinir. Tablo.2'de değişik gözeneklilikte ve değişik malzemelerle elde edilmiş deneysel sonuçlar ile bunların değişik modellere göre hesap sonuçları birlikte verilmiştir. Özellikle yüksek k_f / k_m değerleri ve fazlardan birinin yüksek iletkenlikte olması halinde teorik modeller ile deneysel verilerler arasında sapma büyük olmaktadır. Bazı modellerde faz değişimi yapılarak yapılan çözümlerde benzer sonuçlar vermiştir. Sonuçta, bileşenlerin ısıl iletkenlikleri aralığında modeller, yüksek ve düşük gözeneklilik ve/veya iletkenlik ile verilen yapılar için deneysel verilerle uyum sağlamamaktadır. Bununla birlikte ısı iletkenlikleri yakın olan fazlardan oluşan malzemelerde hesap ile daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir.

Tablo.1. Bazı modeller için parametrelerin aralıkları
(The estimating parameter intervals for some models)

Modeller	Altsınır	Üst sınır
Halphin-Tsai: [L/d_f]	0,32	2644
Halphin-Tsai: [L/d_f]*	0,00469	115
Maxwell-Hamilton:[n]	1,65	23000
Nielsen: [A]	0,27	16000
Krischer:[F]	0,000010	8,14
EMT'in modifiye modeli: [f]	0,290	0,999

*Önerilen model aynıdır, fakat parametreler farklıdır.

Esnek modellerle farklı parametrik değerler kullanılarak daha geniş gözeneklilik aralığında ve ısı iletkenliklerinde daha kabul edilebilir sonuçlar elde etmek mümkündür. Ancak bunun için herbir deneysel sonuca uygun farklı değerler kullanmak gerekmektedir. Burada ele alınan deneysel verilere uygun sonuçlar elde etmek için değişik modellerde alınan parametrik değerlerin aldığı değer aralıkları Tablo.1'de verilmiştir. Bu modeller elverişli görünmekle birlikte parametrenin doğru belirlenmesi gerekir. Fakat bunların aralıkları sınırsız veya geniş olduğundan tahminleri zor olup ya deneysel veri veya ciddi bir tecrubeye ihtiyaç gösterir. Bazı durumlarda bu parametrelerde yeterli sonuç vermeyebilir. Örneğin, Krischer'in modelinin kullanımında F değeri, 0,000010'den 16000'e kadar değişmektedir. Farklı malzeme ve deneylerde bu aralıklarda değişebilmektedir. Ek-1'deki diğer modellerin parametre aralıkları ise Tablo.1'de verilmektedir.

Bu modellerin az bir kısmı sıcaklık değişiminin ve sıcaklık farkının etkisini, nem etkisini dikkate almak için ışınım ve difüzyon etkilerini ilave etmektedir. Ayrıca malzemenin ışınım özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Sonuç olarak etken ısıl iletkenlik için önerilen modeller, genelde yüksek gözenekliliklerde ve düşük iletkenliklerde deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte modellerin iyi cevap verebildiği şartlarda kullanılması, uygun parametrelerin seçimi, malzeme ve özelliklerinin, çalışma şartlarının iyi tanımlanması halinde daha doğru tahminler yapılabilir. Ancak gerçek değerlere uyumluluk ve sapma oranı hakkında bir sonuç elde edilemez. İlave olarak ışınım ve difüzyon etkileri üzerinde daha çok çalışma yapmak gerekmektedir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

A	k_E ile ilişkili boyutsal şekil faktörü
a, b	ölçüm verileri
B, C, D	Gözenekli ortama göre değişebilen parametreler
C_1, C_2	Herbir tip malzeme için farklı sabitler
C_3	polimerli ikinci yapı üzerinde parçacıkların etkisinin ölçüm değeri
C_4	İletken zincirler oluşturmak için parçacıkların tabii ölçüm değeri
c	k_f/k_m iletkenlikler oranına bağlı üs **[10, 58]**
c_f	Baskı faktörü
C/P	Karbon/fenolik
d	Şekil faktörü/boyutu veya fraktal boyut **[75]**
d_f	Lif çapı (m)
E	Isıl iletkenlik boyutlarına sahip sabit
e	Bir değer
ε	Gözeneklilik (%)
EPS	Genişletilmiş polistren yalıtım malzemesi
F	Dağılım faktörü/oranı veya ampriksel parametre
$f(\alpha)$	α değerine göre verilen fonksiyon parametresi
G_f, G_p	Lif ve polimer matrikslerin geometrik faktörleri
j, n	Ampirik parametreler **[16, 17, 18, 19]**
k	Isıl iletkenlik (W/mK)
k_r	Bağıl (or ‘‘indirgenmiş’’) ısıl iletkenlik (k/k_m)
k_{eq}	Yerel eşdeğer iletkenlik (W/mK)
k_u	Gözenekli ortamın birleşik etken ısıl iletkenliği (W/mK)
k_{wet}	Gözenekli ortamdaki doymuş ıslak ısıl iletkenliği (W/mK)
k_{dry}	Kuru gözenekli ortamın ısıl iletkenliği (W/mK)
k_b	Esas yığın ısıl iletkenlik (W/mK)
k_t	Enine ısıl iletkenlik (W/mK)
k_q	Boyuna ısıl iletkenlik (W/mK)
k_T	Teğetsel ısıl iletkenlik (W/mK)
k_R	Radyal ısıl iletkenlik (W/mK)
k_{II}	Isı akışı yönüne paralel düzenlenmiş ısıl iletkenlik (W/mK)
$k_{\perp}$	Isı akışına dik düzenlenmiş ısıl iletkenlik (W/mK)
k_w	Suyun ısıl iletkenliği (W/mK)
k_p	Gözeneğin ısıl iletkenliği (W/mK)
k_0	Kompozitin ısıl iletkenliğinin maksimum sabit değeri (W/mK) **[81]**
$k_e()$	(k_i, v_i, F) veya (k_i, v_i) tanımında parametrelere bağlı matematiksel fonksiyon
L	Lif uzunluğu veya lifin yarı uzunluğu (m) **[80]**
m_1, m_2	Bağıntı parametreleri
n	Lif ve polimer geometrilerine bağlı parametre **[81]**
P	Toplam uzunluğun katı uzunluğuna oranı
p	İlgili bağıntıda ortamın iletkenliklerine göre değişen parametre
r	Geometrik parametre
R	Bir katı küp içinde küresel boşluğun yarıçapı **[94]** veya boşluğun çapı (m)
S	Doyma (%)
t	Lifin yarı kalınlığı (m)
V	Hacim oranı (%)
V_f	Dolgu fazının hacim oranı (%)
V_m	Sürekli fazın hacim oranı (%)
V_ω	Sıvı su içeriği ile ilgili hacim oranı (%)
V_{bw}	Katı faz içinde dağılan su oranı (%)
V_{f0}	Sıkıştırma öncesi paketlemenin başlangış yoğunluğu (%)
Z	Takviye tipinin parametrik özelliği

Altsimgeler (Subscripts)

a	Nemli hava ve kuru hava
b	Esas yığın
e	Etken
ex	Üs
f	Dolgu/süreksiz/dağılı faz
M	Dolgu fazının maksimum paketleme oranı
m	Matriks/sürekli faz
n	Genelleştirmek için parametre
s	Katı
s1,s2,s3	Kübik birim hücrenin yüzeyleri
w	Su

Yunan Harfleri (Greek letters)

α	k_f/k_m
β	İndirgenmiş ısıl parametre (faz dağılımının bağıl eğilimi).
Γ	Üçgen şekilli küme yığınında bir üçgenin taban genişliğinin boşluklu bir üçgen taban genişliğine oranı
γ	Üçgen şekilli küme yığınında bir üçgenin yüksekliğinin boşluklu bir üçgen taban genişliğine oranı
θ	Plakaların eğim açısı
λ_r	Boyutsuz ışınım katkısı **[92]**
λ_G	Boyutsuz gaz fazı iletkenliği **[92]**
λ_c	Isıl iletkenliklerle ilişki parametre
λ_{bed}	Yatak yığının indirgenmiş etken ısıl iletkenliği
ρ	Yoğunluk
X_w	Su içeriği (%)
X_{w0}	Başlangıç su içeriği (%)
x	Değerler

Tablo.2. Yaygın modellerin deneysel veriler ile karşılaştırılması (The comprasion of common models with experimental data)

Numuneler	**NZ yün**	**AL_2O_3**	**Gaz-katı komp.**	**Bakır tabaka**	**Kumaş Kevlar /PBI**	**C/P lifli ince tabaka**	**EGG Cam Lifli T.**	**EPS bead/ guar.**	**Mullite**	**Softwo-od char**	**MgO**	**Cam boncuk .**	**Bronz Parça.**	**ZrO_2-4mol% Y_2O_3**	**Çimento pastası+ silicafume**
Gaz	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Argon [b]	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava	Hava
$T_{ortalama}$ [K]	286,3	293 [a]	1073	400	321	293 [a]	313	283,5	473	309	413	300 [a]	291,5	295	293
k_f	0,194	46	6,79	385,15	0,179	0,46	1,16	0,035	5,1	0,0946	18,58	1,05	54	2,2 [a]	1,4 [a]
k_m	0,0251	0,604	0,0702	0,03385	0,0278	0,0257	0,0306	0,6	0,0257 [b]	0,0265	0,0332	0,026	0,0256	0,0259	0,0257
Gözeneklilik	**0,989**	**0,96**	**0,78**	**0,627**	**0,666**	**0,65**	**0,61**	**0,543**	**0,47**	**0,4238**	**0,41**	**0,36**	**0,402**	**0,09**	**0,0207**
k_f/ k_m oranı	**7,729**	**76,158**	**96,718**	**11378,14**	**6,439**	**17,864**	**37,859**	**0,0583**	**197,86**	**3,567**	**559,638**	**40,384**	**2109,4**	**84,942**	**54,369**
k_{etken}	0,0462	1,1	1,68	61,2	0,056	0,27	0,07	0,2262	1,4	0,0638	0,325	0,153	0,798	1,9	0,32
Seri Model	0,0253	0,6288	0,0897	0,054	0,0387	0,0385	0,0494	0,0716	0,0545	0,0453	0,0789	0,0692	0,0636	0,2572	0,6652
Paralel Model	0,0270	2,4198	1,5486	143,682	0,0783	0,1777	0,4711	0,3418	2,7151	0,0657	10,7903	0,6814	32,302	2,0043	1,3716
Geometrik Ortalama M.	0,0257	0,7183	0,1919	1,1027	0,0518	0,0706	0,1264	0,1637	0,4249	0,0552	1,3029	0,2773	2,4893	1,4750	1,2889
Halphin-Tsai M.[L/d_f=1]	0,0257	0,6765	0,1273	0,0942	0,0507	0,0584	0,0825	0,2887	0,1102	0,0553	0,1690	0,1405	0,1394	0,5882	1,0093
Halphin-Tsai M.[L/d_f]	0,0255	0,6530	0,1088	0,0741	0,0458	0,0492	0,0666	0,2531	0,0827	0,0519	0,1241	0,1070	0,1016	0,4400	0,8927
Halphin-Tsai M.[L/d_f=1] [c]	0,0264	1,8388	1,1384	109,400	0,0678	0,1428	0,3713	0,1237	2,2065	0,0611	8,9275	0,5845	26,903	1,9206	1,3581
Halphin-Tsai M.[L/d_f] [c]	0,0262	1,5424	0,9083	88,330	0,0618	0,1219	0,3097	0,1004	1,8612	0,0582	7,6167	0,5141	23,054	1,8445	1,3452
Maxwell M.	0,0257	0,6765	0,1273	0,0942	0,0507	0,0584	0,0825	0,2887	0,1102	0,0553	0,1690	0,1405	0,1394	0,5882	1,0093
Maxwell M.[c]	0,0264	1,8388	1,1384	109,400	0,0678	0,1428	0,3713	0,1237	2,2065	0,0611	8,9275	0,5845	26,903	1,9206	1,3581
Maxwell-Hamilton M.[n]	0,0252	0,6165	0,0800	0,0439	0,0339	0,0324	0,0402	11,999	0,0402	0,0389	0,0561	0,0483	0,0446	0,1487	0,4451
Maxwell–Eucken 1 M.	0,0257	0,6765	0,1273	0,0942	0,0507	0,0584	0,0825	0,2887	0,1102	0,0553	0,1690	0,1405	0,1394	0,5882	1,0093
Maxwell–Eucken 2 M.	0,0264	1,8388	1,1384	109,400	0,0678	0,1428	0,3713	0,1237	2,2065	0,0611	8,9275	0,5845	26,903	1,9206	1,3581
Maxwell M.**[42]**	0,0257	0,6765	0,1273	0,0942	0,0507	0,0584	0,0825	0,2887	0,1102	0,0553	0,1690	0,1405	0,1394	0,5882	1,0093
Modifiye Maxwell M.	0,0264	1,8388	1,1384	109,400	0,0678	0,1428	0,3713	0,1237	2,2065	0,0611	8,9275	0,5845	26,903	1,9206	1,3581
Modifiye Maxwell M.[c]	0,0257	0,6765	0,1273	0,0942	0,0507	0,0584	0,0825	0,2887	0,1102	0,0553	0,1690	0,1405	0,1394	0,5882	1,0093
Klasik Maxwell	0,0014	1,2432	1,0747	84,4639	0,0449	0,1215	0,3467	0,0126	2,1887	0,0450	8,9061	0,5695	26,887	1,9158	1,3570
Russell Model	0,0266	0,8717	0,1699	0,1208	0,0558	0,0695	0,1006	0,3038	0,1309	0,0567	0,1974	0,1560	0,1620	0,6011	1,0112
Russell Model [c]	0,0264	1,8467	1,1742	115,186	0,0694	0,1482	0,3891	0,1380	2,3467	0,0625	9,5161	0,6201	28,692	1,9803	1,3699
Efektif Ortam Teori	0,0257	0,6825	0,1845	23,212	0,0574	0,0897	0,2001	0,2391	1,5521	0,0592	6,9235	0,5108	21,472	1,9085	1,3577
Brailsford ve Major M.**[5]**	0,0257	0,6825	0,1845	23,212	0,0574	0,0897	0,2001	0,2391	1,5521	0,0592	6,9235	0,5108	21,472	1,9085	1,3577
Nielsen M. [A, V_M=1,6V_f)	0,0372	1,0225	0,1457	0,0855	0,0528	0,0574	0,0751	0,1893	0,0784	0,0508	0,1088	0,0867	0,0862	0,1334	0,1446
Krischer Yaklaşımı [F]	0,0261	0,9982	0,1697	0,1079	0,0518	0,0632	0,0894	0,1184	0,1069	0,0536	0,1566	0,1256	0,1270	0,4558	0,8959
Levy Model	0,0259	0,7456	0,2089	0,33	0,0579	0,0852	0,1560	0,1962	0,6111	0,0582	2,5784	0,3536	7,9130	1,6924	1,3233
Kopelman Izotropik M. [1]	0,0266	0,8717	0,1699	0,1208	0,0558	0,0695	0,1006	0,3038	0,1309	0,0567	0,1974	0,1560	0,1620	0,6011	1,0112
Bauer Model **[23]**	0,0002	0,3680	0,7007	87,739	0,0346	0,0952	0,2825	0,0108	1,9678	0,0414	8,2071	0,5376	24,971	1,9098	1,3568
Chiew and Glandt M.[1]	0,0257	0,7199	0,1445	2,964	0,0465	0,0508	0,0722	0,2273	0,1434	0,0488	0,5811	0,1000	1,2986	0,4828	0,5722
Francl Model	0,0021	1,8400	1,4938	143,661	0,0598	0,1610	0,4524	0,0160	2,7030	0,0545	10,7764	0,6720	32,292	2,0020	1,3710
Gori M.{by k_q}	0,0254	0,6400	0,1082	0,1208	0,0467	0,0512	0,0709	0,2705	0,0955	0,0539	0,1974	0,1560	0,1225	0,5758	1,0075
Hill Model	0,0288	3,7022	1,8590	136,482	0,1097	0,2404	0,5681	0,1513	2,6363	0,0849	10,0355	0,7139	29,569	1,7850	1,2143
Kaynaklar	**[56]**	**[35]**	**[99]**	**[100]**	**[86]**	**[101]**	**[6]**	**[102]**	**[63]**	**[91]**	**[23]**	**[62]**	**[103]**	**[104]**	**[105]**

a:kabul edilen ortalama değerlerdir. **b:** Argon gaz verileri için, Levine **[106]** ve Lide **[107]** kaynaklarından yararlanıldı. **c**: önerilen model aynıdır, fakat parametreler farklıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bart, G. C. J., **Thermal conduction in non homogeneous and phase change media**, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, The Netherlands, 1994.
2. Pham, Q.T. ve Willix, J., "Thermal conductivity of fresh lamb meat, offal and fat in the range -40 to +30 °C: measurements and correlations", **J. Food Sci.,** 54 (3), 508–515,1989.
3. Singh, R.ve Kasana, H.S., "Computational aspects of effective thermal conductivity of highly porous metal foams", **Applied Thermal Engineering**, 24, 1841–1849, 2004
4. Tavman, I.H., "Effective Thermal Conductivity of Isotropic Polymer Composites", **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, 25(5), 723-732, 1998.
5. Belova, I.V. ve Murch, G.E., "Monte Carlo Simulation of the Effective Thermal Conductivity in Two-Pase Material", **Journal of Materials Processing Technology,** 153-154, 741-745, 2004.
6. Ochs, F., Heidemann, W. ve Müller-Steinhagen, H., "Effective Thermal Conductivity of Moistened Insulation Materials As A Function of Temperature", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 51, 539–552, 2008.
7. Maqsood, A. ve Kamran, K., "Thermophysical properties of porous sandstones: measurements and comparative study of some representative thermal conductivity models", **International Journal of Thermophysics,**; 26 (5), 1617-1631, 2005.
8. Cernuschi, F., Ahmaniemi, S., Vuoristo, P. ve Mäntylä, T., "Modelling of thermal conductivity of porous materials: application to thick thermal barrier coatings", **Journal of the European Ceramic Society**, 24, 2657-2667, 2004.
9. Singh, K.J., Singh, R. ve Chaudhary, D.R., "Heat conduction and a porosity correction term for spherical and cubic particles in a simple cubic packing", **J. Phys. D: Appl. Phys**., 31, 1681–1687, 1998.
10. Kohout, M., Collier, A.P. ve Štěpánek, F., "Effective thermal conductivity of wet particle assemblies", **International Journal of Heat and Mass Transfer,** 47, 5565–5574, 2004.
11. Chaudhary, D. R. ve Bhandari, R. C., "Heat transfer through a three-phase porous medium", **Journal of Physics D, British Journal of Applied Physics**, 1, 815–817, 1968.
12. Maxwell, J.C., **A Treatise on Electricity and Magnetism**, third ed, Dover Publications Inc., New York, A.B.D., 1954.
13. Beck, A.E., "An improved method of computing the thermal conductivity of fluid-filled sedimentary rocks"', **Geophysics,** 41, 133-144, 1976.
14. Carson, J. K., Lovatt, S. J., Tanner, D. J. ve Cleland, A.C., "Thermal Conductivity Bounds for Isotropic Porous Materials", **International Journal of Heat and Mass Transfer**,48, 2150-2158, 2005.
15. Brailsford, A.D. ve Major, K.G., "The thermal conductivity of aggregates of several phases, including porous materials", **Br. J. Appl. Phys.,** 15, 313–319, 1964.
16. Carson, J. K., Lovatt, S.J., Tanner, D.J. ve Cleland, A.C., "Predicting the effective thermal conductivity of unfrozen, porous foods", **Journal of Food Engineering,** 75, 297–307, 2006.
17. Carson, J. K., "Review of effective thermal conductivity models for foods", **International Journal of Refrigeration,** 29, 958-967, 2006.
18. Carson, J. K., **Prediction of the thermal conductivity of porous foods**, PhD Thesis, Massey University, Palmerston North, New Zealand, 2002.
19. Carson, J. K., Lovatt, S. J., Taner, D.J. ve Cleland, A.C., "An analysis of the influence of material structure on the effective thermal conductivity of theoretical porous materials using finite element simulations", **International Journal of Refrigeration**, 26, 873–880, 2003.
20. Nielsen, L.E., **Mechanical Properties of Polymers and Composites**, Vol. 2., Marcel Dekker, New York, 1974.
21. Nielsen, L. E., "Thermal conductivity of particulate-filled polymers", **J. Appl. Polym. Sci.,** 17, 3819-3825, 1973.
22. Pezzotti, G., Kamada, I. ve Miki, S., "Thermal conductivity of AlN/polystyrene interpenetrating Networks", **Journal of the European Ceramic Society**, 20, 1197-1203, 2000.
23. Gonzo, E. E., "Estimating correlations for the effective thermal conductivity of granular materials", Short communication, **Chemical Engineering Journal,** 90, 299–302, 2002.
24. Ghodoossi, L., **Hava Boşluklu Yapı Elemanlarında Isı Geçişi**, Master Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilimdalı, İstanbul, 117, 1988.
25. Fu, S.-Y. ve Mai, Y.-W., "Thermal Conductivity of Misaligned Short-Fiber-Reinforced Polymer Composites", **Journal of Applied Polymer Science,** 88, 1497–1505, 2003.
26. Halpin, J.C., "Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites", **Journal of Composite Materials**, 3, 732–734, 1969.
27. Gemci, R., **Lif takviyeli polimer kompozit malzemelerde aşınma ve ısı iletimlerinin iyileştirilmesi,** Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim dalı, Bursa, 102, 1996.
28. Agarwal, B.D., **Broutman L.J. Analysis and Performance of Fiber Composites**, John Wiley and Sons, U.S.A., 1980.
29. Levy, F.L., "A modified Maxwell–Eucken equation for calculating the thermal conductivity

of two-component solutions or mixtures”, **International Journal of Refrigeration**, 4(4), 223–225, 1981.

30. Becker, B.R. ve Fricke, B.A., “Food thermophysical property models”, **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, 26 (5), 627-636, 1999.
31. Wang, J., Carson, J.K., North, M.K. ve Cleland D.J., “A New Approach to Modelling The Effective Thermal Conductivity of Heterogeneous Materials”, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 49, 3075-3083, 2006.
32. Landauer, R., “The electrical resistance of binary metallic mixtures”, **J. Appl. Phys.,** 23, 779–784, 1952.
33. Kirkpatrick, S., “Percolation and conduction”, **Reviews of Modern Physics**, 45, 574–588, 1973.
34. Davis, H.T., Valencourt, L.R. ve Johnson, C.E., “Transport processes in composite media”, **J. Am. Ceram. Soc.,** 58, 446-452, 1975.
35. Xue, Q. ve Xu, W.-M., “A Model of Thermal Conductivity of Nanofluids with Interfacial Shells”, **Materials Chemistry and Physics**, 90, 298–301, 2005.
36. Krischer, O., **The scientific fundamentals of drying technology,** Springer-Verlag, Berlin, 1963.
37. Hamdami, N., Monteau, J.-Y. ve Le Bail, A., “Effective thermal conductivity of a high porosity model food at above and sub-freezing temperatures”, **International Journal of Refrigeration,** 26, 809–816, 2003.
38. Maroulis, Z.B., Krokida, M.K. ve Rahman, M.S., “Astructural generic model to predict the effective thermal conductivity of fruits and vegetables during drying”, **J. Food Eng**., 52, 47–52, 2002.
39. De Vries, U., Sluimer, P.ve Bloksma, A.H., “A quantitative model for heat transport in dough and crumb during baking”, **International Symposium on Cereal Science and Technology,** Lund University, Ystad, Sweden, 174–88, 13–16 June 1989.
40. Russell, H.W., **“**Principles of Heat Flow in Porous Insulators”, **J**. **Am**. **Ceram**. **Soc**., 18**,** 1**-**5, 1935**.**
41. Tseng, C., Yamaguchit, M.ve Ohmorit, T., “Thermal Conductivity of Polyurethane Foams from Room Temperature to 20 K”, **Cryogenics**, 37, 305-312, 1997.
42. Chiew, Y.C. ve Glandt, E., “The effect of structure on the conductivity of a dispersion”, **J. Coll. Interf. Sci.**, 94, 90–104, 1983.
43. Francl, J. ve Kingery, W.D., “Thermal conductivity: IX, Experimental investigation of effect of porosity on thermal conductivity”, **J. Am. Ceram. Soc.**, 37, 99–107, 1954.
44. Sheldon, R.P., **Composite polymeric materials**, Applied Science Publishers, London and New York, 86-88, 1982.
45. Chawla, K.K., **Composite Materials-Science and Engineering**, Springer-Verlag, 1987.
46. Ozilgen, M., **Food Process Modeling and Control: Chemical Engineering Applications**, CRC Press, 518, 1998.
47. Hill, J.E., Leitman, J.D. ve Sunderland, J.E., “Thermal conductivity of various meats”, **Food Technology,** 21, 1143–1148, 1967.
48. Rizvi, S.S.H., **Thermodynamic Properties in Dehydration**, Editör: Rao, M.A. ve Rizvi, S.S.H., Engineering Properties of Foods, Marcel Dekker, Newyork, 531, 1994.
49. Ashrae Handbook, **Refrigeration**, American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers Inc., GA, Atlanta, 2002.
50. Rahman, M.S., **Thermophysical properties of foods**, Editör: Sun, D.-W., Advances in food refrigeration, Leatherhead Publishing, Surrey, England, 2001.
51. Kopelman, I. J., **Transient heat transfer and thermal properties in food systems**, Doktora Tezi, Food Science Departmant, Michigan State University, East Lansing, MI, U.S.A., 1966.
52. Jeffrey, D.J., “Conduction through a random suspension of spheres”, **Proc. R. Soc. Lond. A,** 335, 355–367, 1973.
53. Xue, Q.-Z., “Model for effective thermal conductivity of nanofluids”, **Physics Letters A**,307 (5-6), 313–317, 2003.
54. Bauer, T.H., “A general analytical approach toward the thermal conductivity of porous media”, **Int. J. Heat Mass Transfer**, 36, 4181–4191, 1993.
55. Babanov, A.A., “Method of calculation of thermal conduction coefficient of capillary porous material”, **Sov. Phys. Technol. Phys.**, 2, 476–484, 1957.
56. Ye, Z., Wells, C.M., Carrington, C.G. ve Hewitt, N.J., “Thermal Conductivity of Wool and Wool-Hemp Insulation”, **International Journal of Energy Research**, 30, 37-49, 2006.
57. Symons, J.G., Clarke, R.E. ve Pierce, J.V., “Thermal performance of several Australian fibrous insulating materials”, **Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes**,19, 72–88, 1995.
58. Kohout, M., Collier, A.P. ve Štěpánek, F., “Microstructure and transport properties of wet poly-disperse particle assemblies”, **Powder Technology,** 156, 120–128, 2005.
59. Cheng, S.C. ve Vachon, R.I., "The Prediction of the Thermal Conductivity of Two and Three Phase Solid Heterogeneous Mixtures", **Int.J. Heat Mass Transfer**, 12, 249, 1969.
60. Agari, Y., Uno, T., “Estimation on Thermal Conductivities of Filled Polymers”, **J. Appl. Polym. Sci.**, 32, 5705-5712, 1986.
61. Gori, F., “A Theoretical Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Unsaturated Frozen Soils”, **Proceedings of The 4th**

International Conference on Permafrost, vol. 1., Editör: Péwé, T. L., Washington DC: National Academy Press, Fairbanks, U.S.A., 363-368, 1983.

62. Gori, F., Marino, C. ve Pietrafesa, M., "Experimental measurements and theoretical predictions of the thermal conductivity of two phases glass beads", **International communications in heat and mass transfer,** 28 (8), 1091-1102 (17), 2001.
63. Barea, R., Osendi, M.I., Ferreira, J.M.F. ve Miranzo, P. "Thermal conductivity of highly porous mullite material", **Acta Materialia,** 53, 3313-3318, 2005.
64. Singh, J. R., "Effective thermal conductivity of highly porous two-phase systems", **Applied Thermal Engineering**, 24, 2727–2735, 2004.
65. Argento, C. ve Bouvard, D., "Modeling the effective thermal conductivity of random packing of spheres through densification", **Int. J. Heat Mass Transfer**, 39, 1343–1350, 1996.
66. Tichá, G., Pabst, W. ve Smith, D.S., "Predictive model for the thermal conductivity of porous materials with matrix-inclusion type microstructure", **Journal of Materials Science (Letters)**, 40 (18), 5045-5047, 2005.
67. Baschirow, A.B. ve Selenew, J.W., "Thermal Conductivity of Composites", **Plaste Kaut**, 23, 656, 1976.
68. Bruggeman, D.A.G., "Calculation of physical constants from heterogeneous substances", **Annals of Physics**, 24, 636, 1935.
69. Schulz, B., "Thermal conductivity of porous and highly porous materials", **High Temperature-High Pressures.,** 13, 649-660, 1981.
70. Meredith, R.E. ve Tobias, C.W., **Conduction in heterogeneous systems**, Editör: Tobias, C.W., Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering, vol. 2, Interscience Publisher, Newyork, 15-47, 1962.
71. Coble, R.L., Kingery, W.D., "Effect of porosity on physical properties of sintered alumina", **J. Am. Ceram. Soc.**, 39, 377–384, 1956.
72. Pabst, W., "Simple second-order expression: For the porosity dependence of thermal conductivity", **Journal of Materials Science**, 40 (9-10), 2667-2669(3), 2005.
73. Boomsma, K. ve Poulikakos, D., "On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam", **International Journal of Heat and Mass Transfer,** 44, 827-836, 2001.
74. Sugawara, A. ve Yoshizawa, Y., "An Investigation on the Thermal Conductivity of Porous Materials and its Application to Porous Rock", **Australian J. Phys.**, 14, 468-469, 1961.
75. Fan, L.-W., Hu, Y.-C., Tian, T. ve Yu, Z.-T., "The prediction of effective thermal conductivities perpendicular to the fibres of wood using a fractal model and an improved transient measurement technique", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 49, 4116–4123, 2006.
76. Peitgen, H.O. ve Saupe, D., **The Science of Fractal Images**, Springer-Verlag Newyork Inc, New York, U.S.A., 1988.
77. Hamilton, R.L. ve Crosser, O.K., "Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems", **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, 1(3), 187–191, 1962.
78. Davis, R.H., "Thermal conductivity of mixture with spherical inclusions", **Int. J. Thermophys.**, 7, 609-620, 1986.
79. Lu, S.-Y. ve Lin, H.-C., "Effective conductivity of composites containing aligned spheroidal inclusions of finite conductivity", **Journal of Applied Physics,** 79, 6761, 1996.
80. Bhattacharya, A., Calmidi, V.V. ve Mahajan, R.L., "Thermophysical properties of high porosity metal foams", **International Journal of Heat and Mass Transfer,** 45, 1017-1031, 2002.
81. Kalaprasad, G., Pradeep, P., Mathew, G., Pavithran, C. ve Thomas, S., "Thermal conductivity and thermal diffusivity analyses of low-density polyethylene composites reinforced with sisal, glass and intimately mixed sisal/glass fibres", **Composites Science and Technology**, 60, 2967-2977, 2000.
82. Springer, G.S., Tsai, S.W., "Thermal conductivities of unidirectional materials", **J. Compos. Mater**, 1, 166-173, 1967.
83. Verma, L.S., Shrotriya, A.K., Singh, R. ve Chaudhary, D.R., "Thermal conduction in two-phase materials with spherical and non-spherical inclusions", **J. Phys. D: Appl. Phys.,** 24, 1729–1737, 1991.
84. Druma, A.M., Alam, M.K. ve Druma, C., "Analysis of Thermal Conduction in Carbon Foams", **International Journal of Thermal Sciences**, 43, 689-695, 2004.
85. Gibson, P.W., "Multiphase heat and mass transfer through hygroscopic porous media with applications to clothing materials", **Technical Report Natick/TR-97/005**, U.S. Army Natick Research, Development, and Engineering Center, MA, Natick, U.S.A., 1996.
86. Patirop, C., **Modeling of Thermal Performance of Firefighter Protective Clothing During The Intense Heat Exposure**, Doktora Tezi, North Carolina State University, Mechanical Engineering Departmant, Raleigh, North Carolina, 2004.
87. Rahman, M.S. ve Chen, X.D., "A general form of thermal conductivity equation as applied to an apple: effects of moisture, temperature and porosity", **Drying Technol.**, 13, 1-18, 1995.
88. Rahman, M.S., Chen, X.D. ve Perera, C.O., "An improved thermal conductivity prediction model for fruits and vegetables as a function of temperature, water content and porosity", **Journal of Food Engineering**, 31, 163–170, 1997.

89. Rahman, M.S., "Thermal conductivity of four food materials as a single function of porosity and water content", **J. Food Eng.**, 15, 261-268, 1992.
90. Gupta, M., Yang, J. ve Roy, C., "Modelling the Effective Thermal Conductivity in Polydispersed Bed Systems: A Unified Approach using the Linear Packing Theory and Unit Cell Model", **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 80, 830-839, 2002.
91. Gupta, M., Yang, J. ve Roy, C., "Predicting the Effective Thermal Conductivity of Polydispersed Beds of Softwood Bark and Softwood Char", **Fuel**, 82, 395-404, 2003.
92. Tsotsas, E. ve Martin, H., "Thermal Conductivity of Packed Beds: A Review", **Chem. Eng. Process,** 22, 19–37, 1987.
93. Zehner, P. ve Schlunder, E.U., "Thermal Conductivity of Granular Materials at Moderate Temperatures", **Chemie Ingr Tech.**, 42, 933-941, 1970.
94. Fu, X., Viskanta, R. ve Gore, J.P., "Prediction of Effective Thermal Conductivity of Cellular Ceramics", **Int. Comm. Heat Mass Transfer**, 25 (2), 151-160, 1998.
95. Lee, S.L. ve Yang, J.H., "Modelling of Effective Thermal Conductivity for A Nonhomogeneous Anistropic Porous Medium", **Int. J. Heat Mass Transfer**, 41 (6-7), 931-937, 1997.
96. Park, J., **Thermal/Fluid Characteristics of Isotropic Plain-Weave Screen Laminates as Heat Exchange Surfaces**, Master Thesis, University of Nevada, Mechanical Engineering Departmant, Reno, Nevada, U.S.A., 2001.
97. Xu, J. ve Wirtz, R.A., "In-Plane Effective Thermal Conductivity of Plain-Weave Screen Laminates", **IEEE Transactions on components and packaging Technologies,** 25 (4), 615-620, 2002.
98. Hu, X.-J., Du, J.-H., Lei, S.-Y. ve Wang, B.-X., "Technical Note:A model for the thermal conductivity of unconsolidated porous media based on capillary pressure±saturation relation", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 44, 247-251, 2001.
99. Liang, X.-G.ve Qu, W. "Effective thermal conductivity of gas-solid composite materials and the temperature difference effect at high temperature", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 42 (10), 1885-1893(9), 1999.
100. Soma Shekar, S., **Thermal performance of plain weave screen as a heater surface in paralel plate free convection**, Master Tezi, University of Nevada, Mechanical Engineering, Reno, Nevada, 94, 2006.
101. Seo, B.H., Cho, Y.J., Youn, J.R., Chung, K., Kang, T.J. ve Park, J.K. "Model for Thermal Conductivities in Spun Yarn Carbon Fabric Composites", **Polymer Composites**, 26, 791-798, 2005.
102. Carson, J.K., Lovatt, S. J., Tanner, D.J. ve Cleland, A.C., "Experimental measurements of the effective thermal conductivity of a pseudo-porous food analogue over a range of porosities and mean pore sizes", **Journal of Food Engineering**, 63, 87–95, 2004.
103. Jiang, P., Li, M., Lu, T., Yu, L. ve Ren, Z., "Experimental Research on Convection Heat Transfer in Sintered Porous Plate Channels", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 47, 2085-2096, 2004.
104. Jang, B.K. ve Matsubara, H., "Influence of rotation speed on microstructure and thermal conductivity of nano-porous zirconia layers fabricated by EB-PVD", **Scripta Materialia**,52, 553-558, 2005.
105. Fu, X. ve Chung, D.D.L., "Effects silica fume latex methycellulose and carbon fibers on the thermal conductivity and specific heat of cement paste", **Cement and Concrete Research**, 27 (12), 1799-1804(6), 1997.
106. Levine, I.N., **Physical chemistry,** McGraw-Hill Education, Maidenhead, England, 2001.
107. Lide, D.R., **CRC Handbook of chemistry and physics**, CRC Press, Boca Raton (FL), U.S.A, 2003.

Ek-1. Diğer Modeller (The Other Models):

	Modeller	Aralık	Ref.
Hill	$k_e = k_f.(2F - F^2) + k_m(1 - 4F + 3F^2) + \frac{8k_f k_m(F - F^2)}{k_f.F + k_m(4 - F)}$ $F = 2 - \sqrt{4 - 2V_f}$	-	**[2, 16, 17, 46, 47, 48]**
Kopelman [1,2,3,4]	**(1)** Kopelman Izotropik Model [1]: $k_e = k_m.\left[\frac{1 - V_f^{2/3}(1 - k_f/k_m)}{1 - V_f^{2/3}(1 - k_f/k_m)(1 - V_f^{1/3})}\right]$	-	**[2, 16, 17, 46, 48, 49]**
	(2) Lifli sistem için Kopelman Seri Model [2]: $k_e = k_m.\left[\frac{1 - (V_f^{1/2}/(1 - k_f/k_m))}{1 - (1 - V_f^{1/2})(V_f^{1/2}/(1 - k_f/k_m))}\right]$ (*Carson ve ark.* **[27]**, k_f/k_m yerine k_m/k_f kullanmıştır.)	-	**[16, 50]**
	(3) Lifli sistem için Kopelman Model[3]: $k_e = k_m.[1 - (1 - k_f/k_m)V_f]$	-	**[30, 48, 51]**
	(4) Tabakalı hal için Kopelman Seri Model [4]: $k_e = k_m.\left[\frac{(1 - k_f/k_m) - 1}{(1 - k_f/k_m) - 1 - (1 - k_f/k_m)V_f}\right]$	-	**[30, 48, 51]**
Jeffrey	$\frac{k_e}{k_m} = 1 + 3\beta V_f + \left(3\beta^2 + \frac{3\beta^2}{4} + \frac{9\beta^3}{16}\frac{\alpha + 2}{2\alpha + 3} + .\right).V_f^2$ $\beta = \frac{(\alpha - 1)}{(\alpha + 1)}$ $\alpha = k_f/k_m$	m ve f, temeli akışkan ve parçacıktır.	**[35, 52, 53]**
Maxwell	$\frac{k_e}{k_m} = \alpha.\frac{2.V_f}{3 - V_f}$ $\alpha = \frac{k_f}{k_m}$	$V_f \geq 0{,}90$	**[23]**
Bauer	$\frac{k_e}{k_m} = \alpha.V_f^{\frac{3}{2}}$ $\alpha = \frac{k_f}{k_m}$	$V_f \geq 0{,}90$	**[23, 54]**
Babanov	$k_e = \frac{k_m(k_m + V_f^{2/3}(k_f - k_m))}{(k_m + V_f^{2/3}(k_f - k_m)(1 - V_f^{1/3}))}$	Basit kübik düzenleme için faz 1 küp halindedir.	**[5, 55]**
Francl	$k_e = k_f(1 - \varepsilon)$	$k_f = k_{katı}$	**[14, 43]**
Singh ve ark.	$k_e = \frac{k_m(k_m + 0{,}806V_f^{2/3}(k_m - k_f))}{(k_m + 0{,}806.V_f^{\frac{2}{3}}(k_m - k_f)(1 - 1{,}2407V_f^{1/3}))}$	Basit kübik düzenleme için faz 1 küresel haldedir.	**[5, 9]**
Sheldon ve Chawla	$\log k_e = V_f \log k_f + V_m \log k_m$	m ve f, matriks ve liflerdir.	**[27, 44, 45]**
Symons ve ark.	New Zealand (NZ) -kaynaklı yün malzemeler için, $k_e = 1{,}097.10^{-3}.\rho + 0{,}7667.\rho^{-1} - 0{,}0239$ 9.9–70 kg/m^3 aralığındaki koyun yünü malzemeler için, $k_e = 2{,}05.10^{-3}.\rho + 0{,}286.\rho^{-1} - 0{,}0269$	-	**[56, 57]**

Kohout	$k_e = (k_f - k_m).V_f^{\,c} + k_m$ $c = 0{,}136.\log(k_f/k_m) + 1{,}27$ (küreler) $c = 0{,}239.\log(k_f/k_m) + 1{,}10$ (küpler)	$1 < \frac{k_f}{k_m} < 200$ Üstüste kesişen küreler için; $-0{,}5 < V_f < 0{,}7$ küpler için; $-0 < V_f < 1$	**[10, 58]**
Chiew ve Glandt [1,2]	(1) $\frac{k_e}{k_m} = \frac{1 + 2\beta V_f + (k_f - 3\beta^2)V_f^{\,2}}{1 - \beta V_f}$ (2) $\frac{k_e}{k_m} = \frac{1 + 2\beta V_f + (2\beta^3 - 0{,}1\beta)V_f^{\,2} + V_f^{\,3}.0{,}05.\exp(4{,}5\beta)}{1 - \beta V_f}$ $\beta = \frac{(k_f - k_m)}{(k_f + 2k_m)}$	$0{,}15 \le V_f \le 0{,}85$	**[23, 42]**
Cheng ve Vachon [1,2]	(1) $\frac{1}{k_e} = \frac{1}{\sqrt{C(k_f - k_m)(k_m + B(k_f - k_m))}} * \ln\left[\frac{\sqrt{k_m + B(k_f - k_m)} + \frac{B}{2}\sqrt{C(k_f - k_m)}}{\sqrt{k_m + B(k_f - k_m)} - \frac{B}{2}\sqrt{C(k_f - k_m)}}\right] + \frac{1 - B}{k_m}$ $B = \sqrt{(3.V_f)/2}$ and $C = -4.\sqrt{2/(3.V_f)}$ Tsao'nun olası modeline **[152]** dayanmaktadır. (2) $k_e \cong \frac{k_m}{1 - \sqrt{(3.V_f)/2}}$	$k_f > k_m$ Dolgu polimeler için. $k_m << k_f$ $k_f/k_m > 100$ $V_f < 0{,}667$	**[4, 59]** **[4]**
Agari ve Uno	$\log k_e = V_f.C_4.\log k_f + (1 - V_f).\log(C_3.k_m)$	İletken zincirler için.	**[4, 60]**
Gori	$\frac{1}{k_t} = \frac{P - 1}{k_m.P} + \frac{P}{k_m.(P^2 - 1) + k_f}$ {by $k_{enine\ yüksek}$} $k_q = \left(\frac{P.(P - 1)}{k_m} + \frac{P}{k_f}\right)^{-1} + k_m.\frac{(P^2 - 1)}{P^2}$ {by $k_{enine\ sıfır}$} $P = \sqrt[3]{1/(1 - \varepsilon)}$	$k_m = k_{akışkan}$ $k_f = k_{katı}$ $\varepsilon < 0{,}36$	**[61, 62]**
Eucken	$k_e/k_m = 1 + 2X - {}^{2V(X - 1)}/_{1} + 2X + V(X - 1)$ $F = 1 - \exp\left\{-0{,}92.V^2 \log\frac{k_{argon}}{k_m}\right\}$ (Bir başka çalışmada k_e/k_m ifadesindeki V yerine F kullanılmaktadır **[9]**)	$k_m = k_{mullite}$ $0{,}35 < \varepsilon < 0{,}60$ $X = k_m/k_f$	**[63]** **[9]**
Singh	$k_e = \{k_{II}^{\,2}.\cos^2\theta + k_{\perp}^{\,2}.\sin^2\theta\}^{1/2}$ $\sin^2\theta = C_1.V^{1/2}.\ln(k_s/k_m) + C_2$	$\varepsilon < 0{,}90$	**[64]**
Argenta ve Bouvard	$\frac{k_e}{k_m} = \alpha.\left(\frac{V_f - V_{f_o}}{1 - V_{f_o}}\right)^{(3/2).(1 - V_{f_o})}$	$\alpha = \frac{k_f}{k_m}$	**[23, 65]**
Tichâ ve Pabst	$\frac{k}{k_m} = \exp\left(\frac{-B\varepsilon}{1 - \varepsilon}\right)$	$\varepsilon > 0{,}50$ küçük gözeneklerde $k_m = k_{matrix}$'dir.	**[66]**
Baschirow ve Selenewe	$\frac{k_e}{k_m} = 1 - \frac{C^2.\pi}{4} + \frac{C.\pi.p}{2}\left[1 - \frac{p}{C}\ln\left(1 + \frac{C}{p}\right)\right]$ $p = \frac{k_f}{k_m - k_f}$ $C = \left(\frac{6V_f}{\pi}\right)^{1/3}$	Parçacıklar küreseldir.	**[4, 67]**

Bruggeman	$\left[\frac{(k/k_m - k_f/k_m)}{(k/k_m)^{\frac{1}{3}}.(1 - k_f/k_m)}\right] = 1 - V_f$ Kürelerin dağılımı için, $\frac{k}{k_m} = (1 - V_f)^x \quad x = \frac{1 - \cos^2\alpha}{1 - F} + \frac{\cos^2\alpha}{2F}$	seyrek dağılımlı ve farklı çaplarda $0 \le V < 1$ verilmektedir F şekil faktörüdür ve kürede 1/3'tür.	[68, 69]
Meredith ve Tobias	$\frac{k}{k_m} = \left[\frac{2 - V}{(2 + (w - 1)V)}\right] \cdot \left[\frac{2.(1 - V)}{2.(1 - V) + w.V}\right]$ $w = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{2F} + \frac{2}{(1 - F)}\right)$	Model, seyrek dağılımlı parçacıklar için ve ε<0,60 uygundur. w, gelişigüzel düzenlenmiş küreler için bir faktördür.	[8, 70]
Coble–Kingery	$k_r = 1 - \frac{3}{2}\varepsilon + \frac{1}{2}\varepsilon^2$ Küresel olmayan gözenekler durumunda bu yaklaşım, genelleştirilmiş formda; $k_r = 1 - [k]\varepsilon + ([k] - 1)\frac{1}{2}\varepsilon^2$ $[k] = \frac{3(k_m - k_f)}{2k_m + k_f}$	$k_r = k/k_m$ ve k_f, gözenekleri veya boşlukları dolduran gaz fazdır.	[71, 72]
Boomsma ve Paulikakos	$k_e = \frac{\sqrt{2}}{2}\left[\frac{4F}{[2e^2 + \pi F(1 - e)]k_f + [4 - 2e^2 + \pi F(1 - e)]k_m} + \frac{(e - 4F)^2}{[(e - 2F)e^2]k_f + [2e - 4F - (e - 2F)e^2]k_m} + \frac{(1 - \sqrt{2}e)^2}{[\pi F^2(1 - 2\sqrt{2}e)]k_f + [\sqrt{2} - 2e - \pi F^2(1 - 2\sqrt{2}e)]k_m} + \frac{2e}{e^2.k_f + (4 - e^2).k_m}\right]^{-1}$ $F = \sqrt{\frac{\sqrt{2}.(2 - 0{,}625\sqrt{2}e^3 - 2\varepsilon)}{\pi(3 - 4\sqrt{2}e - e)}}$	Yüksek derecede gözenekli metal köpükler ε>0,90 (örnekte) $e = 0{,}339$	[73]
Sugawara ve Yoshizawa	$k_e = (1 - A)k_f + A.k_m$ $A = [2^n.(2^n - 1)^{-1}].[1 - (1 + \varepsilon)^{-n}]$	ε<0,20 (örneklerde) $k_m = k_{akışkan}$ $k_f = k_{taş}$	[7, 74]
Fan ve ark.	$k_T = \frac{0{,}5(1 + \varepsilon)^2 k_f k_m + \varepsilon(1 - \varepsilon)k_f^2}{\varepsilon(1 - \varepsilon)k_m + 2\varepsilon k_f}$ $k_R = \frac{4\varepsilon k_f k_m + 0{,}5(1 - \varepsilon)k_f^2}{2\varepsilon(1 - \varepsilon)k_m + 0{,}5(1 + \varepsilon)^2 k_f}$	0,50< ε<0,70 (örneklerde) f = ağacın hücre duvarı m=hücre $\varepsilon = 1{,}73.16^{d-1}$	[75, 76]
Hamilton ve Crosser	$\frac{k_e}{k_m} = \frac{\alpha + (d - 1) - (d - 1)(1 - \alpha)V_f}{\alpha + (d - 1) + (1 - \alpha)V_f}$ $\alpha = k_f/k_m \quad \beta = \frac{(\alpha - 1)}{(\alpha + 1)}$	Küreler için d=3 ve silindirler için d=6. m ve f, akışkan ve parçacık.	[35, 53, 77]

Davis	$\frac{k_e}{k_m} = 1 + \frac{3(\alpha \quad 1)}{(\alpha+2)-(\alpha-1)V_f} * [V_f + f(\alpha)V_f^{2} + O(V_f^{3})]$ $\alpha = k_f/k_m \qquad \beta = \frac{(\alpha-1)}{(\alpha+1)}$	α = 10 için $f(\alpha)$ =2.5; ve α =∞ için $f(\alpha)$ = 0.5 m ve f , akışkan ve parçacıktır.	**[35, 53, 78]**
Lu ve Lin	$\frac{k_e}{k_m} = 1 + \alpha V_f + bV_f^{2}$ $\alpha = k_f/k_m \qquad \beta = \frac{(\alpha-1)}{(\alpha+1)}$	m ve f , akışkan ve parçacık.	**[35, 53, 79]**
Bhattachar-ya ve ark.	$k_e = \left[\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{t/L}{k_m + \frac{(k_f - k_m)}{3}} + \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{t}{L}}{k_m}\right)\right]^{1}$ $t/L = \frac{\left[-\sqrt{3} - \sqrt{3 + (1-\varepsilon)(\sqrt{3} - 5)}\right]}{\left[1 + (\sqrt{3})^{-1} - (8/3)\right]}$	ε ≥0,90 (örneklerde) m ve f, akışkan ve katıdır. Yüksek gözenekli metal köpükler içindir.	**[80]**
Springer ve Tsai	$k_e = k_{II}.\sin^2\theta + k_{\perp}.\cos^2\theta$	-	**[81, 82]**
Kalaprasad ve ark. [1],[2]	(1) $\log\left[\frac{k_e}{G_p.k_m}\right] = V_f.G_f.\log\left[\frac{k_f}{G_p.k_m}\right]$	m ve f, polimer matriks ve liflerdir.	**[81]**
	(2) $k_e(T) = k_0 - E.e^{-ZT/B}$	T sıcaklığına göre etken ısıl iletkenliktir.	**[81]**
Verma ve ark.	$k_e = \frac{k_m(k_f + F(1-V_f)(k_m - k_f))}{(k_m - (1-F)(1-V_f)(k_m - k_f))}$ $F = \exp[-d.(k_m/k_f)^{1/3}]$	Küresel ilaveler için d = 1 ve küresel olmayan ilaveler için d < 1.	**[5, 83]**
Druma ve ark.	$k_e = \frac{k_b}{k_f} = \left[1 - \left(\frac{\varepsilon}{100}\right)\right]^{1/d}$ Yalıtım köpüklerinden daha yüksek bağıl yoğunluk için ve Grafitli karbon köpükler için $k_{katı} > k_e \gg k_p$.	Yüksek iletkenik için	**[84]**
Gibson	$k_e = k_m \cdot \left\{\frac{\left[\left(1 + (V_{sm} + V_{bw} + V_{lif})\right).k_f\right] + (\varepsilon.k_m)}{(\varepsilon.k_f) + \left[\left(1 + (V_{sm} + V_{bw} + V_{lif})\right).k_m\right]}\right\}$	V_{lif}=0,334 ε>0,60 Kumaşlar	**[85, 86]**
Rahman ve Chen	$k_e = \varepsilon.k_m + f_r[(1 - \varepsilon - V_w).k_f + V_w.k_w]$ $f_r = 0{,}996[1 - \varepsilon + k_m/k_w].(T/273)^{0{,}713}.X_w^{0{,}285}$	ε<0,56 sebzeler ve meyveler için	**[87, 88]**
Rahman	$\left(\frac{k_e}{k_f}\right).\left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right) = \left[1{,}82 - 1{,}66.\exp\left(-0{,}85\frac{X_w}{X_{wo}}\right)\right]$	5 %<X_w< 88% 0 <ε< 0.5 20 <T<25°C	**[89]**
Gupta, Yang ve Roy	$\lambda_{bed} = (1 - \sqrt{1-\varepsilon})\varepsilon[(\varepsilon - 1) + \lambda_g^{\ 1} + \lambda_r] + \sqrt{1-\varepsilon}.\lambda_c$	0,43< ε <0.63 (kullanımda) $\lambda_g, \lambda_r, \lambda_c$, makalede verilmiştir.	**[90, 91, 92, 93]**

Fu, Viskanta ve Gore	$\frac{k_e}{k_m} = \left[\frac{2t}{\varepsilon_{s1}\left(\frac{k_f}{k_m}\right) + (1-\varepsilon_{s1})} + \frac{(1-2t)}{\varepsilon_{s2}\left(\frac{k_f}{k_m}\right) + (1-\varepsilon_{s2})}\right]^{-1}$ Dikdörtgen biçimindeki kutu için (kübik); $\varepsilon = (1-2t)^3 + 6(1-2t)^2 t$ Burada $\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s3} = 1-(1-2t)^2$ ve $\varepsilon_{s2} = 4t^2$ Küp hücre modelinde küresel oyuk durumunda, $\varepsilon = 2\pi\left[-\frac{4}{3}R^3 + \frac{3}{2}R^2 - \frac{1}{8}\right]$ burada $1/2 \leq R \leq \sqrt{2}/2$	$0.53 \leq \varepsilon \leq 0.97$ f ve m, katı ve gazdır. k_f , *Kingery ve ark.* [159] çalışmasında rapor edilmiştir.	**[94]**
Lee ve Yang	$k_e = 1 + (\alpha-1)(1-\varepsilon).(1+m_1.\varepsilon^{m_2})^{-1}$ $m_1 = \left[\left((2/\gamma)+(3/\gamma^2)\right).\Gamma.(1+6.\Gamma)(ln\alpha)^2\right] * \left[\begin{array}{c}2{,}522.10^{-3} - 0{,}957.10^{-4}(ln\alpha) + \\ 9{,}714.10^{-5}(ln\alpha)^2\end{array}\right]$ $m_2 = \left(20-(29/\gamma)+(15/\gamma^2)\right) * (40+3\Gamma-13\Gamma^2)[0{,}0095 - 0{,}001666(ln\alpha)]$	$0 \leq \varepsilon \leq 1$, $0 \leq \alpha \leq 1000$ $0{,}2 \leq \Gamma \leq 1$, $\gamma \geq 1$ için. m ve f, akışkan ve katıdır. $\alpha = k_f/k_m$	**[95]**
Xu ve Wirtz	$c_f.k_e = \frac{k_f}{2}.\left[\frac{160.\pi.M.d.\left((k_m/k_f)-1\right) + c.(k_m/k_f).c_f^{-1}}{c} + \frac{c.(k_m/k_f)}{160.\pi.M.d.\left(1-(k_m/k_f)\right) + c.c_f^{-1}}\right]$ $c = 123.(M.d)^4 - 384.(M.d)^2 - 640$ $c_f.(1-\varepsilon) = -3{,}906.10^{-4}.\pi.c.M.d$ $\beta = 4.(1-\varepsilon)/d$	Kalınlık 2d ile sınırlıdır. Yani, $Md_{2d\ (max)}$= 0,577. Gözeneklilik, $0 < c_f(1-\varepsilon) < 0{,}534$ $0{,}7 \leq c_f \leq 1$ Burada, d and M, tel çapı ve mesh sayısıdır. m ve f, akışkan ve katıdır.	**[96, 97]**
Hu ve ark.	$k = k_u(k_{wet} - k_{dry}) + k_{dry}$ $k_u = 0{,}1811.\ln(S) + 0{,}9878$	$0{,}25 < \varepsilon < 0{,}55$ (örneklerde) $k_m/k_f \leq 0{,}2$ f=katı faz m=sıvı faz	**[98]**