

Araştırma Makalesi

Gazbetonun Malzemesinin Isıl İletkenliğinin Farklı Gözeneklilik Oranlarında İncelenmesi

*Battal Doğan**

Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale, Turkey

Öz

Binalarda ısınma maliyetlerinin azaltılması için uygun yapı elamanları kullanarak yalıtım yapılmalıdır. Bu açıdan gazbeton yapı sektöründe çok önemli bir yere sahiptir. Gazbeton gözenekli yapıya sahip hafif beton sınıfında yer alan bir yapı malzemesidir. Bu çalışmada gazbeton malzemesinin gözeneklilik oranına bağlı olarak ısı iletkenlik değeri analitik, sayısal ve deneysel olarak belirlenmiştir. Analitik inceleme yapılırken gözenek oranları dikkate alınarak literatürde yer alan ısı iletkenlik hesap modelleri kullanılmıştır. Sayısal incelemede elektron mikroskopta elde edilen görüntüler (SEM) kullanılarak gazbetona ait geometrik model oluşturulup tek boyutlu çözümler elde edilmiştir. Gazbeton kuvarsit ve hava kabarcıklarından oluşmaktadır. Sayısal çözümler yapılırken hava kabarcıklarının ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı olarak değiştiği, kuvarsitin sıcaklıkla değişmediği değerler kullanılmıştır. Sayısal çözümlerde sonlu eleman esaslı (ANSYS) programı kullanılmıştır. Çözümlerde sabit yüzey sıcaklığı sınır şartları altında ısı akısı hesaplanmıştır. Deneysel çalışmalar Laser Flash teknoloji kullanan cihazla farklı gözeneklilik oranlarında yapılmıştır. Çalışmada gazbeton malzemesinin iç yapı geometrisinin karmaşık olması nedeniyle analitik modeller yapılan ısı iletkenlik hesaplarının deneysel ölçümlerden farklı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca sayısal modelle tespit edilen ısı iletkenlik değeri ile deneysel ölçümler arasında %2-4 farklılık tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gazbeton, Isıl İletkenlik, Gözeneklilik

Investigation Of Thermal Conductivity Of Autoclaved Aerated Concrete On Different Porosity Ratio

Abstract

To reduce heating costs in buildings should be carried out using the appropriate insulation structure elements. From this point of aerated concrete in the building industry it has a very important place. Aerated concrete is a porous structure with a light building materials located in the concrete class. In this study, thermal conductivity, depending on the porosity of the material aerated analytical, numerical and was experimentally determined. Analytical review of porosity while taking into account thermal conductivity models in the literature were used. Digital examination of the images obtained by electron microscopy (SEM) was used. One-dimensional solution was obtained. Aerated concrete is made up of quartzite and air bubbles. Numerical solutions that vary depending on the temperature of the thermal conductivity of air bubbles while is used the values that change with temperature quartzite. ANSYS is used in numerical solution. The solution has been calculated at constant surface temperature of the heat flux under boundary conditions. Experimental studies were conducted

* Sorumlu Yazar
e-mail: bttldgn@gmail.com

Received: 13.10.2017
Accepted: 18.10.2018

in different porosity device that uses Laser Flash Technology. At the end of the study, analytical, numerical and experimental results are presented comparatively.

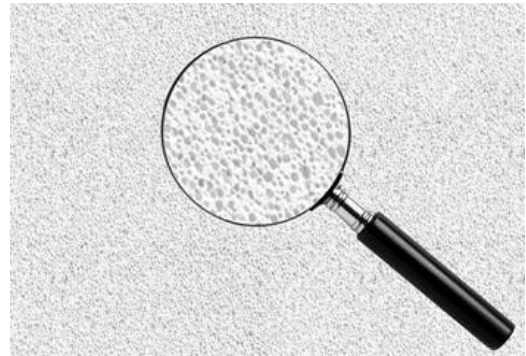
Keywords: Aerated Concrete, Thermal Conductivity, Porosity

Giriş

Dünyadaki enerji kaynaklarının her geçen gün azalması enerjinin verimli kullanılmasının önemini artırmaktadır. Enerji kaynaklarının tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de büyük bir bölümü konutların ısıtma ve soğutma gereksinimlerinin karşılanabilmesi için harcanmaktadır. Bir binanın enerji performansı büyük oranda yapı malzemesinin ısıyı geçirme özelliğine bağlıdır [1]. Enerji kayıplarının en yüksek olduğu yapı elemanları dış duvarlardır. Bu nedenle dış duvarlarda ısı iletkenliği düşük yapı elemanları tercih edilmektedir. Son yıllarda binalarda gözenekli yapı elemanları tercih edilmektedir. Bu malzemelerinin ısı özelliklerini yoğunluk, sıcaklık, nem miktarı ve malzemenin mikro yapısı etkilemektedir[2].

Gazbeton şekil (1)'de görüldüğü gibi yüksek gözenekli bir malzemedir ve tüm yapılarda makro ve mikro gözenek yapısı %69-88 arasındadır[3-4]. Bu yüksek gözenek oranı gazbetona düşük yoğunluk ve düşük ısı iletkenlik değeri sağlar. Gazbetonun en düşük ısı iletkenlik değeri kuru şartlarda görülür. Nem artmaya

başladığında ısı iletkenlikte artmaktadır[5]. Ayrıca gözenekli yapı sayesinde gazbeton ısı ve ses yalıtımında süper katkı sağlamasıyla tanınır[6-7]. Bina malzemelerinde gözeneklilik ile ısı iletkenlik arasındaki ilişki deneysel ve sayısal olarak belirlenebilir. Gazbetonun iç yapı fotoğrafları incelendiğinde gözenekliliği oluşturan hava kabarcıklarının dairesel geometride kabul edilir[8-9]. Gazbeton malzemesi iç yapı fotoğrafları incelendiğinde nispeten homojen bir yapıya sahiptir[10]. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle gazbetonun ısı özelliklerini tanımlayan bir çok deneysel çalışma olmuştur [11-20]. Literatürde bazı deneysel çalışmalar yapılırken gazbeton numunesinin dış kısmına değişik uygulamalar yapılarak ısı iletkenliği etkisi ölçülmüştür [21-22].



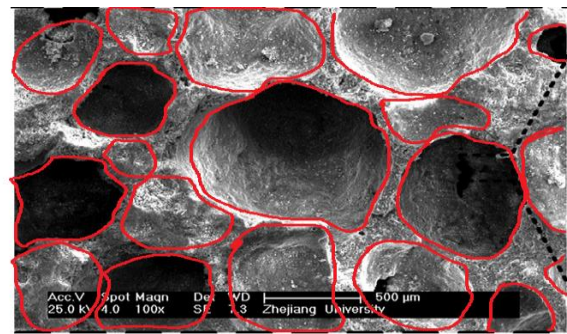
Şekil1. Gazbeton Malzemesi

Bu çalışmada değişik gözeneklilik oranlarındaki gaz beton numuneleri için literatürde yer alan ısı iletkenlik modelleri kullanılarak analitik çözümler yapılmıştır. Sayısal çözümler yapılırken değişik elektron mikroskop görüntüleri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda (100mm x100mm) boyutunda gazbeton bloğun dairesel geometride hava kabarcıkları rastgele yerleştirilerek gözeneklilik oranı elde edilmiştir. ANSYS prgramında tasarımı yapılan iç yapı kullanılarak tek boyutlu sayısal çözümler yapılmıştır. Literatürde gazbeton malzemesinin ısı iletkenliği için ağırlıklı olarak deneysel çalışmalar yapılmış olup, değişik gözeneklilik oranlarında sayısal çözümlere rastlanmamıştır. Deneysel çalışmalar sayısal ve analitik çözümleri değerlendirmek amacıyla Kırıkkale Üniversitesi KÜMLAB'ta yapılmıştır. Endüstride yeni bir malzemenin ısı iletkenliğini belirlerken üretimi yapıldıktan sonra cihazlarla labaratuvar ortamında deneysel ölçüm yapılmaktadır. Üretimden sonra bir iyileştirme yapılması için bütün işlemler tekrar yenilenmektedir. Ancak üretim gerçekleşmeden model oluşturarak ısı iletkenlik belirlenmesi durumunda deneme yanılma üretimleri gerçekleştirilmemektedir. Bu nedenle çalışmada sayısal modeller üzerinde ısı

iletkenlik belirleme ve deneysel ölçümlerle karşılaştırma yapılmıştır. Sayısal olarak ısı iletkenlik hesaplamının ürün geliştirme çalışmalarına katkısı vurgulanmıştır.

Materyal ve Metod

Gazbeton hava ve kuvarsitten oluşan karma bir malzemedir. Gazbetonunun gözeneklilik oranı içerisindeki hava kabarcıklarının miktarının bir ölçüsüdür[23]. Kuvarsite göre havanın ısı iletkenliğinin daha düşük olması nedeniyle gözenekliliğin artması durumunda gazbetonun efektif ısı iletkenlik değeri düşer. Çalışmada il önce gazbeton malzemesinin iç yapısını belirlemek için bir çok elektron mikroskop görüntüsü (SEM) incelenmiştir. Genel olarak gazbeton malzemesinin iç yapı görüntüsü Şekil (2)'deki fotoğrafa benzer olduğu tespit edilmiştir. İncelenen görüntülerde gazbeton içerisindeki gözeneklerin küresel olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Gazbetonun İç Yapı Fotoğrafı [2]

İki malzeme bir araya gelerek iyileştirilmesi istenen özelliklere sahip yeni bir karma malzeme oluştururlar. Bütün karma malzemeler için gözeneklilik, malzemenin birim hacmindeki boşluk oranıdır. Gözenekliliğin artması malzeme yoğunluğunu da etkilemektedir. Gazbetonun gözenek miktarının artması ile yoğunluğu azalır. Yoğunluğun gözeneklilik oranına bağlı olarak değişmesi tablo (1)'de verilmiştir.

Tablo 1. Gazbeton Malzemesinin Yoğunluğunun Gözeneklilik Oranına Bağlı Değişimi

Birim Hacim Kütlesi (kg/m ³)	Gözeneklilik Oranı (%)
310 - 400	88 - 85
410 - 500	85 - 81
510 - 600	81 - 77
610 - 700	77 - 73
710 - 800	73 - 69

Analitik Hesaplamalar

Gazbeton malzemesinin yoğunluk değişimine göre ısı iletkenliği hesaplanırken analitik metotlar kullanılabilir. Isıl iletkenlik belirlenirken literatürde yer alan modeller uygun geometri ve oranlar için tercih edilebilir. Efektif ısı iletkenlik (k_e), karma malzemelerde her bir karışımın ısı iletkenliği kullanılarak hesaplanan ve malzemenin bütününe ifade eden bir değerdir. Gazbeton hava ve kuvarsitten oluşan bir karma malzeme olduğundan

dolaylı eşitlik (1-4)'de verilen modeller için efektif ısı iletkenlik (k_e), hava (k_m) ve kuvarsitin (k_f) ısı iletkenliğine bağlı olarak bulunabilir. Gözeneklilik oranı gazbeton malzemesinde hava ile kuvarsitin bütün malzeme üzerindeki oranı olarak değerlendirilebilir. Analitik hesaplar yapılırken gözeneklilik oranı (\emptyset) % 88,09 alınmıştır. Analitik modellerden elde edilen sonuçlar tablo (2)'de verilmiştir.

$$\text{Paralel Model } k_e = \emptyset k_f + (1 - \emptyset)k_m \quad (1)$$

$$\text{Seri Model } k_e = \left(\frac{\emptyset}{k_f} + \frac{(1-\emptyset)}{k_m}\right)^{-1} \quad (2)$$

$$\text{Maxwell Modeli } k_e = k_c \frac{[2k_c+k_d-\emptyset_d(k_c-k_d)]}{[2k_c+k_d+\emptyset_d(k_c-k_d)]} \quad (3)$$

$$\text{Bruggeman Modeli } k_e = k_f^{\emptyset(1+m\emptyset)} k_s^{\emptyset(1+m\emptyset)} \quad (4)$$

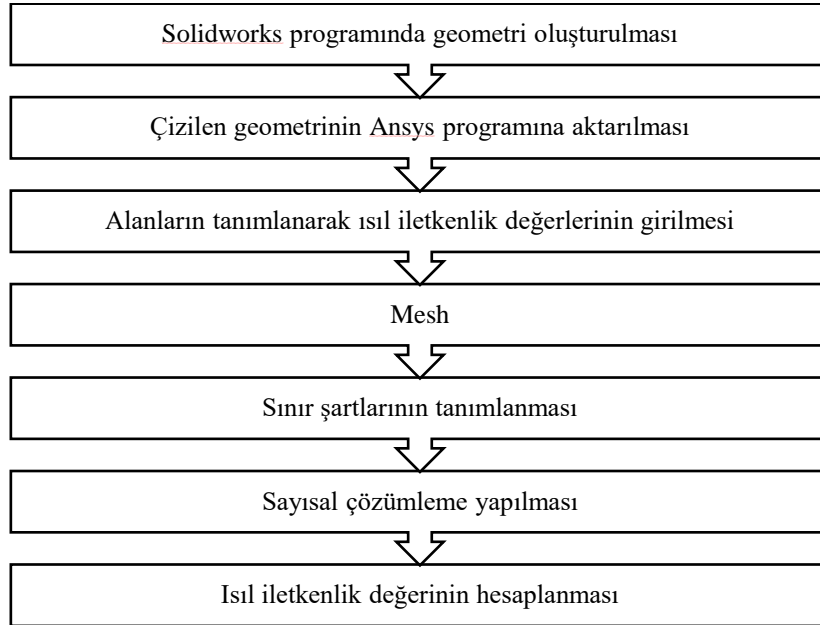
Tablo 2. Isıl İletkenliğin Analitik Çözümleri

Analitik Modeller	Isıl İletkenlik Değerleri (W/m.K)
Paralel Model	0,380
Seri Model	0,028
Maxwel Modeli	0,336
Bruggeman Modeli	0,272

Sayısal Çözümler

Isı transferinde birçok problemin çözümünde sayısal metotlarla çok başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Isı iletimi problemlerinde çözüm alanında farklı sınır şartları kullanılarak değişik noktalarda sıcaklık veya ısı akısı sayısal olarak hesaplanabilir. Bu sıcaklık ve akı değerleri kullanılarak istenen özellik bulunur. Bu

çalışmada şekil (3)'de verilen akış şeması kullanılarak efektif ısı iletkenlik bir boyutlu olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3. Sayısal Çözüm Akış Şeması

Sayısal modelleme yapılırken SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Elektron mikroskopla elde edilen SEM görüntülerinin sonlu eleman esaslı bir programla modellemesi yapılmış hava ve kuvarsit için iki farklı ısı iletkenlik değerinden karma malzemenin bütünü ifade eden efektif ısı iletkenlik değeri hesaplanmıştır. Sayısal olarak ısı

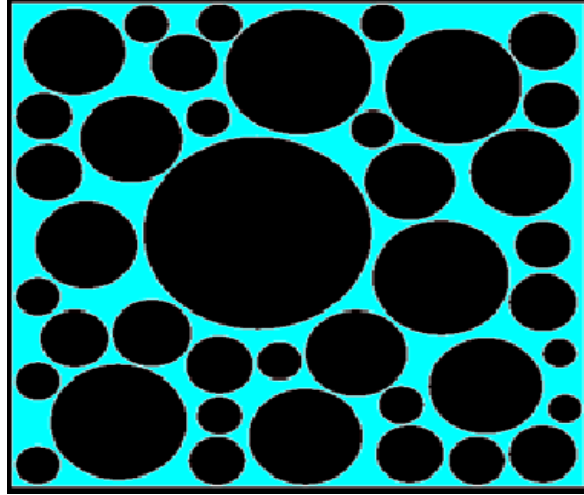
iletkenliğin belirlenmesinde tablo (1)'deki gazbeton malzemesinin yoğunluğunun gözeneklilik oranına bağlı değişimi dikkate alınarak 4 ayrı model oluşturulmuştur. Bu modellere ait özellikler tablo (3)'de verilmektedir. Modeller oluşturulurken rastgele yerleştirme yapılmış ve literatürdeki değerlere uygun oranlar belirlenmiştir.

Tablo 3. Sayısal Çözümlerde Kullanılan Modeller

Modeller	Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Gözeneklilik Oranı (%)
Model-1	300	88,09
Model-2	400	85,01
Model-3	500	81,05
Model-4	700	73,07

Çalışmada elde edilen 4 ayrı model için birim hacim kütesine karşılık gelen gözeneklilik oranı dikkate alınarak şekil (4)'de verildiği gibi iç yapı görüntüleri

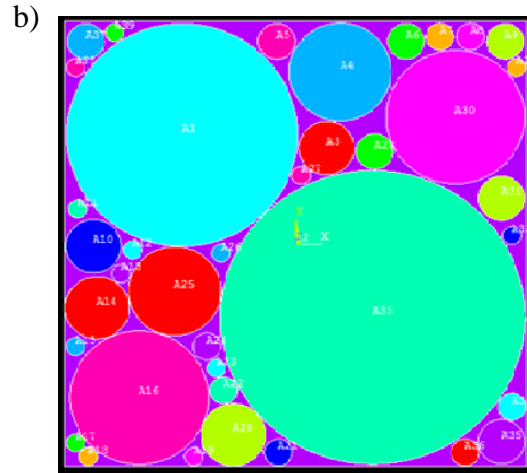
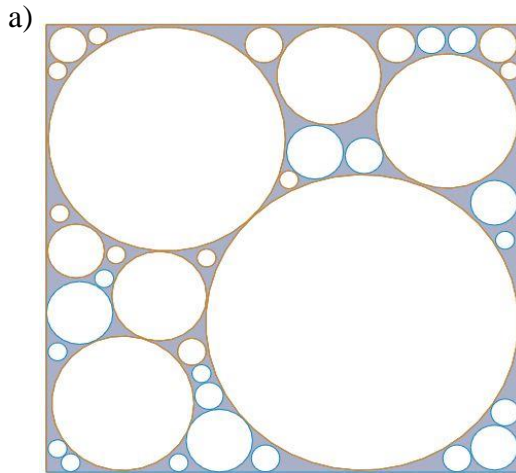
verilmiştir. İç yapı tasarımında rastgele yerleştirmeler yapılmış olup, aynı gözeneklilik oranı için farklı dağılımların etkisi dikkate alınmıştır.



Şekil 4. Modellerin İç Yapı Görüntüsü

Çalışmada gazbeton numunesinin ilk önce Solidworks programında geometrik modelinin çizimi Şekil (5a)'daki gibi yapılmıştır. Gözenekliliği elde etmek amacıyla kare eleman içerisine değişik boyutlarda rastgele daireler yerleştirilmiştir. Dairelerin alanları

toplamının kare alan içerisindeki yüzdesi hesaplanarak gözeneklilik oranı tespit edilmiştir. Şekil (5b)'de Ansys programında geometrik çizimin içerisinde yer alan daireler hava olarak, geriye kalan kısım ise kuvarsit olarak tanımlanmıştır.



Şekil 5. Program Görüntüleri a) Geometrik Model b) Ansys'de Alanların Görüntüsü

Ansys programında malzeme özellikleri tanımlanırken gözenekliliği oluşturan hava kabarcıkları için havanın ısı iletkenlik değerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimini veren Tablo (4)'deki değerler

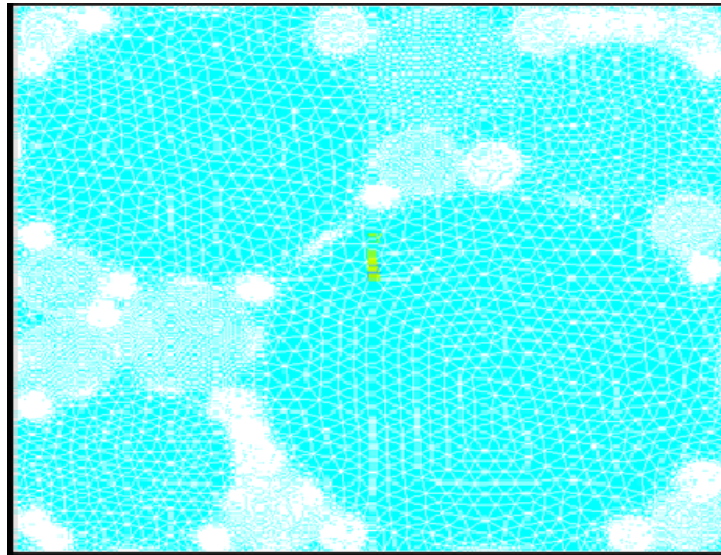
kullanılmıştır. Boşluklardan geriye kalan alan ise kuvarsiti temsil ettiği varsayılarak ortalama bir değer 3 W/m.K olarak alınmıştır.

Tablo 4. Havanın Isıl İletkenliğin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Sıcaklık (K)	Isıl İletkenlik Değeri (W/m.K)
100	0,00934
200	0,0181
400	0,0338
500	0,0407

Gazbeton malzemesinin özelliklerinin Ansys programına tanımlanmasından sonra üçgen yapıda elemanlara ayrılarak mesh işlemi yapılmıştır. Mesh yapılırken belirli

bölgelerde mesh yoğunluğu şekil (6)'da gösterildiği gibi farklı kullanılarak analizin doğruluğu artırılmıştır. Mesh yapılırken düğüm sayısının değişimi dikkate alınmıştır.



Şekil 6. Ansys'de Mesh Yapısının Gösterimi

Sayısal çözümler yapılırken düğüm noktası sayısının etkisi tablo (5)'de verilmiştir. İnceleme yapılan model (1) ve model (2) için 10.000-40.000 arasında

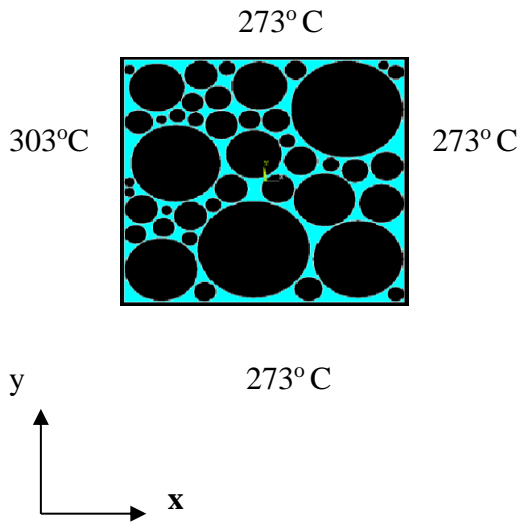
düğüm noktası kullanılarak ısı geçişi hesaplanmıştır. İncelenen modellerde 40.000 değerinden sonra değişim ihmal edilebilecek seviyeye ulaştığından bütün

modeller için düğüm sayısının 40.000 yakın değeri kullanılarak çözümler yapılmıştır.

Tablo 5. Düğüm Noktası Sayısının Çözümlere Etkisi

Sayısal Modeller	Düğüm Noktası Sayısı	Hesaplanan Q (W)
Model-1	14600	0,22241
	28900	0,22244
	39970	0,22246
Model-2	10800	0,34213
	23460	0,34216
	39980	0,34219
Model-3	39560	0,49943
Model-4	40200	0,61708

Mesh işleminden sonra şekil (7)'deki sabit yüzey sıcaklığı sınır şartları Ansys programına tanımlanmıştır. Sınır şartları belirlenirken (y) doğrultusunda aynı sıcaklık değerleri alınarak geometri bir boyutlu çözümlere uygun hale getirilmiştir.



Şekil 7. Sınır Şartlarının Gösterimi

Sınır şartlarının tanımlanmasından sonra Ansys programında çözüm yapılmış ve bir boyutlu ısı geçişi miktarı düğüm noktaları üzerinde elde edilmiştir. Bir

doğrultudaki düğüm noktalarının herbirinde farklı ısı değeri hesaplanmıştır. Bu değerlerin ortalaması alınarak ortalama ısı geçiş miktarı belirlenmiştir. İnceleme yapılan dört modele ait çözüm sonuçlarından elde edilen sıcaklık dağılımları şekil (8) ve şekil (9)'da verilmiştir.

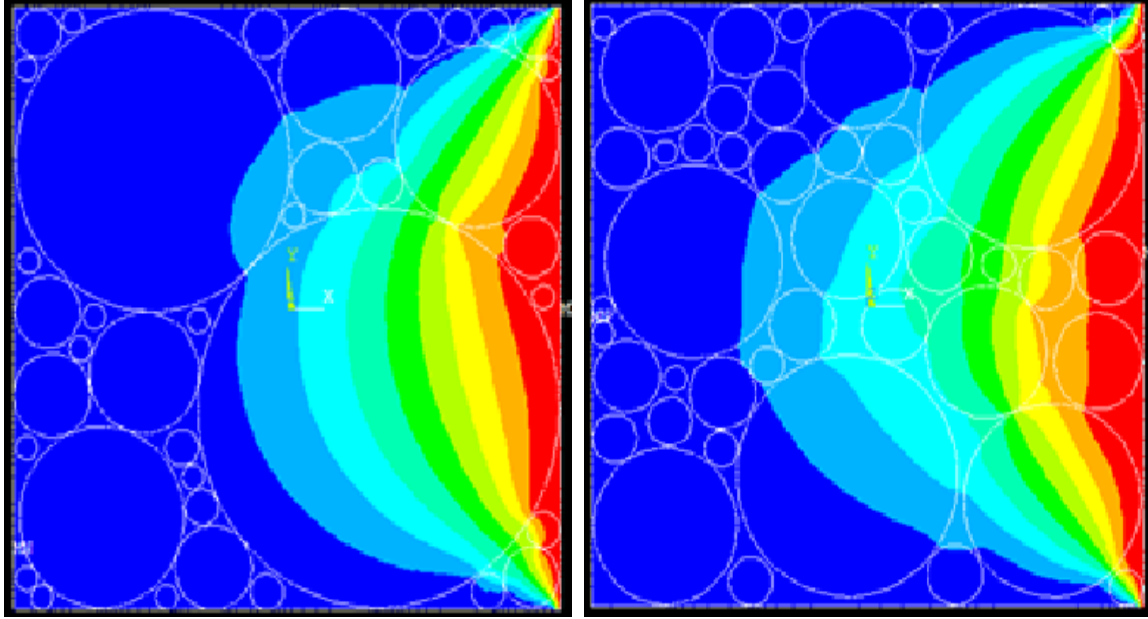
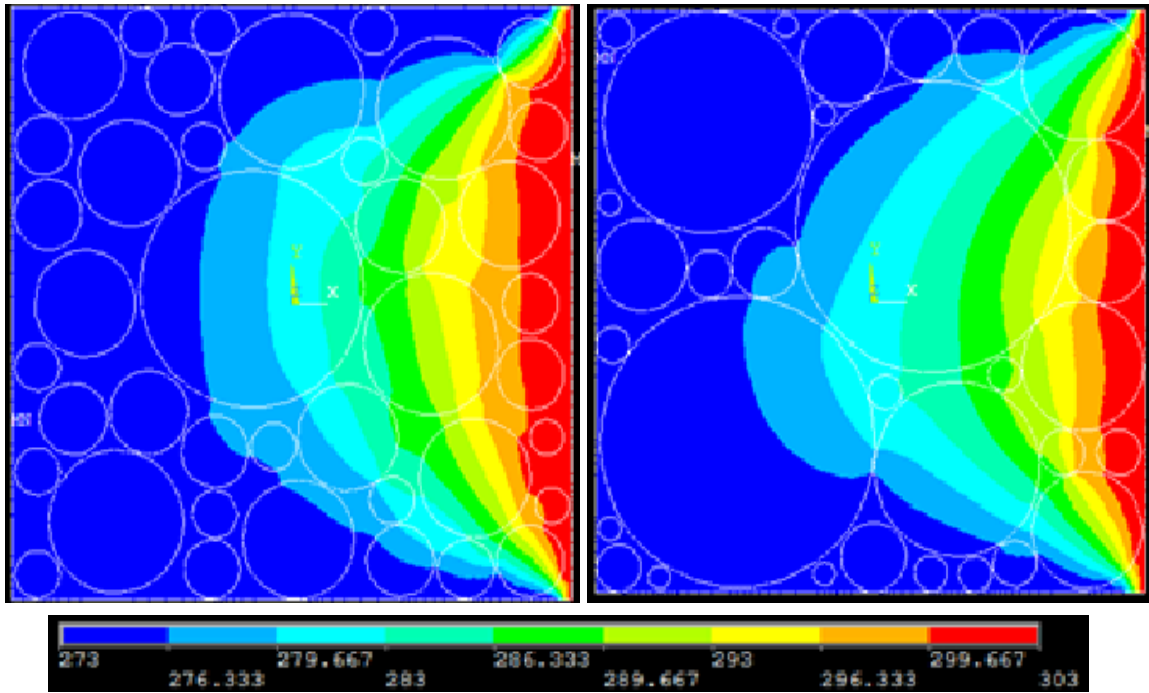
Isıl iletkenliğin sayısal olarak belirlenmesinde eşitlik (5)'de verilen Fourier'in ısı iletim yasasının ifadesi kullanılmıştır.

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dn} \quad (5)$$

Sayısal çözümlerden elde edilen ısı iletkenlik değerlerine ait sonuçlar tablo (6)'da verilmiştir. Tablo (6) incelendiğinde kuru birim hacim ağırlığı arttıkça ısı iletkenlik değeri artmaktadır. Çünkü hacim ağırlığı arttıkça porozite azalmaktadır. Gazbeton karma malzemesinde gözenekliliği temsil eden havanın ısı iletkenlik değeri kuvarsitten düşüktür. Hava kabarcığı miktarı arttıkça ısı iletkenlik düşmektedir.

Tablo 6. Sayısal Çalışmada Elde Edilen Isıl İletkenlik Değerleri

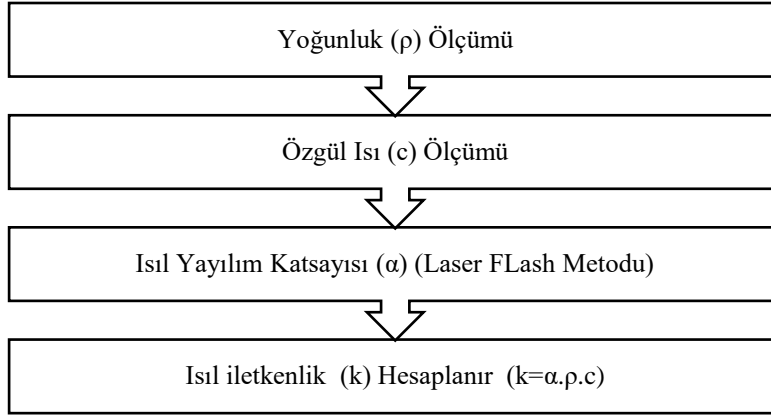
Modeller	Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/m.K)
Model-1	300	0,077
Model-2	400	0,125
Model-3	500	0,165
Model-4	700	0,214

**Şekil 8.** Model 1 ve 2 için Sıcaklık Dağılımı**Şekil 9.** Model 3 ve 4 için Sıcaklık Dağılımı

DeneySEL Çalışmalar

Isı geçişi çözümlerinde ısı iletkenliğin ısı kapasitesine oranı önemli bir özellik olup ısı yayılım katsayısı (α) olarak adlandırılır. Isı yayılım katsayısı bir malzemede kararlı olmayan şartlar altındaki

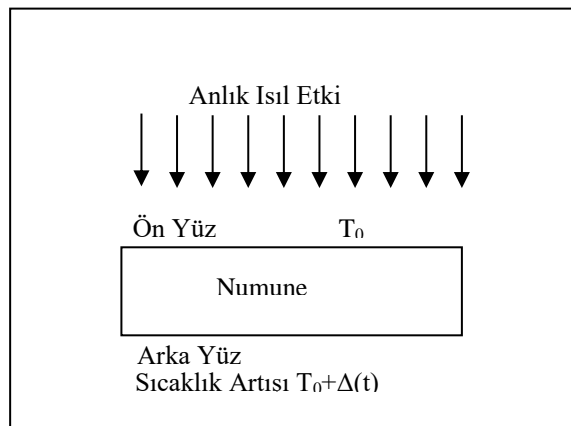
ısı akış hızının ölçümüdür. Isı iletkenliğin belirlenebilmesi için ısı yayılım katsayısının ölçülmesi gerekir. Gazbetonun ısı iletkenliğinin belirlenmesi için yapılan deneySEL çalışmalara ait akış şeması şekil (10) 'da verilmiştir.



şekil 10. DeneySEL Ölçümlerin Akış şeması

şekil (11) 'de gazbeton malzemesinin laser flash metoduyla ısı iletkenliğinin ölçümü şematik olarak gösterilmiştir. Bu metotla ölçüm yapılırken önce numune sabit bir başlangıç (T_0)

sıcaklığında tutulur. Ön yüz anlık bir enerji (genellikle laser) depolar ve belli bir zaman aralığında arka yüzeydeki sıcaklık artışı zamanın fonksiyonu olarak kaydedilir.



şekil 10. Laser Flash Metodu İle Numune Üzerindeki İşlemlerin Gösterimi

DeneySEL olarak yapılan ısı iletkenlik ölçümlerinde numunelerin ISO

8302 'e göre hazırlanmasından sonra kuru durumda ölçümler yapılmaktadır. Deney

metodu olarak ISO 8302 ve PR EN 12664' de verilen metod kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar tablo (7)'de verilmiştir.

Tablo 7. Deneysel Sonuçlar

Kuru Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)	Isıl İletkenlik Değeri (W/m.K)
300	0,085
400	0,121
500	0,158
700	0,216

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

İçyapı geometrisi ısı iletkenliği etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. Bu çalışmada gazbeton malzemesinin içyapısını gösteren elektron mikroskop görüntüleriyle (SEM) benzerlik taşıyan dairesel geometriler tercih edilmiştir. Gazbeton malzemesinin ısı iletkenlik değeri yapılan analizlerden görüldüğü gibi gözeneklilik oranına bağlı olarak değişmektedir. Gazbetonun gözeneklilik oranı arttıkça yoğunluk ve ısı iletkenlik değeri azalmaktadır.

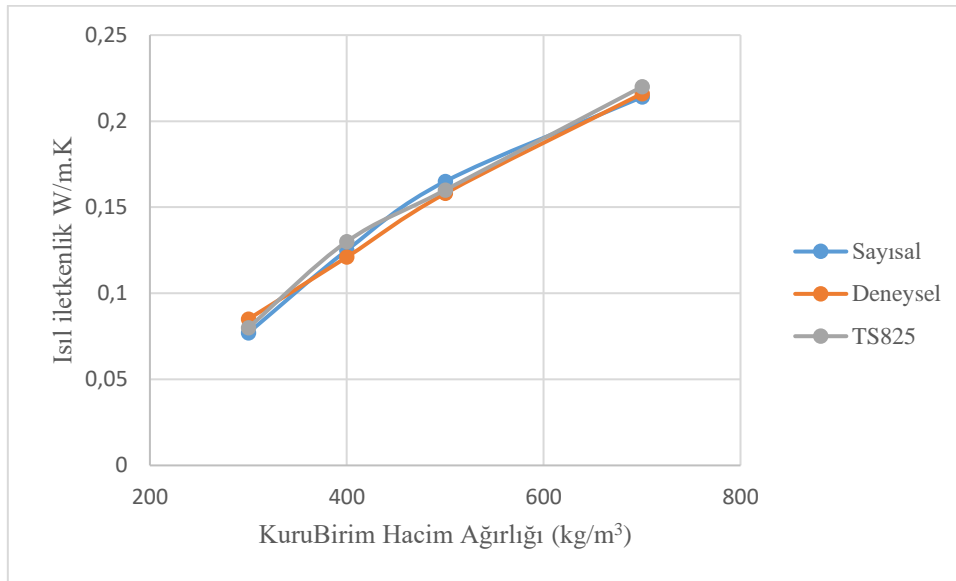
Gazbetonun içyapı olarak efektif ısı iletkenlik incelendiği zaman ara faz malzemesinin etkisi daha net anlaşılmaktadır. Sistemde ısı iletkenlik

değeri düşük olan ara fazın miktarı azalmasıyla, karışım kuralına bağlı olarak da sistemin efektif ısı iletkenliği artmaktadır. Gözeneklerin tane boyutlarının küçülmesi durumunda efektif ısı iletkenlik azalacaktır.

$$\frac{\text{ana faz}}{\text{ara faz}} \uparrow \quad \text{İletkenlik} \uparrow$$

Çalışmada analitik modellerle yapılan ısı iletkenlik hesaplarının deneysel ölçümlerden çok farklı olduğu tespit edilmiştir. Litertürde kullanılan analitik metotler karmaşık geometrilerde uygun sonuçlar vermemektedir. Basit geometriye sahip karma malzemeler için daha kullanışlı olmaktadır.

Değişik gözeneklilik oranlarındaki gaz beton malzemesinin sayısal olarak hesaplanan, deneysel olarak ölçülen ve TS 825'de yer alan ısı iletkenlik değeri karşılaştırmalı olarak şekil (12)'de verilmiştir. Deneysel olarak ölçülen ısı iletkenlik değeri ile sayısal olarak hesaplanan değeri için hata yüzdesi % 3-4 civarındadır. Aynı zamanda sayısal ve deneysel sonuçları TS825 standartındaki değeriyle karşılaştırdığımızda % 2-4 arasında hatalar bulunmaktadır.



Şekil 12. Isıl İletkenlik Değerlerinin Karşılaştırması

Kaynaklar

[1] Budaiwi, A. Abdou, M. Al-homoud, Variations of thermal conductivity of insulation materials under different operating temperatures: impact on envelope-induced cooling load, Journal of Architectural Engineering 8 (4) (2002) 125-132.

[2] Hong-Qing Jin, Xiao-Li Yao, Li-Wu Fan, Xu Xuc, Zi-Tao Yu, Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content, International Journal of Heat and Mass Transfer 92 (2016) 589-602

[3] Y.E. Cicek, Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University, Turkey (2002).

[4] S. Kartal, Ph.D. Thesis, Trakya University, Turkey (2001).

[5] Z. Pehlivanli, R. Calin, I. Uzun, Effect of moisture and temperature on thermal conductivity of G2/04 class autoclaved aerated concrete, Asian J. Chem. 22 (2010) 4104-4110.

[6] A. Kılıç, C.D. Atis, E. Yaşar, Özcan, High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures, Cement Concrete Research 33 (10) (2003) 1595-1599.

[7] G.M. Glenn, G.M. Gray, W.J. Orts, D.W. Wood, Starch-based lightweight concrete: effect of starch source processing method and aggregate geometry, Industrial Crops and Products 9 (2) (1999) 133-144.

[8] A. Bouguerra, A. Ait-Mokhtar, O. Amiri, M. B. Diop, "Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique" Heat Mass Transfer, 28, 1065-1078, (2001).

[9] Kadashevich, H.-J. Schneider, D. Stoyan, "Statistical modeling of the geometrical structure of the system of artificial air pores in autoclaved aerated concrete", Cement and Concrete Research, 35, 1495, (2005)

[10] N. Narayanan, K. Ramamurthy, Structure and properties of aerated

concrete: a review, *Cement Concrete Composite* 22 (2000) 321–329.

[11] A.D. Stuckes, A. Simpson, The effect of moisture on the thermal conductivity of aerated concrete, *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 6 (1985) 49–53.

[12] J.P. Laurent, An estimation model for the dry thermal-conductivity of autoclaved aerated concrete, *Mater. Struct.* 24 (1991) 221–226.

[13] J.P. Laurent, C. Guerrechaley, Influence of water-content and temperature on the thermal-conductivity of autoclaved aerated concrete, *Mater. Struct.* 28 (1995) 464–472.

[14] C. Boutin, Thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: modelling by the self-consistent method, *Mater. Struct.* 29 (1996) 609–615.

[15] M.S. Goual, A. Bali, M. Quéneudec, Effective thermal conductivity of clayed aerated concrete in the dry state: experimental results and modelling, *J. Phys.D Appl. Phys.* 32 (1999) 3041–3046.

[16] D. Gawin, J. Kosny, A. Desjarlais, Effect of moisture on thermal performance and energy efficiency of buildings with lightweight concrete walls, in: 2000 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings Efficiency, Panel 3: Commercial Buildings: Technologies, Design, and Performance Analysis, August 20–25, 2000, Pacific Grove, California, USA, 2000.

[17] B. Bhattacharjee, S. Krishnamoorthy, Permeable porosity and thermal conductivity of construction materials, *J. Mater. Civ. Eng.* 16 (2004) 322–330.

[18] M. Albayrak, A. Yörükog̃lu, S. Karahan, S. Atlıhan, H.Y. Aruntas_, _I.

Girgin, Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete, *Build. Environ.* 42 (2007) 3161–3165.

[19] M. Jerman, M. Keppert, J. Vy' borny', R. C'erny', Hygric, thermal and durability properties of autoclaved aerated concrete, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 352–359.

[20] M. Campanale, M. Deganello, L. Moro, Effect of moisture movement on tested thermal conductivity of moist aerated autoclaved concrete, *Transp. Porous Media* 98 (2013) 125–146.

[21] Soon-Ching Ng, Kaw-Sai Low, Thermal conductivity of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete panel, *Energy and Buildings* 42(2010) 2452-2456.

[22] Kaw-Sai Low, Soon-Ching Ng, and Ngee-Heng Tioh, Thermal conductivity of soil-based aerated lightweight concrete, *KSCCE Journal of Civil Engineering* (2014) 18(1):220-225.

[23] N. Narayanan, K. Ramamurthy, Microstructural investigations on aerated concrete, *Cement and Concrete Research* 30 (2000) 457± 464

[24] B.Doğan, N.Çekel, Two-Dimensional And Numerical Analysis Of Sialon-Based Cutting Tips Thermal Conductivity By Using Sem Images, *International Interdisciplinary Journal of Scientific Research* Vol. 1 No:2 (2014).

[25] TS825 Binalarda ısı yalıtım kuralları, 2008.