

Makalenin Geliş Tarihi : 25.03.2009  
Makalenin Kabul Tarihi : 06.08.2009

## **ISIL ENGELLEYİCİ KAPLAMALARIN ETKİN ISI İLETİM KATSAYISININ TEORİK OLARAK BELİRLENMESİ**

Özge ALTUN<sup>1</sup>, Erhan BÖKE<sup>2</sup>

**ÖZET :** Isı geçiş problemlerinde ısı iletim katsayısı önemli rol oynamaktadır. Heterojen veya kompozit malzemelerin etkin ısı iletim katsayısının modellenmesi, ısı transfer uygulamalarında ilgi duyulan bir alandır. Literatürde etkin ısı iletim katsayısının modellenmesi için geliştirilen çok sayıda eşitlik bulunmaktadır. Isıl engelleyici kaplamalarının ısıl özellikleri, kaplama malzemesinin ısıl özelliklerine, kullanılan kaplama tekniğine ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörler kaplama içinde bulunan gözeneklerin şeklini ve yönünü etkilemektedir. Bu çalışmada ısıl engelleyici kaplamalarda ısı iletim katsayısı literatürde yer alan farklı analitik ifadeler kullanılarak tayin edilmiştir. Hesaplanan etkin ısı iletim katsayısı değerleri, literatürden elde edilen deneysel sonuçlar ve CFD (Computational Fluid Dynamics) analizi ile hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca % 12 gözeneklilik için CFD analizi ile hesaplanan etkin ısı iletim katsayısı değerleri, literatürde aynı gözeneklilik oranı için lazer-flaş yöntemi ile elde edilmiş deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar ile CFD analizi ile elde edilen sonuçlar arasında yaklaşık % 17 oranında bir sapma olduğu tespit edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Isı iletim katsayısı, gözeneklilik, analitik modeller, ısı engelleyici kaplama.

### **DETERMINATION OF EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF THERMAL BARRIER COATINGS BY ANALYTICAL METHOD**

**ABSTRACT :** Thermal conductivity plays a significant role in the heat transfer problems. Modeling of effective thermal conductivity of heterogeneous or composite materials is sensory areas of interest. There are a lot of developed expressions for modeling of thermal conductivity in the literature. Thermal characteristics of thermal barrier coatings (TBCs) are vary depending on the thermal characteristic of coating materials, coating technique and process parameters. These factors affect the pore shapes and directions. In this study, thermal conductivity of TBCs have been obtained by using different analytical expressions given in the literature. Effective thermal conductivity values obtained from analytical expressions have been compared to experimental thermal conductivity data given in the literature and the results of Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. However, effective thermal conductivity values calculated by CFD analysis have been compared to experimental laser-flash method results given in literature for 12% porosity. 17% of deviation have been determined between the experimental and CFD analysis results.

**KEYWORDS :** Thermal conductivity, porosity, analytical method.

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 26480 ESKİŞEHİR

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, 34437 Gümüşsuyu - İSTANBUL

**Sembol Listesi**

$f_{2D}$	Etkin ısı iletim katsayısının malzemenin ısı iletim katsayısına oranı
$k_{ef}$	Etkin ısı iletim katsayısı (W/mK)
$k_m$	Katı fazın ısı iletim katsayısı (W/mK)
$k_g$	Gaz fazın ısı iletim katsayısı (W/mK)
$l_x$	Elips şeklindeki gözeneklerin x yönündeki uzunluğu ( $\mu\text{m}$ )
$l_y$	Elips şeklindeki gözeneklerin y yönündeki uzunluğu ( $\mu\text{m}$ )
$n$	Biçim faktörü
$P$	Gözeneklilik oranı
$v_g$	Boşluk hacmi
$v_m$	Katı fazın hacmi
$v_T$	Gözenekli malzemenin toplam hacmi

**I. GİRİŞ**

Bir maddenin sıcaklığı bu maddeyi meydana getiren moleküllerin ortalama kinetik enerjileri ile orantılıdır (kinetik teori). Ortam içerisinde bir bölgede sıcaklığın yüksek olması o bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin yüksek olduğunu gösterir. Moleküller arası enerji iletimi, sıvılarda moleküllerin birbirini takip eden çarpışmaları ile olur. Katılarda ise moleküllerin ve maddenin yapısını oluşturan kafeslerin titreşimleri ve/veya yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa serbest elektron sürüklenmesi ile olur. Genelde titreşimle iletilen enerji miktarı, elektron sürüklenmesi ile iletilen enerji miktarına kıyasla ihmal edilebilecek kadar az olduğundan, katılarda enerji iletiminin elektron sürüklenmesiyle olduğu varsayılabilir [1].

Bir gözenekli katı, yoğun katı iskelet ve hava tarafından meydana gelen iki-fazlı sistem gibi düşünülebilir. Etkin ısı iletim katsayısı, bu karmaşık sistem boyunca ısı geçişiyle tanımlanmaktadır. Gözenekli bir malzemenin etkin ısı iletim katsayısı  $k_{ef}$ , yoğun (gözeneksiz) malzemenin ısı iletim katsayısına ( $k_m$ ), gözeneklilik oranına ( $P$ ) ve gözenek geometrisine bağlıdır [2].

Maxwell [3], matris içine dağılmış küresel formdaki ikinci faz durumu için etkin ısı iletim katsayısını hesaplayan ilk araştırmacılardan biridir. Rayleigh ise iki boyutlu kare matris içinde disk biçimli ikinci faza sahip malzemenin etkin ısı iletim katsayısını veren ifadeyi elde etmiştir [4]. Bruggeman yaptığı çalışmada, birbirine bağlanmış iki fazın etkin ısı iletim katsayısını hesaplamada uygulanabilecek ve “etkin ortam” kavramını kullanan bir denklem önermiştir [5]. Bu yaklaşımda iki faz birbirinin yerine geçebilir roller oynamaktadır. Landauer [6], gerçekte

Bruggeman denkleminin çözümüne uygun pratik bir ifade türetmiştir. Bu yaklaşım “Etkin Ortalama Süzülme Teorisi” (Effective Medium Percolation Theory, EMPT) olarak adlandırılmaktadır. Bjorinekle ve arkadaşları [7] çok ya da az birbirine bağlanmış elips şekilli gözenekler için Bruggeman ifadesini genişletmişlerdir. Bu son model özellikle ince kolonsal şekilli ve ısı akış yönüne dik olarak yönelmiş gözeneklerin bulunduğu kaplamalar içindir. Collishaw ve Evans [8], gözenekli bir katının etkin ısı iletim katsayısını hesaplamak için bazı ifadeleri yeniden incelemişlerdir. Her bir durumda ele alınan ifade katı matris içindeki gözenek fazlarının dağılımıyla ilgili mikroyapının geometrik olarak basitleştirilmesini esas almaktadır. Gerçek mikroyapı için bir yaklaşımın uygunluğu, seçilen modelin doğruluğunu tanımlamaktadır. Fu ve arkadaşları [9], iki farklı birim hücre için etkin ısı iletim katsayısını hesaplamışlardır. İlk birim hücre içerisinde kübik şekilli bir gözenek bulunan bir küp, ikinci birim hücre ise ortasında küresel gözenek bulunan küp şeklindedir. Kübik model için yapılan analizlerin deneysel ifadeler ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Singh ve arkadaşları [10], iki fazlı sistemde etkin ısı iletim katsayısını düzenli üç boyutlu basit kübik bir geometri için incelemişlerdir. Yapmış oldukları analizlerde, birinci durumda tüm gözeneklerin kübik şekilli olduğu, ikinci durumda ise tüm gözeneklerin küresel olduğunu kabul etmişlerdir. Küresel şekilli gözenek sistemi için elde ettikleri çözümlerin kübik şekilli gözenek sistemine göre daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Samantray ve arkadaşları [11], iki fazlı malzemelerin etkin ısı iletim katsayılarını hesaplamak için türetilmiş ifadeleri incelemişlerdir. Gözeneklilik oranının düşük olduğu yapılar için Maxwell ifadesini, gözeneklilik oranının fazla olduğu durumlar için Bruggeman, Raghavan, Hashin-Shtrikman ifadelerini kullanmışlardır. Yüksek gözenekliliğe sahip malzemelerde analitik modelin seçimi düşük gözenekliliğe sahip (<20%) malzemelere göre daha kritiktir.

İki fazlı sistemlerin boyutsuz ısı iletim katsayısının ( $k_{ef}/k_m$ ) en başta gözenek-matris ısı iletim katsayıları oranı ( $k_g/k_m$ ) ve malzeme içerisindeki gözeneklerin hacimsel yoğunluğuna bağlı olduğunu görmüşlerdir.

Sunulan çalışmada hesaplama için, rastgele gözeneklilik dağılımına ve gözenek şekline sahip ısı engelleyici kaplamalar seçilmiştir. Etkin ısı iletim katsayısı değerleri literatürde bulunan ifadelerden yararlanılarak elde edilmiştir. Bulgular literatürde verilen deneysel sonuçlar ve CFD analizlerinden elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Sadece gözeneklilik oranının hesaba

katıldığı ifadelerden elde edilen sonuçların deneysel ve nümerik sonuçlardan önemli ölçüde saptığı gözlemlenmiştir.

## II. TEORİK HESAPLAMA YÖNTEMİ

Maddenin mikroskopik yapısına bağlı olarak ısı iletim katsayısı farklı maddeler için geniş bir aralıkta değişir. Özellikle malzemenin gözenekli yapıda olmasına ve içindeki nem miktarına göre farklılık gösterir [12]. Gözeneklilik oranı (P) boyutsuz bir büyüklük olup toplam boşluk hacminin toplam hacme oranıdır. Böylece;

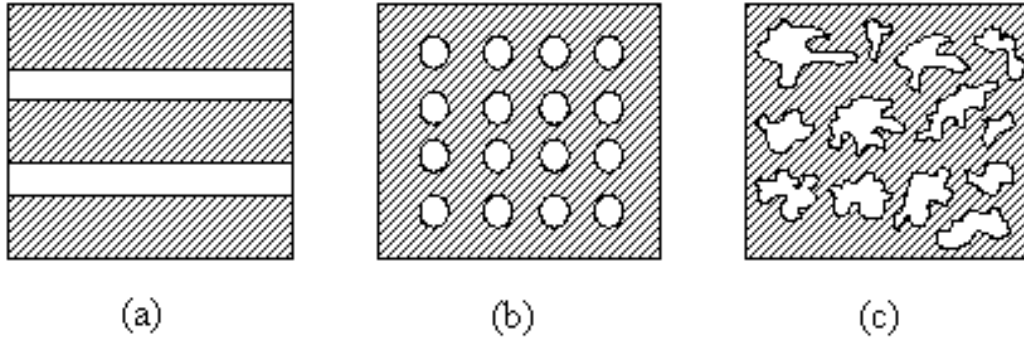
$$P = \frac{v_g}{v_T} \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Burada  $v_g$  boşluk hacmi,  $v_T$  toplam hacimdir. Gözeneklerin bulunmadığı katı hacmin oranı ise;

$$1 - P = \frac{v_m}{v_T} \quad (2)$$

şeklinde yazılır. Burada  $v_m$  katı fazın toplam hacmidir [13].

Gözeneklilik, mutlak gözeneklilik ve etkin gözeneklilik olmak üzere iki grupta toplanabilir. Mutlak gözeneklilik, gözenek ilişkileri düşünülmezsizin kaba hacme göre oransal boşluk hacmidir. Ayrıca tabakalı, düzgün dağılımlı ve rasgele dağılımlı olmak üzere farklı yapıdaki gözenek sistemleri bulunmaktadır (Şekil 1).



**Şekil 1.** İki fazlı malzemede faz yapıları

*a) tabakalı yapı b) düzgün dağılımlı yapı c) rasgele dağılımlı yapı [14].*

Şekil 1’de iki farklı fazın paralel tabakalarından oluşan modelin ısı iletkenliği, her bir fazın ısı iletkenliğine ve ısı geçiş yönüne bağlıdır. Eğer ısı geçişi, faz eksenine paralel ise malzemenin etkin ısı iletim katsayısı  $k_{ef}$  karışım kuralına göre,

$$k_{ef} = v_m k_m + v_g k_g \quad (3)$$

hesaplanır. [15]. Burada  $k_m$  katı fazın ısı iletim katsayısı,  $k_g$  ise gözenek içinde bulunan gaz fazın ısı iletim katsayısıdır. Isı geçişinin gözeneklere dik olduğu durum için ısı iletim katsayısı,

$$k_{ef} = \frac{k_m k_g}{v_m k_m + v_g k_g} \quad (4)$$

olarak ifade edilir.

Ayrıca literatürde gözeneklilik dağılımı simetrik ya da asimetric olarak sınıflandırılmaktadır. Asimetric model için türetilen ilk ifadeler, Maxwell ve Rayleigh tarafından önerilmiştir. Özellikle Maxwell modeli [3], sürekli matris içerisinde gözeneklerin düşük oranda dağılımı (% 10 gözenekliliğin altında) için uygulanabilmektedir. Bu modelde rasgele dağılmış ve birbirleriyle bağlantısı olmayan küresel gözenek kabulü yapılmış ve

$$k_{ef} = k_m \left[ \frac{k_g + 2k_m + 2v_g(k_g - k_m)}{k_g + 2k_m - v_g(k_g - k_m)} \right] \quad (5)$$

denklemleri ile ifade edilmiştir. Bu ifadede  $k_m$  sürekli matrisin ısı iletim katsayısı,  $k_g$  gözenekğin ısı iletim katsayısı,  $v_g$  gözenekğin hacim oranıdır.

Raghavan ve arkadaşları [16] sadece gözeneklilik oranının hesaba katıldığı, gözenek şekli ve dağılımının hesaba katılmadığı aşağıdaki ifadeyi türetmişlerdir.

$$k_{ef} = k_m \left[ (1 - P)^{3/2} + \frac{k_g}{k_m} P^{1/4} \right] \quad (6)$$

Hashin ve Shtrikman [17] ise Maxwell [3] yaklaşımına benzer şekilde küresel gözeneklere sahip sürekli matris içinde etkin ısı iletim katsayısını,

$$k_{ef} = k_m + \frac{v_g}{1/(k_g - k_m) + (v_m / 3k_m)} \quad (7)$$

denklemleri ile ifade etmektedirler. Maxwell-Eucken ifadesi,

$$k_{ef} = \frac{k_m v_m + k_g v_g \frac{3k_m}{2k_m + k_g}}{v_m + v_g \frac{3k_m}{2k_m + k_g}} \quad (8)$$

şeklinde yazılmaktadır [18]. Gonzo [19] ise Maxwell denkleminde yola çıkarak mikrogözenekler için,

$$k_{ef} = k_m \frac{1 + 2\beta P + (2\beta^3 - 0,1\beta)P^2 + P^3 0,05e^{(4,5\beta)}}{(1 - \beta P)} \quad (9)$$

ifadesini türetmiştir. Bu ifadeye ki  $\beta$  katsayısı,

$$\beta = \frac{k_g - k_m}{k_g + 2k_m} \quad (10)$$

ile hesaplanmaktadır. Türetilen bu denklem, orta ve düşük gözeneklilik oranlarına sahip gözenekli yapılar için kullanılan bir ifadedir. Bakker [20], iki boyutlu mikroyapı resminden yola çıkarak dairesel ve elips şeklindeki gözeneklere sahip yapının etkin ısı iletim katsayısını analitik olarak hesaplamıştır. Rasgele dağılımlı (iki – boyutlu) dairesel gözenekler için etkin ısı iletim katsayısını,

$$1 - P = \frac{k_g - k_{ef}}{k_g - k_m} \left( \frac{k_m}{k_{ef}} \right)^{1/2} \quad (11)$$

ifadesinden hesaplamıştır. Elips şekilli 2 boyutlu gözenekler için etkin ısı iletim denklemi,

$$k_{ef} = f_{2D} k_m \quad (12)$$

Burada  $f_{2D}$  iki boyutlu ısı iletim katsayısının malzemenin ısı iletim katsayısına oranıdır,

$$f_{2D} = 1 + P \left( \frac{k_g - k_m}{k_m + (k_g - k_m)n} \right) \quad (13)$$

$n$  biçim faktörüdür. Biçim faktörü  $n$  ( $n > 0$ ) elipsin boyutlarına bağlı olarak türetilmiştir ve

$$n = \frac{1}{2} l_x l_y \int \frac{ds}{(s + l_x^2) \sqrt{(s + l_x^2)(s + l_y^2)}} \quad (14)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada  $l_x$  elips şeklindeki gözeneklerin  $x$  yönündeki uzunluğu,  $l_y$  ise gözeneklerin  $y$  yönündeki uzunluğu,  $s$  integral değişkenidir. Atmosferik Plazma Sprey kaplamanın analizinde Denklem (12) – (13) kullanılmıştır.

Eşdeğer Ortam Teorisinde (EMT) ise gözeneklerin matris içinde rasgele dağıldığı kabulü yapılmıştır ve

$$0 = v_m \frac{k_m - k_{ef}}{k_m - 2k_{ef}} + v_g \frac{k_g - k_{ef}}{k_g + 2k_{ef}} \quad (15)$$

ifadesi ile verilmektedir [18].

### III. TEORİK HESAPLAMA SONUÇLARI

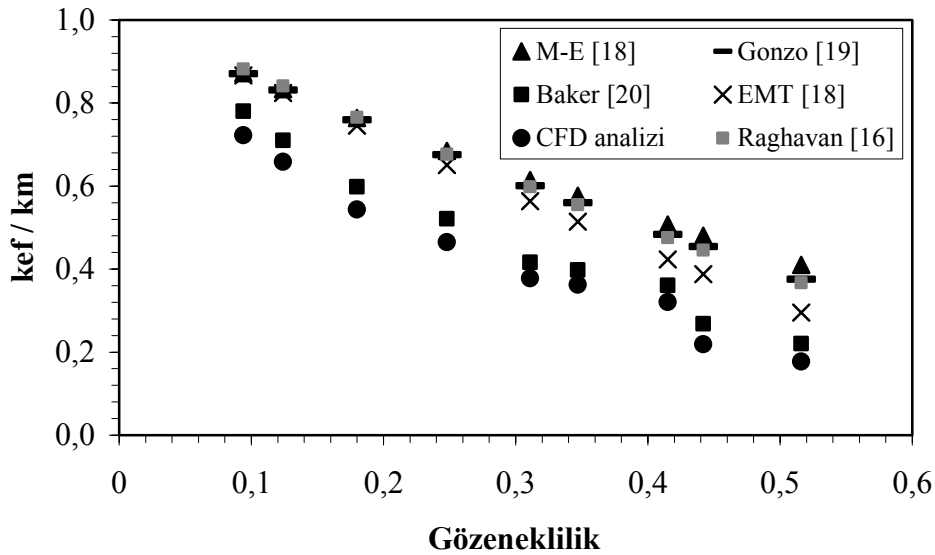
Teorik hesaplama sonuçlarına yönelik literatür araştırması sonucunda ısı engelleme kaplamalarının etkin ısı iletim katsayısının hesaplanabileceği ifadeler incelenmiştir. Yapılan çalışmaların iki grupta toplandığı belirlenmiştir. Çalışmaların bir kısmında gözenek oranlarının dikkate alındığı, bir kısmında da gözenek oranının yanında, gözenek şekillerinin ve boyutlarının hesaplamalara katıldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada Denklem (6) ile verilen Raghavan [16], Denklem (8) ile verilen Maxwell-Eucken [18], Denklem (9) ile verilen Gonzo [19], Denklem (12) ile verilen Bakker [20] ve Denklem (15) ile verilen EMT [18] ifadeleri ele alınmıştır. Tüm hesaplamalarda gözenek içinde bulunan gaz, hava olarak kabul edilmiş ve ısı iletim katsayısı değerleri ( $k_g$ ) literatürden alınmıştır [21]. Katı faz ise % 8 yitriya takviyeli zirkonyadır ve ısı iletim katsayısı ( $k_m$ ) Schlichting ve diğerlerinin [22] yaptığı çalışmalardan elde edilmiştir.

Gözenek şekillerinin ve boyutlarının dikkate alınmadığı Raghavan [16], Maxwell-Eucken [18] ve Gonzo [19] ifadeleri incelendiğinde özellikle düşük gözeneklilik oranlarına (% 25 gözenekliliğe kadar) birbirlerine yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür (Şekil 2). Gözeneklilik oranı arttığında Maxwell-Eucken [18] ifadesi ile Gonzo [19] ifadesi arasında ortalama % 4,5'lik fark, Maxwell-Eucken [18] ve Raghavan [16] ifadeleri arasında % 6,5 ve Gonzo [19] ile Raghavan [16] ifadeleri arasında % 1.14'lük fark oluşmaktadır. Maxwell-Eucken



[18] modeli ile Gonzo [19] ve Raghavan [16] modelleri arasında gözeneklilik oranı arttığında ortalama % 5'lik sapma meydana gelmektedir.

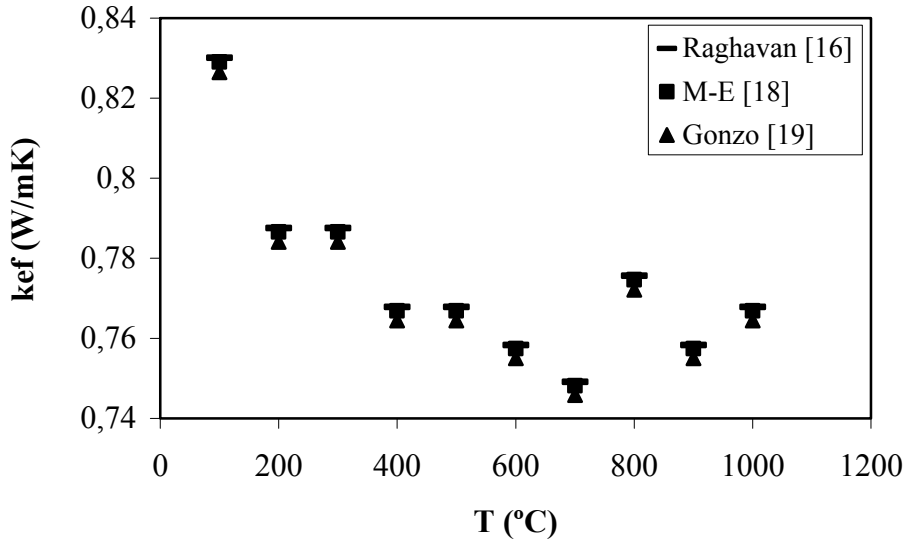
CFD modellemede Fluent 6.1.22 kullanılmıştır [23]. Farklı gözeneklilik oranları için modellemeler yapılmış ve bu yapılar için etkin ısı iletim katsayısı elde edilmiştir. CFD analiz sonuçları ile teorik olarak hesaplanan ( $k_{ef}/k_m$ ) boyutsuz ısı iletim katsayısının gözenekliliğe göre değişimi Şekil 2'te verilmiştir. CFD analizinden elde edilen etkin ısı iletim katsayısı değerleri ile Maxwell-Eucken [18] ve Gonzo [19] ifadelerinde düşük gözeneklilik oranları (% 9,4 - % 18) için elde edilmiş etkin ısı iletim katsayısı değerleri arasında % 20'lik bir fark bulunmaktadır. Gözeneklilik oranı arttığında ise (% 24,8 - % 51,6) fark % 40 değerlerine çıkmaktadır. Denklem (15) de verilen EMT ifadesi ile CFD arasında düşük gözeneklilik oranı için % 20'lik fark, yüksek gözeneklilik oranlarında %33'lük fark olduğu tespit edilmiştir. Bu ifadeler ile CFD analizi arasındaki farkın büyük olmasının sebebi, söz konusu çalışmalarda gözenek şekillerinin kaplamanın her bölgesinde aynı ve kaplama boyunca homojen bir dağılım olduğu kabulünün yapılmasıdır.



Şekil 2. Farklı gözeneklilik oranları için 800 °C'de Ragavan [16], M-E [18], EMT [18], Gonzo [19], Baker [20] yaklaşımlarından ve CFD analizinden elde edilen  $k_{ef}/k_m$  oranı.

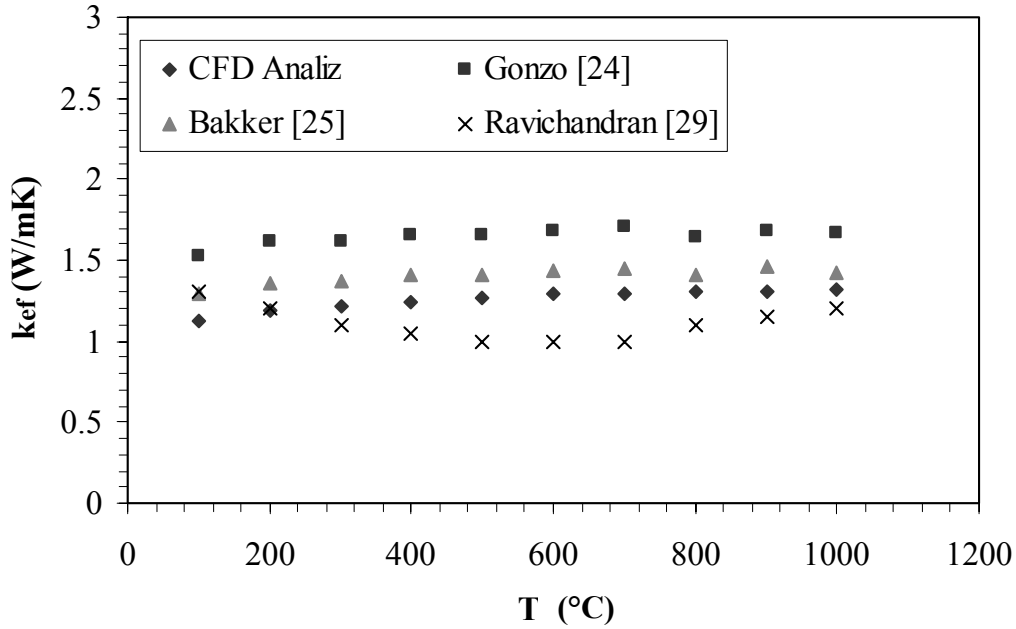
Denklem (12) ile verilen Bakker [20] ifadesi için yapılan hesaplamalarda her bir gözeneklilik oranında Leica Image Analyzer donanım/yazılım sistemi kullanılarak ortalama bir gözenek boyutu tespit edilmiş ve bu değerler kullanılmıştır. Gözenek şeklinin ve boyutlarının hesaba katıldığı Bakker [20] ifadesinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde düşük gözeneklilik oranları için % 7'lik bir fark bulunurken yüksek gözeneklilik oranları için % 10'luk fark bulunmuştur. Bu farkın sebebi Atmosferik Plazma Sprey kaplamalarda gözenek yapılarının homojen olmaması ve buna bağlı olarak gözenek boyutlarının tam olarak karakterize edilememesinden kaynaklanmaktadır. Maxwell-Eucken [18], Gonzo [19] ve EMT ifadelerine göre Bakker [20] ifadesi diğer ifadelerin aksine yüksek gözeneklilik oranları için de CFD çözümleriyle uyumludur.

Şekil 3'te Raghavan [16], Maxwell-Eucken [18], Gonzo [19] yaklaşımlarından elde edilen etkin ısı iletim katsayısı değerlerinin sıcaklığa göre değişimi verilmiştir.



**Şekil 3.** Raghavan [16], Maxwell-Eucken [18], Gonzo [19] yaklaşımlarından elde edilen  $k_{ef}$  değerlerinin sıcaklığa göre değişimi.

CFD analizinden [23] ve Bakker [20] ifadesinden elde edilen etkin ısı iletim katsayısı değerleri ile literatürde bulunan Ravichandran ve diğerleri [24] tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarının yakın olduğu belirlenmiştir (Şekil 4). Ravichandran ve diğerleri [24], yaptıkları deneysel çalışmada % 12 gözeneklilik oranında % 8 yitriya takviyeli zirkonya esaslı Atmosferik Plazma Sprey kaplama kullanmışlardır. Deney sonuçlarında kaplama malzemesinin etkin ısı iletim katsayısını sıcaklığa bağlı olarak 1 – 1,4 W/m K arasında değiştiğini görmüşlerdir. CFD analizinde % 12,4 gözeneklilik oranı için etkin ısı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı olarak 1,12–1,31 W/m K arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bakker [20] modelinde ise etkin ısı iletim katsayısı 1,28-1,42 arasında değişmektedir. Ravichandran ve diğerleri [24] tarafından yapılan deneysel çalışma ile CFD analizi arasında ortalama % 8’lik fark bulunmaktadır. Bu sonuç yapılan sayısal çözümün Atmosferik Plazma Sprey kaplamaların etkin ısı iletim katsayılarını tayin etmede güvenilir bir yaklaşım olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.** Gözeneklilik oranı % 12,4 olan mikroyapı için Gonzo, Baker ifadeleri ve CFD analizinden elde edilen  $k_{ef}$  değerlerinin Ravichandran ve arkadaşları [24] tarafından yapılan deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması.

Teorik yöntem ile etkin ısı iletim katsayısının sadece gözeneklilik oranının dikkate alındığı ifadelerle hesaplanması durumunda hatalı sonuçlar elde edileceği gözlemlenmiştir.

#### IV. TARTIŞMALAR

Farklı gözeneklilik oranlarına sahip ısı engelleyici kaplama için etkin ısı iletim katsayısı literatürde bulunan analitik ifadelerden yararlanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan modeller Maxwell-Eucken [19], Gonzo [20], Baker [21] ve EMT modelleridir. Maxwell-Eucken [19], Gonzo [20], ve EMT modellerinden elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır. Fakat gözenek şeklinin ve dağılımının dikkate alındığı Baker [21] ifadesinden elde edilen sonuçlar CFD analizinden elde edilen sonuçlar ve literatürde bulunan deneysel sonuçlar birbiriyle uyum içindedir. Deneysel sonuçlar ile CFD analizinden elde edilen sonuçların hata analizi Tablo 1.'de özetlenmiştir.

*Tablo 1. Deneysel sonuçlar ve CFD analizi arasındaki hata oranları*

	Standart Sapma	Değişim Katsayısı %	Ortalama Mutlak Hata %	Ortalama Bağıl Hata %
<b>CFD Analizi</b>	0,062	4,92	18,4	17,20
<b>Deneysel Sonuçlar[29]</b>	0,102	9,189		

Gözenek şekilleri ve dağılımı kaplama tekniğine ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişen ısı engelleyici kaplamalarda etkin ısı iletim katsayısının teorik olarak tayin edilmesinde gözenek boyutlarının hassas bir şekilde tespit edilmesi ve gözenek boyutlarının, şeklinin ve dağılımının hesaba katıldığı teorik ifadelerin kullanılması gerekmektedir.

**V. KAYNAKLAR**

- [1] H.Yüncü, S. Kakaç, “*Temel Isı Transferi*”, Bilim Yayıncılık, 1999.
- [2] P.G. Klemens, “Thermal Conductivity of Inhomogeneous Media”, *High Temperatures – High Pressures*, Vol.3, pp.241-248 1991.
- [3] J.C. Maxwell, “*A Treatise on Electricity and Magnetism*”, 3d Edn., Clarendon Pres, Oxford, vol. 1, 1892.
- [4] S. Grangjean, J. Absi, D.S. Smith, “Numerical Calculation of The Thermal Conductivity of Porous Ceramics Based on Micrographs”, *Journal of The European Ceramic Society*, Vol.26, pp.2669-2676, 2006.
- [5] B. Nait-Ali, K. Haberko, H. Vesteghem, J. Absi, D.S. Smith, “Thermal Conductivity of highly porous zirconia”, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.26, pp.3567-3574, 2006.
- [6] R. Landauer, “The Electrical Resistance of Binary Metallic Mixtures”, *J. Appl. Phys.* Vol. 21, 779-784, 1952.
- [7] A. Bjorneklett, L. Haukeland, J. Wigren, and H. Kristiansen, “Effective Medium Theory And The Thermal Conductivity of Plasma-Sprayed Ceramic Coatings”, *Journal of Material Science*, Vol.29, pp.4043-4050, 1994.
- [8] P.G. Collishaw, J.R.G. Evans, “An assessment of expressions for the apparent thermal conductivity of cellur materials”, *Journal of Material Science*, Vol.29, pp.2261-2273, 1994.
- [9] X. Fu, R. Viskanta, and J.P. Gore, “Prediction of Effective Thermal Conductivity of Cellular Ceramics”, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol.25, No.2, pp.151-160, 1998.
- [10] K.J. Singh, R. Singh, and D.R. Chaudhary, “Heat Conduction and a Porosity Correction Term for Spherical and Cubic Particles in a Simple Cubic Packing”, *J.Phys.D. Applied Physics*, Vol.31, pp.1681-1687, 1998.
- [11] P.K. Samantray, P. Karthikeyan, K.S. Reddy, “Estimating Effective Thermal Conductivity of Two-Phase Materials”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.49, pp.4209-4219, 2006.
- [12] A. Öztürk, H. Yavuz, “*Uygulamalarla Isı Geçişi*”, Çağlayan Yayınevi, 1995.

- [13] M. Kaviani, "Heat Transfer in Porous Media", Third Edition *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1998.
- [14] D.W. Richerson, "*Modern Ceramic Engineering: Properties, Processing and Use in the Design*", 2nd Edn., CRC Press, 1992.
- [15] M.S.S. Baysal, "*Silindirik Elyaf ve Tanecik Katkılı Karma Malzemelerin Efektif Isı İletim Katsayısı*", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 126 s, 2001.
- [16] S. Raghavan, H. Wang, R.B. Dinwiddie, W.D. Porter, and M.J. Mayo, "The Effect of Grain Size, Porosity and Yttria Content on the Thermal Conductivity of Nanocrystalline Zirconia", *Scripta Material*, Vol.39, No.8, pp.1119-1125,1998.
- [17] Z. Hashin, S. Shtrikman, "A Variational Approach to the Theory of The Effective Magnetic Permeability of Multiphase Materials", *J. Appl. Phys*, Vol.33, pp.3125-3131,1962.
- [18] J. Wang, J.K. Carson, M.F. North, D.J. Cleland, "A New Approach to Modelling the Effective Thermal Conductivity of Heterogeneous Materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.49, pp.3075-3083, 2006.
- [19] E.E. Gonzo, "Estimating Correlation for the Effective Thermal Conductivity of Granular materials", *Chemical Engineering Journal*, Vol.90, pp.299-302, 2002.
- [20] K. Bakker, "Using The Finite Element Method To Compute The Influence of Complex Porosity And Inclusion Structures On The Thermal and Electrical Conductivity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.40, No.15, pp.3503-3511, 1997.
- [21] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, "*Fundamentals of Heat and Mass Transfer*", Fourth Edition, John Wiley & Sons, 1996.
- [22] K.W. Schlichting, N.P. Padture, P.G. Klemens, "Thermal Conductivity of Dense and Porous Yttria-Stabilized Zirconia", *Journal of Materials Science*, Vol.36, pp.3003-3010, 2001.
- [23] O. Altun, E. Böke, "The Effect of Pore Shape to the Effective Thermal Conductivity of Thermal Barrier Coatings", ASME Summer Heat Transfer Conference HT2008-56171, Jacksonville, Florida, USA, 10-14 Ağustos 2008.
- [24] K.S. Ravichandran, K. An, , R.E. Dutton, S.L. Semiatin, "Thermal Conductivity of Plasma-Sprayed Monolithic and Multilayer Coatings of Alumina and Yttria-Stabilized Zirconia", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol.82, No.3, pp.673-682, 1999.