

Köpük Betonun Yoğunluk ve Sıcaklığa Bağlı Isıl İletkenlik Katsayısının Isı Akış Ölçer Yöntemiyle Belirlenmesi

Murat KORU*1

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta

(Alınış / Received: 10.11.2016, Kabul / Accepted: 27.01.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 28.02.2017)

Anahtar Kelimeler

Köpük beton,
Isıl iletkenlik katsayısı k,
Sıcaklık,
Yoğunluk,
Isı akış ölçer (IAÖ)

Özet: Köpük beton, taze halde yüksek akıcılığa ve sertleştikten sonra normal betona kıyasla düşük yoğunluğa ve yüksek ısıl dirence sahip ısıl işlemsiz olarak üretilebilen bir hafif beton türüdür. Köpük betonun yapı ve yalıtım elemanı olarak kullanılabilme potansiyeli birlikte değerlendirildiğinde bina ısıl performansı, konforu ve doğru projelendirilmesi açısından yoğunluk ve sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik katsayısının (k) belirlenmesi önemlidir. Bu çalışmada 309-1427 kg/m³ kuru yoğunluğa sahip 10 farklı köpük beton numunenin yoğunluk ve sıcaklığa bağlı k değerleri ısı akış ölçer (IAÖ) yöntemi ile belirlenmiştir. Ölçümler (-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50 °C) ortalama sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümü yapılan tüm köpük beton numuneleri için sıcaklığın ve yoğunluğun artması ile ısıl iletkenlik katsayısı artmıştır. Elde edilen deneysel bulgulardan köpük beton için sıcaklık, yoğunluk ve k değeri arasındaki ilişkiyi ifade eden ve ısıl iletkenlik katsayılarının değişimlerini tahmin etmeye yönelik bir bağıntı önerilmiştir. Deneyler sonucunda köpük betonun ısıl iletkenlik katsayısının geleneksel betona oranla ve yoğunluğa bağlı 5-27 kat daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte köpük betonun yoğunluğa bağlı $R_{eq}=1,5$ (m²K/W) değerini sağlayan uygulama kalınlıkları sunulmuştur. Sonuç olarak ısıl iletkenlik katsayısı ve uygulama kalınlığı açısından en ideal köpük beton numunesi KB-309 (kg/m³) olarak belirlenmiştir.

Determination of Thermal Conductivity of Foam Concrete with Heat Flow Meter Method Depending on Density and Temperature

Keywords

Foam concrete,
Thermal conductivity k,
Temperature,
Density,
Heat flow meter (HFM)

Abstract: Foam concrete which can be produced without heat treatment process is a lightweight concrete with high flowability in its fresh form and low density and high thermal resistance compared to regular concrete after hardening of it. When the foam concrete is evaluated in terms of its potential as a structural and an insulation material, it is so important to determine thermal conductivity of the foam concrete depending on density and temperature in order to make a correct design in terms of thermal performance and comfort of the building. In the study, k values of ten different foam concrete samples with dry densities ranging from 309 to 1427 kg/m³ are determined by heat flow meter method (HFM) depending on density and temperature. Measurements have been performed mean temperature values of -10, 0, 10, 20, 30, 40 and 50 °C respectively. Thermal conductivities are increased depending on increase of temperature and density for all measured foam concrete samples. As a result of measurement findings, an equation describing the relationship among temperature, density and k value is proposed for foam concrete to determine thermal conductivity variations. It is also observed from the measurements that thermal conductivity of the foam concrete is 5-27 times lower than that of traditional concrete depending on variations of the densities. In addition, application thicknesses of the foam concrete providing $R_{eq}=1,5$ (m²K/W) value depending on the densities are given. Finally, the most ideal foam concrete sample is determined as KB-309 (kg/m³) in terms of thermal conductivity and application thickness.

*İlgili yazar: muratkoru@sdu.edu.tr

1. Giriş

Günümüzde modern yapı ve inşaat endüstrisi yüksek ısı yalıtım sağlamakla birlikte, yeterli mukavemet özelliklere sahip, enerji etkin bina hedeflerine uygun yapı elemanlarının geliştirilmesi ile ilgilenmektedir. Köpük beton ürünü elemanlar, hem yapı hem de yalıtımı bir arada sunabilecek bir potansiyele sahiptir. Köpük beton, tasarlandığı malzemenin yoğunluk ve kompozisyonuna bağlı olarak normal yoğunluktaki betondan % 10-50 daha düşük ısı iletkenlik katsayısı sunabilen bir hafif beton çeşidi olarak bilinmektedir. Köpük beton çimento, su ve agrega karışımına köpük ajanının ilave edilmesiyle elde edilen ve bünyesinde hacminin %75-80'i oranında bağımsız kapalı gözenek içeren alternatif bir yapı ve yalıtım malzemesidir. Köpük beton taze halde düşük viskoziteye, düşük yoğunluğa ve düşük ısı iletkenlik değerine sahiptir. Köpük beton genel olarak 300-1600 kg/m³ kuru yoğunluğuna ve 1-43 MPa (28g.) basınç dayanımına sahiptir [1-7].

Köpük beton ilk defa 1923 yılında üretilerek patent altına alınmış ve son yıllarda binalarda taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. 1954 yılında Valore, 1963 yılında Rudnai, Short ve Kinniburg tarafından köpük betonun bileşimi, özellikleri, kullanımı ve yapısı hakkında detaylı çalışmalar yapılmıştır. Jones ve McCarthy köpük betonun tarihçesi, yangın dayanımı, ısı iletkenlik ve akustik özelliklerini araştırmışlar ve dünya çapında yürütülen bazı uygulamaları değerlendirmişlerdir [2]. Ramamurty vd. [7] yaptıkları çalışmada köpük beton bileşenlerini, karışım tasarımını, taze ve sertleştirilmiş beton özelliklerini inceleyerek sınıflandırmışlardır. Literatürde normal beton ile ilgili yapılan çalışmaların tümü köpük beton içinde yapılmıştır [9-11]. Kararlı köpük beton üretimi, köpük ajanı seçimine, köpük hazırlama yöntemlerine, üniform gözenek oluşumu için katkı seçimine ve karışım tasarımına bağlıdır.

Köpük beton, düşük ısı iletkenlik özelliği sayesinde termal performans ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu özelliği ile köpük beton, düşük enerji tüketen yapılar (Low Energy Building) açısından alternatif yapı ve yalıtım malzemesi olabilme kapasitesine sahiptir. Köpük betonun, binalarda duvar, zemin, çatı elemanı olarak kullanılabilmesi, prefabrik uygulamalarda kullanılabilmesi için ısı iletkenlik katsayısının (k) doğru olarak belirlenmesi ve daha yüksek ısı dirence sahip köpük betonların geliştirilmesi önemlidir. Isıl iletkenlik katsayısının belirlenmesinde standart ölçüm metotları, muhafazalı sıcak plaka (guarded hot plate-GHP), ısı akış ölçer (heat flow meter-HFM) vb. (ISO8301-TSEN12264-ASTMC518) kullanılmaktadır [12-14]. Bu yöntemler ile ±%1'e kadar doğrulukta ölçüm yapmak mümkündür. Köpük betonun k değeri, köpük yoğunluğuna, köpük ajanına, gözenek yapısına,

malzemenin yoğunluğuna, karışım oranlarına, bağlayıcıya, nem içeriğine ve sıcaklık farkına bağlıdır.

Binaların ısı direnç hesaplamalarında kullanılan k değerleri laboratuvar ortamındaki sıcaklık ve nem değerleri için izin verilen şartlarda elde edilir. Ancak binayı oluşturan duvar, taban, tavan vb. bileşenler binanın bulunduğu yerdeki iklim şartlarına bağlı farklı sıcaklık ve nem değerlerine maruz kalır. Bu yüzden yapı ve yalıtım malzemesi olarak kullanılacak malzemelerin gerçek ısı performansları standart şartlarda elde edilen değerlerden farklı olmaktadır. Bu nedenle EN standartlarına uygun bir ölçüm cihazı ile köpük betonun sıcaklığa ve yoğunluğa bağlı k değerlerinin belirlenmesi önemlidir. Böylece yapı ve yalıtım malzemesi olarak köpük betonun kullanılabilme potansiyeli de belirlenmiş olacaktır.

Literatür incelendiğinde çalışma sıcaklıklarına bağlı yapılan çalışmalar genellikle klasik yalıtım malzemelerine yöneliktir. Aldrich ve Bond [15] ekstrüde polistiren ve poliüretan köpüğün farklı sıcaklık değerleri için k değerlerini teorik ve deneysel olarak belirlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada sıcaklığın artması ile k değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir.

Wakili vd., [16] tarafından yapılan çalışmada 6 farklı yalıtım malzemesinin k değerleri HFM yöntemi ile belirlenmiştir. Wilkes ve Child [17] deneysel bir sistematik içerisinde muhafazalı sıcak kutu (hotbox) yöntemi ile çatı test sistemi geliştirerek cam elyafın ısı performansını incelemişlerdir. Besant ve Miller [18] tarafından yapılan deneysel çalışmada ise gevşek dolgulu cam elyaf (CE) kullanılmıştır. Cam elyaf için yapılan çalışmada yüksek sıcaklık farklarında ısı direncin, düşük sıcaklık farklarına göre % 35-50 daha düşük olduğu görülmüştür. ODE ve İzocam teknik el kitaplarında bazı yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı k değerleri verilmektedir. Tüm yalıtım malzemeleri için sıcaklığın artması ile iletkenlik değerlerinin arttığı görülmüştür [13-21].

Abdou vd., [22] tarafından, 32 yalıtım malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı, 35 °C ortalama sıcaklık farkı için, ısı akış ölçer (IAÖ) yöntemi ile ASTM C518 standardına ve ISO 8301 protokolüne uygun olarak belirlenmiştir. Ölçümler 4-43 °C aralığında 5 farklı (4, 10, 24, 38, 43 °C) sıcaklık değerinde yapılmış ve sıcaklığın artması ile k değerlerinde artış görülmüştür. Gnip vd., [23] tarafından yapılan çalışmada IAÖ yöntemine uygun olarak 0-50 °C sıcaklık aralığında farklı yoğunluk ve kalınlıklara sahip yalıtım malzemesinin k değeri belirlenmiştir. Sonuç olarak genleştirilmiş polistiren strafor (EPS) için yoğunluğun artması ile iletkenlik değerinin düştüğü ve bununla birlikte sıcaklığın artması ile iletkenlik değerinin arttığı gözlenmiştir. Lakatos and Kalmar [24] tarafından yapılan çalışma, beyaz ve gri EPS yalıtım levhalarının farklı kalınlıklarda ve farklı yoğunluklardaki ısı iletkenlik katsayıları

sunulmuştur. EPS örneklerinin ısı iletkenlikleri Lambda 2000 ısı akış ölçer (IAÖ) vasıtasıyla ölçülmüştür. Farklı yoğunluklardaki EPS'nin k değerleri 17 °C ortalama çalışma sıcaklığında ölçülmüştür. Isıl iletkenlik katsayısının artan yoğunluk ile düştüğü tespit edilmiştir. Lakatos [25] tarafından yapılan çalışmada binalar için en çok kullanılan geliştirilmiş polistiren strafor, ekstrude polistiren strafor ve cam elyaf esaslı (EPS, XPS ve CE) 6 farklı malzemeden yapılan yalıtım levhası, termal özellikleri açısından incelenmiştir. Bu amaçla 2 farklı deneysel bina yapısı oluşturulmuş ve 0,01 - 0,3 m kalınlığa kadar yukarıda anılan malzemeler ile yalıtılmıştır. Hesaplamalar için her bir numunenin ısı iletkenlik katsayısı, IAÖ kullanılarak belirlenmiştir. Sonuç olarak bu malzemelerin toplam ısı transfer katsayıları (U, W/m²K), sönümlenme kabiliyeti, enerji tutma kapasiteleri belirlenmiştir.

Ochs F vd., [26] granül şeklinde yalıtım malzemelerinin yalıtım amaçlı kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada sıcaklığın fonksiyonu olarak % nem içeriğine sahip bazı izolasyon (expanded glass granüle (EGG), Expanded perlit (EP), expanded clay (EC), foam glass granüle (FGG) malzemelerinin ısı özellikleri belirlenmiştir. Karamanos vd., [27] tarafından yapılan çalışmada taş yünü yalıtım malzemesinin sıcaklık ve nem içeriğine bağlı ısı iletkenlik katsayısındaki değişim sunulmuştur. Çalışmada 25, 50, 75, 100, 250, 500 ve 1000 °C sıcaklıklarında k-radyasyon, k-gaz iletim, k-katı iletim ve k-toplam ısı iletkenlik katsayıları verilmiştir. Sıcaklığın artması ile k-toplam değerleri artmıştır.

Özel vd., [28] tarafından yapılan çalışmada polimer betonun farklı karışım bileşenlerine ve farklı plaka sıcaklıklarına göre ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Polimer beton için normal betona göre 5-6 kat daha düşük ısı iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Çalışma sonucunda faz malzeme oranının ve çalışma sıcaklıklarının artmasıyla ısı iletkenlik katsayısının arttığı gözlenmiştir. Demir vd., [29] tarafından yapılan çalışmada pomza agregalı hafif beton blok özelliklerine uçucu kül ve taneli polistiren köpük katkısının etkisi incelenmiştir. Çalışmada polistiren katkısız örneklerin k değeri 0,6 (W/mK) iken polistiren katkılı örneklerin ısı iletkenlik katsayıları 0,34 (W/mK) olarak belirlenmiştir. Othuman [30] tarafından yapılan çalışmada farklı yoğunluklara sahip köpük betonların ısı iletkenlik değerleri araştırılmıştır. Isıl iletkenlik ölçümleri muhafazalı sıcak plaka yöntemi ile yapılmıştır. Yoğunluğun artması ile ısı iletkenlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir.

Ramirez vd., [31] tarafından yapılan çalışmada hindistan cevizi liflerinin ferro çimento ile yapılmış panel duvarlarda kullanılma potansiyeli araştırılmıştır. Klasik yapı elemanları kırmızı kil tuğlası, boşluklu beton blok ve hafif beton tuğlası k-

değerleri ölçülmüş ve sırasıyla 0,93-0,683 ve 0,536 (W/mK) olarak belirlenmiştir. Yazarlar tarafından geliştirilen hindistan cevizi lifleri ile geliştirilen konfigürasyon için k değeri 0,221 (W/mK) olarak belirlenmiştir. Kuru [32] tarafından yapılan çalışmada kapalı hücreli yalıtım malzemeleri ve Kuru [33] açık hücreli yalıtım malzemelerinin sıcaklık ve yoğunluğa bağlı k değerleri belirlenmiştir. Tüm malzemeler için sıcaklığın artması ile k değerinin arttığı gözlenmiştir. Jing Liu vd., [34] Binaların yalıtımında yaygın olarak kullanılan malzemelerden birisinin köpük beton olduğunu vurgulamışlar ve palmiye yağının köpük beton ısı iletkenliğine olan etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Numunelerin ısı iletkenlik katsayıları BS EN 12664 standardına uygun olarak ölçmüşlerdir. Palmiye yağı kullanılan köpük beton numunelerinin k değerlerini klasik duvar elemanı olan briket ve tuğladan %22-48 daha düşük değerlerde 0.47 (W/mK) olarak belirlemişlerdir.

Chen ve Liu [35] tarafından yapılan çalışmada özgün EPS katkılı köpük betonun mekanik, termal özellikleri ve işlenebilirliğine köpük içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Taze halde 400 ve 800 kg/m³ yoğunluğa sahip özgün köpük betonlar için dayanımın 3-13 Mpa arasında değiştiği ve ısı iletkenlik değerinin 0,09-0,25 (W/mK) arasında değiştiğini ve EPS katkısının işlenebilirliği artırdığını vurgulamışlardır.

Kodur ve Sultan [36], yüksek mukavemetli betonun yanma direncinin hesaplanabilmesi için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ısı iletkenlik, özgül ısı, ısı genişleme ve kütle kaybının belirlenmesine yönelik çalışmalar yürütmüşlerdir. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümleri sıcak tel metodu ile yapılmıştır. Sonuç olarak 0-1000 °C sıcaklıkları arasında k değerini veren eşitlikler sunulmuştur. Sayadi vd., [37] köpük betonun yanma direnci, ısı iletkenliği ve basınç dayanımına EPS partiküllerinin etkisini araştırmışlardır. 150-1200 kg/m³ arasında değişen yoğunluk değerlerine sahip numuneler hazırlamışlardır. Isıl iletkenlik ölçümleri ısı akış ölçer yöntemi ile gerçekleştirilmiş olup, numunelerde % EPS hacminin artırılması ile ısı iletkenlik değerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Yukarıdaki literatür incelemelerinden anlaşılacağı üzere, yalıtım ve yalıtım amaçlı geliştirilen malzemelerin, çalışma sıcaklıkları değiştikçe ısı iletkenlik katsayılarının değiştiği görülmektedir. Bu nedenle sert iklim şartlarında ısı performansın ve enerji verimli tasarımın daha doğru tespit edilebilmesi için yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı k değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışma binalarda alternatif yalıtım malzemesi olabilecek köpük betonun, sıcaklığa ve yoğunluğa bağlı k değerlerinin IAÖ yöntemiyle belirlenmesini amaçlamaktadır.

2. Materyal ve Metot

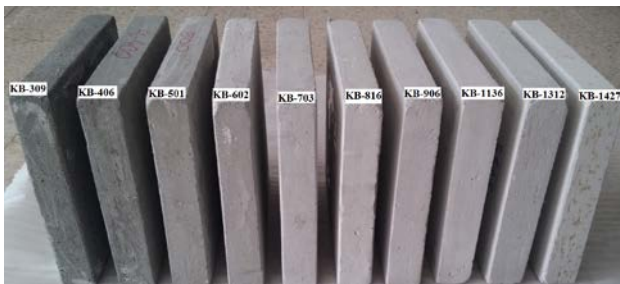
2.1. Materyal

Bu çalışmada hem yapı hem de yalıtım malzemesi olabilecek alternatif hafif hücreli köpük betonun farklı yoğunluk ve sıcaklık değerlerine bağlı olarak ısı iletim katsayılarındaki değişim incelenmiştir. Deneysel çalışmada çimento, kalker tozu, polipropilen elyaf, süper akışkanlaştırıcı ve protein esaslı köpük ajanı kullanılarak köpük beton numuneler üretilmiştir. 300-1200 kg/m³ teorik kuru yoğunluk aralığında 10 farklı karışım tasarımı hazırlanmıştır. Karışıma girecek bileşen miktarları hacim yöntemi esas alınarak belirlenmiştir. Tüm karışımlarda çimento dozajı ve su/katı (s/k) oranı 0,30 olarak sabit tutulmuştur. Kum/çimento (k/ç) oranı ise 0-2,99 arasında değişmiştir. Tablo 1'de 1 m³ karışım için hedeflenen kuru yoğunluk ve bileşen oranları sunulmuştur.

Tablo 1. Kuru yoğunluklara bağlı köpük betonlar için bileşen miktarları (1 m³ için)

No	ρ_{Kuru} (kg/m ³)	Çimento (kg)	Kalker (kg)	Su (L)	Katkı (kg)	Lif (kg)	Köpük (kg)	s/k	K/ç
1	300	300	0	89	1,48	3,0	76,55	0,30	0,00
2	400	300	96	119	1,98	3,0	70,22	0,30	0,32
3	500	300	196	149	2,48	3,0	63,85	0,30	0,65
4	600	300	296	179	2,98	3,0	57,53	0,30	0,99
5	700	300	396	209	3,48	3,0	51,16	0,30	1,32
6	800	300	496	239	3,98	3,0	44,84	0,30	1,65
7	900	300	596	269	4,48	3,0	38,47	0,30	1,99
8	1000	300	697	299	4,98	3,0	32,04	0,30	2,32
9	1100	300	797	329	5,48	3,0	25,71	0,30	2,66
10	1200	300	897	359	5,99	3,0	19,35	0,30	2,99

Numuneler çimento, kalker tozu, lif, süper akışkanlaştırıcı ve suyun karıştırılması ile hazırlanmış, hazırlanan harçlar 300x300x50 mm plakalara dökülmüş ve ısı iletkenlik ölçümleri için plakalar üretilmiştir (Şekil 1). Üretilen plakalar 105°C sıcaklıkta hava dolaşimli etüvde değişmez kütleye kadar kurutulmuştur. Kuru numunelerin ısı iletkenlik katsayıları TS ISO 8301 protokolüne göre tamamlanmıştır.



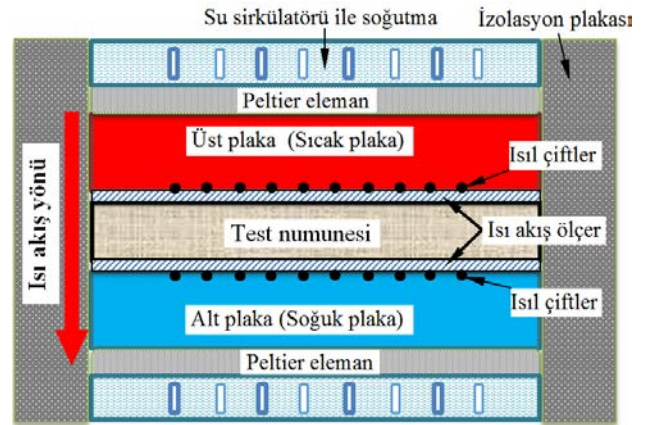
Şekil 1. Köpük beton deney numuneleri

2.2. Metot

Yoğunluk ve sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik katsayıları ASTM C518, EN 12664, EN12667 ve ISO 8301'de belirtilen şartlara uygun olarak ölçüm yapan Lasercomp marka HFM Fox-314 ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 2). Ölçüm cihazı ısı iletkenlik katsayısını ısı akış ölçer (IAÖ) yöntemini kullanarak belirlemektedir. Şekil 3'de ısı akış ölçer için çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 2. Isıl iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı



Şekil 3. Isı akış ölçer (IAÖ-HFM) çalışma prensibi

Isı akış ölçer farklı sıcaklık değerlerine ayarlanabilen iki plakaya sahiptir. Bu plakalar Peltier etkisi ile istenilen sıcaklık değerlerine ayarlanabilmektedirler. Alt ve üst plaka olarak adlandırılan bu plakalara hem ısı çiftleri hem de ısı akış ölçer sensörleri yerleştirilmiştir. Isı akışının plakalar üzerinden gerçekleşebilmesi için cihazın diğer yüzeyleri yalıtılmıştır. IAÖ ısı dengesine ulaştığında, plakalar ve test numunesinde üniform sıcaklık gradyanı

oluşturduğunda ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiş olacaktır. IAÖ cihazı ile ısı iletkenlik katsayısı Fourier ısı iletim denklemi ile belirlenmektedir.

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (1)$$

Bu denklemde, q (W/m^2) ısı akışı, k (W/mK) ısı iletkenlik katsayısı, A (m^2) alan, ΔT (K) sıcaklık farkı, Δx (m) numune kalınlığını ifade etmektedir. IAÖ bu denklemi ve kalibre edilmiş bilgisayar yazılımını kullanarak ölçüm, kayıt, yazdırma işlemini gerçekleştirmektedir. Deneysel çalışmalara başlamadan önce ölçüm cihazı, çeşitli sıcaklıklarda ısı iletkenliği bilinen referans numunesi (IRMM-440) kullanılarak ve NIST 1450b kalibrasyon dosyası ile kalibre edilmiştir. Sonuçların doğruluğu ve ölçümlerin tekrarlanabilirliği test edilmiştir. Deneyler farklı yoğunluk ve sıcaklık değerlerindeki köpük betonun k değerlerinin belirlenmesine yönelik yapılmıştır. Farklı sıcaklık değerlerinin elde edilmesinde kullanılan sıcak ve soğuk plakanın sıcaklıkları, ortalama sıcaklık ve iki plaka arasındaki sıcaklık farkı Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Plaka sıcaklıkları ve sıcaklık farkı

Ortalama sıcaklık (°C)	Sıcak plaka (Üst plaka) (°C)	Soğuk plaka (Alt plaka) (°C)	(ΔT) (°C)
-10	0	-20	20
0	10	-10	
10	20	0	
20	30	10	
30	40	20	
40	50	30	
50	60	40	

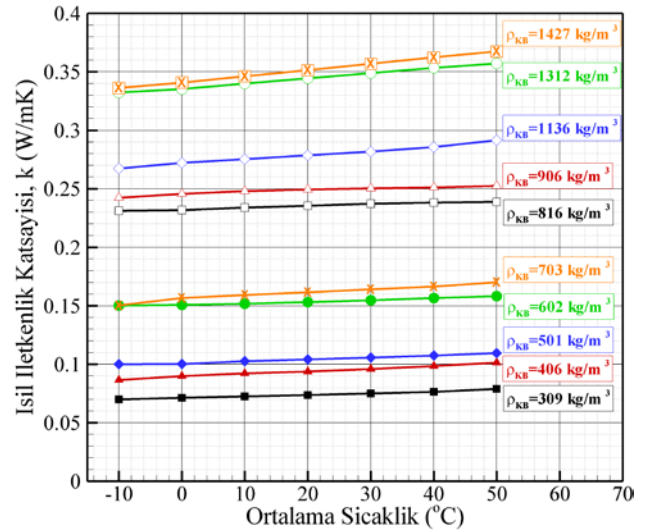
3. Bulgular

Deneysel prosedüre göre hazırlanan köpük beton karışımları için teorik ve gerçek kuru yoğunluk değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Köpük beton kuru yoğunlukları TS EN 678 standardına uygun olarak öncelikle boyutları 0,1 mm hassasiyetli kumpas ile ölçülmüş, daha sonra kütleleri 0,1 gr hassasiyetteki terazi ile tartılmış ve numuneler, sıcaklığı (105 ± 5)°C’da tutabilen, hava dolaşımı etüvde kurutulmuş ve deney numunelerinin kütlelerinde % 0,2’den fazla değişme olmadığı durumda, sabit kütleye erişildiği kabul edilmiştir. Böylece numune kuru yoğunlukları belirlenmiştir. Köpük betonda hacim sabitliği, karışıma giren bileşenlerin miktarı ve türü, köpüğün yoğunluğu, karıştırma devri ve süresi, ortam koşulları gibi pek çok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin farklılığı teorik ve gerçek yoğunluk değerleri arasında farklara neden olmuştur. Bu farklılık köpük betona ilave edilen köpüğün bir kısmının deforme olmasıyla açıklanabilir. Deforme olan köpük, beton hacminin azalarak gerçek yoğunluk değerlerindeki artışa neden olmaktadır.

Tablo 3. Teorik ve gerçek kuru köpük beton yoğunlukları

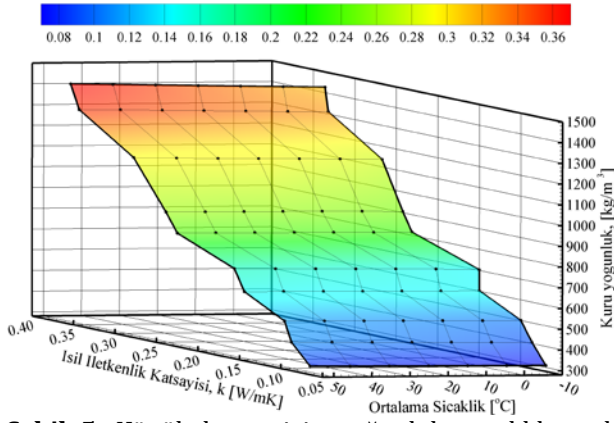
No	Teorik ρ_{tk} (kg/m^3)	Gerçek ρ_{gk} (kg/m^3)
1	300	309
2	400	406
3	500	501
4	600	602
5	700	703
6	800	816
7	900	906
8	1000	1136
9	1100	1312
10	1200	1427

309-1427 kg/m^3 gerçek kuru yoğunluğa sahip 10 farklı köpük beton numunesi, IAÖ cihazına uygun olarak hazırlanmış ve test prosedürüne göre deneyler tamamlanmıştır. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümleri yedi farklı ortalama sıcaklık (-10,0,10,20,30,40,50) değerinde yapılmıştır. Köpük betonun sıcaklık ve yoğunluğa bağlı k değerlerindeki değişim Şekil 4’de sunulmuştur.



Şekil 4. Köpük betonun sıcaklık ve yoğunluğa bağlı ısı iletkenlik katsayısındaki değişim.

Köpük beton numunelerinde yoğunluğun ve sıcaklığın artması ile ısı iletkenlik değerinin doğrusal bir şekilde arttığı gözlenmiştir. Grafik incelendiğinde köpük beton numunelerinin k değerlerinin belirlenmesinde yoğunluğun en etkili parametre olduğu görülmektedir. Diğer taraftan köpük beton numunelerinin gözenek yapısının, bileşim içeriğinin etkisinin de dikkate alındığı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Şekil 5’de yoğunluk ve sıcaklığa bağlı k değerindeki değişimi verilmiştir. Bu grafiklerden görüleceği üzere yoğunluk ve sıcaklık artışı k değerini doğrusal olarak artırmaktadır. Sıcaklık ile yoğunluk birlikte değerlendirildiğinde k yoğunluktan daha fazla etkilenmektedir.



Şekil 5. Köpük beton için yoğunluk, sıcaklık ve k ilişkisi

Tablo 4’de köpük beton numunelerinin yoğunluk ve sıcaklığın fonksiyonu olarak k değerindeki ilişkiler doğrusal bir regresyon ile sunulmuştur. Numuneler yoğunluklarına bağlı olarak on kategoriye ayrılmıştır. Yoğunluk ve sıcaklığa bağlı doğrusal regresyon TS EN 1745 standardında belirtildiği şekliyle k_{10} ’a göre verilmiştir. Ayrıca en yüksek yoğunluk değerine bağlı yoğunluk faktörü (%n) ve yoğunluğun nominal k değerine bağlı k’nın yüzde değişimi sunulmuştur. Sıcaklığa bağlı k’nın yüzde değişimi ile sıcaklığa olan hassasiyetleri de Tablo 4’de verilmiştir. Tüm numunelerin nominal ısıl iletkenliğinin çalışma sıcaklığına bağlı değişim hızı $(\frac{\Delta k}{\Delta T})/k_{10}$ ile hesaplanmıştır. Sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlikteki değişim farklılık göstermektedir. Bu durum köpük betona ilave olan köpüğün oluşturduğu gözenekteki farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Tablo 4. Numunelerin sıcaklık-yoğunluk-k ilişkisi

k-T-ρ ilişkisi	ρ_{gk} (kg/m ³)	Yoğunluk faktörü % n	Yoğunluğa bağlı k’nın % değişimi ($\rho_{max} \cdot \rho_{min}$)	Sıcaklığa bağlı k’nın % değişimi ($T_{max} \cdot T_{min}$)	k_{10} nominal (W/mK) TS EN 1745	$(\frac{\Delta k}{\Delta T})/k_{10}$	R^2
$k = -1,459 + 2,599T + 2,635\rho$	KB-309	78,3	79,0	11,1	0,0724	0,00167	0,97
	KB-406	71,5	73,3	14,4	0,0921	0,00300	
	KB-501	64,8	70,3	8,6	0,1025	0,00117	
	KB-602	57,8	56,1	5,0	0,1518	0,00056	
	KB-703	50,7	54,0	11,6	0,1591	0,00276	
	KB-816	42,8	32,4	3,1	0,2340	0,00057	
	KB-906	36,5	28,3	4,0	0,2479	0,00110	
	KB-1136	20,3	20,4	8,3	0,2754	0,00147	
	KB-1312	8,0	1,8	6,9	0,3399	0,00111	
	KB-1427	1,0	1	8,4	0,3674	0,00144	

Yalıtım malzemesi olarak köpük betonun çalışma sıcaklığına ve yoğunluğa bağlı ısıl iletkenlik değerinin artması, evsel ve endüstriyel uygulamalarda optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde ve ısıl yüklerin daha doğru hesaplanmasında önemlidir. Isıtma, soğutma ihtiyacına bağlı dış hava koşullarını dikkate alan ve ideal ısıl konfor şartlarının belirlenmesinde nominal ısıl iletkenlik k_{10} değeri

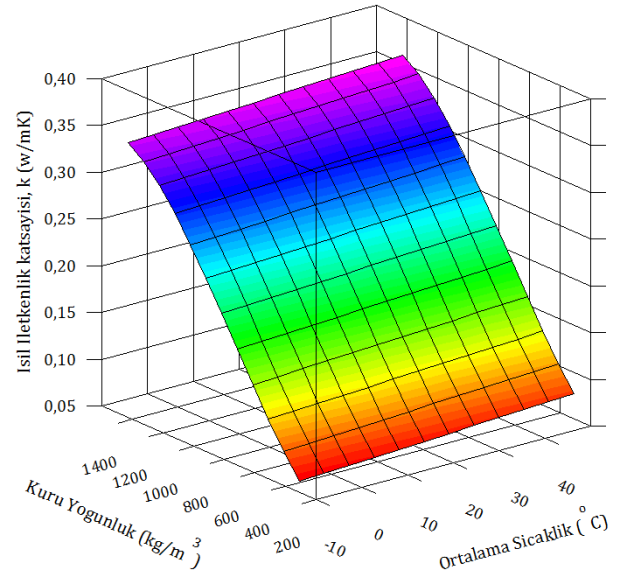
kullanılmaktadır. Tablo 4. İncelendiğinde yoğunluğa bağlı k’nın yüzdesel değişimi % 79 ile KB-309 (kg/m³) yoğunluğa sahip köpük betonda gerçekleşmiştir. Sıcaklığa bağlı k’nın en yüksek değişimi ise %14,4 ile KB-406 (kg/m³) yoğunluğa sahip köpük betonda gerçekleşmiştir.

Isıl iletkenliğin sıcaklığa bağlı nominal değerden olan sapmasının karşılaştırması yine Tablo 4’de verilmiştir. Ölçüm sıcaklıkları dikkate alındığında sırasıyla KB-406, 703 ve 309 (kg/m³) sıcaklık artışına en hassas cevap veren ve nominal ısıl iletkenlik (k_{10}) değerinden en çok sapma gösteren malzemeler olarak görülmektedir. Sıcaklıktan en az etkilenen malzemeler ise sırasıyla 602 ve 816 (kg/m³) olarak tespit edilmiştir.

Sıcaklık ve yoğunluğa bağlı olarak ısıl iletkenlik katsayılarının tahminine yönelik geliştirilen çoklu lineer regresyon denklemi aşağıda verilmiştir.

$$k = -1,459 + 2,599T + 2,635\rho \quad (R^2=0,97) \quad (2)$$

Çoklu lineer regresyon (2) kullanılarak elde edilen ortalama sıcaklık ve yoğunluğa bağlı ısıl iletkenlik katsayısındaki değişim Şekil 6’da verilmiştir.

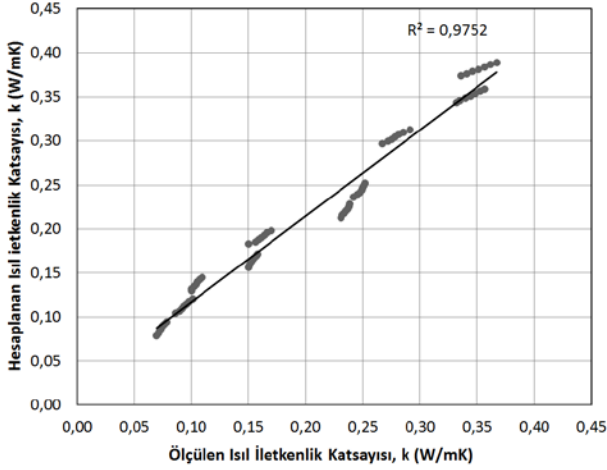


Şekil 6. Köpük beton numuneleri için türetilen T-ρ-k ilişkisi

Şekil 7’de yoğunluğun ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak deneysel ölçüm sonuçlarından türetilen model ile ölçüm sonuçlarının uyumu gösterilmiştir. Ayrıca modelin regresyon değeri verilmiştir. Şekil üzerinden görüleceği üzere model kullanılarak ısıl iletkenlik katsayısının yüksek doğrulukla tahmini mümkündür ayrıca model ve ölçüm sonuçları arasındaki sapmanın ideal sınırlar içerisinde olduğu görülmektedir.

Köpük betonun alternatif yalıtım malzemesi olarak kullanılabilmesi için k değerlerinin ölçülmesi ve eşdeğer ısıl dirençlerinin (R_{es}) hesaplanması

gerekmektedir. Tablo 5’de yoğunluğa bağlı olarak ölçülen k_{10} nominal değerleri için $R_{e\varnothing}$ (1,5 m²K/W) koşulunu sağlayan uygulama kalınlıkları (d) belirlenmiştir. Ayrıca tabloda bir kıyaslama olabilmesi açısından klasik yalıtım malzemeleri EPS, XPS, TY ve CY için uygulama kalınlıkları sunulmuştur.



Şekil 7. Köpük beton için ölçülen ve hesaplanan ısı iletkenlik katsayılarının uyumu

Tablo 5. İncelendiğinde $R_{e\varnothing}$ (1,5 m²K/W) değeri için en ideal köpük beton KB-309 (kg/m³) olarak görülmektedir. 1,5 eşdeğer ısı direnç değeri için 309 kg/m³ yoğunluğa sahip köpük betonun uygulama kalınlığı 0,1086 m olarak hesaplanmıştır. Bu kalınlık değeri klasik yalıtım malzemeleri ile kıyaslandığında köpük betonun yalıtım malzemesi olarak uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

Tablo 5. Köpük beton numunler için ($R_{e\varnothing}$ 1,5 m²K/W) sağlayan uygulama kalınlıkları

Mlz.	ρ (kg/m ³)	k_{10} nominal (W/mK)	$R_{e\varnothing}$ (d/k) (m ² K/W)	d= $R_{e\varnothing}$ k (m)
KB	309	0,0724	1,5	0,1086
KB	406	0,0921	1,5	0,1381
KB	501	0,1025	1,5	0,1537
KB	602	0,1518	1,5	0,2277
KB	703	0,1591	1,5	0,2386
KB	816	0,2340	1,5	0,3510
KB	906	0,2479	1,5	0,3718
KB	1136	0,2754	1,5	0,4131
KB	1312	0,3399	1,5	0,5098
KB	1427	0,3674	1,5	0,5511
XPS	20,3	0,0367	1,5	0,055
EPS	16,2	0,0369	1,5	0,055
CY	90	0,0307	1,5	0,046
TY	125	0,0373	1,5	0,055

KB; Köpük beton, XPS; Ekstrüde polistren strofor, EPS;Ekspanded polistren strofor, CY; cam yünü, TY; Taş yünü

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada 309-1427 kg/m³ arasında 10 farklı kuru yoğunluğa sahip hafif hücreli betonun sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik katsayılarındaki değişim incelenmiştir. Isıl iletkenlik katsayısı ölçümleri Fox-314 IAÖ ile EN 12664-12667 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler -10 °C’den

başlayarak +50 °C’ye kadar her on derecelik artışlar şeklinde yedi farklı sıcaklık için yapılmıştır. Elde edilen bulgulardan köpük beton numunelerinin çalışma sıcaklığının artması ile ısı iletkenlik değerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durum sıcaklığın artması ile moleküler düzeyde titreşimin artmasına bağlıdır. Tablo 4 incelendiğinde sıcaklık artışından en hızlı etkilenen malzemeler sırasıyla KB-406, 703 ve 309 (kg/m³) olmuştur.

KB numuneleri için yoğunluğun artması ısı iletkenlik değerinin artmasına neden olmuştur. Tablo 4 incelendiğinde yoğunluğa bağlı k’nın yüzdesel değişimi en hassas % 79 ile KB-309 (kg/m³) no’lu köpük betonda gerçekleşmiştir.

Akthar ve Evans [5] tarafından yapılan porozite oranının dikkate alındığı çalışmada %92 boşluklu numune için ısı iletkenlik katsayısı 0,11 W/mK olarak belirlenmiştir. Szadrai vd., tarafından yapılan geometrinin ve nem yükünün binaların özgül ısı kaybı değişimine etkisinin incelendiği çalışmada köpük betonun ısı iletkenlik katsayısını 0,099 W/mK olarak kullanmışlardır. Zhang vd., [4] 585-1370 kg/m³ kuru yoğunluğa sahip köpük beton numunelerinin 100-800 °C sıcaklık değerleri için ısı iletkenlik katsayısının değişimini 0,15-0,48 W/mK değeri arasında belirlemişlerdir. Othuman ve Wang [6, 30] tarafından yapılan çalışmalarda 650-1200 kg/m³ yoğunluk değerleri için k değerlerinin 0,23-0,39 W/mK arasında değiştiği belirlenmiştir. Yapılan çalışma ile literatür çalışmaları kıyaslandığında benzer sonuçların elde edildiği görülmekle birlikte köpük betonun 0 °C’nin altındaki ısı iletkenlik değerleri de tespit edilmiştir.

Bu çalışmada hem yoğunluk değişimi hem de daha geniş bir sıcaklık aralığı dikkate alınarak k değerleri belirlenmiştir. Elde edilen araştırma bulgularından hem sıcaklığın hem de yoğunluğun bir fonksiyonu olan k değerinin yüksek doğrulukla hesaplanabildiği ($k = -1,459 + 2,599T + 2,635\rho$) regresyon değeri 0,97 olan lineer bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntıdan hareketle bilinmeyen sıcaklık ve yoğunluk değerleri için k değerleri tahmin edilebilmektedir.

Farklı yoğunluktaki köpük beton numunelerinin yalıtım performanslarını kıyaslayabilmek için eşdeğer ısı direnç ($R_{e\varnothing}=1,5$) değerlerine bağlı uygulama kalınlıkları $R_{e\varnothing}$ (d/k) formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalardan 1,5 $R_{e\varnothing}$ eşdeğeri için en ideal köpük beton ve kalınlıkları sırasıyla KB-309 (kg/m³), 108,6 mm, KB-406 (kg/m³), 138,1 mm olarak belirlenmiştir. Bu kalınlık değerleri köpük betonun yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir sınırlar içerisinde olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte köpük betonun ısı iletkenlik katsayısının geliştirilebilir olduğu belirlenmiştir. Köpük betonun binalarda kullanımının ısı performansı artıracağı ve enerji tasarrufu sağlayabileceği görülmektedir.

Kaynakça

- [1] Ekinci, D., 2013. Türkiye'de köpük beton. Dünya İnşaatDergisi.<http://www.dunyainsaat.com.tr/dergioku.php?haberid=4224>
- [2] Davraz, M., Kılınçarslan Ş., Kuru M., 2015. Farklı yoğunluktaki köpük betonların dayanım ve ısıl iletkenlik özellikleri, 9. Ulusal beton kongresi, (2015), 93-102.
- [3] Köseoğlu, K., Üzüm, O., Çakır, Ö. A., 2015. Beton yapı bileşenlerinin ısıl yalıtım özellikleri yönünden incelenmesi bir derleme, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part:C Tasarım ve Teknoloji, (2015), 3(3):545-553.
- [4] Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H., 2015. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete, Cement&Concrete Composites. 62(2015) 97-105.
- [5] Akhtar, F.K., Evans, J.R.G., 2010. High porosity (>90%) cementitious foams. Cement and Concrete Research. 40 (2010) 352-358.
- [6] Othuman, M.A., Wang, Y.C., 2011. Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete. Construction and Building Materials. 25 (2011) 705-716.
- [7] Ramamurthy K., Kunhanandan Nambiar, E. K., Ranjani, G.I.S., 2009. Cement&Concrete Composites. 31 (2009) 388-396.
- [8] Jones M.R., McCarthy A. 2005. Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. Magazine of Concrete Research. 57 (2005) No:1, 21-31.
- [9] Kearsley, E. P., Wainwright, P. J., 2002. The effect of porosity on the strength of foamed concrete. Cement and Concrete Research. 32 (2002) 233-239.
- [10] Nambiar, E.K.K., Ramamurthy K., 2007. Sorption characteristics of foam concrete. Cement and Concrete Research. 37 (2007) 1341-1347.
- [11] Just, A., Middendorf B., 2009. Microstructure of high-strength foam concrete. Materials Characterization. 60 (2009) 741-748.
- [12] EN 12667, 2001. Thermal performance of building materials and products-determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods-dry and moist product of high and medium thermal resistance, European committee for standardization, Brussel.
- [13] EN 12664, 2001. Thermal performance of building materials and products-determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods-dry and moist product of medium and low thermal resistance, European committee for standardization, Brussels.
- [14] ASTM C518, 2003. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa.,15 p.
- [15] Aldrich, D.F., Bond, R.H., 1985. Thermal performance of rigid cellular foam insulation at subfreezing temperatures, In: Thermal performance of the exterior envelopes of buildings III. ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Florida, 2-5 December, (1985) 500-509.
- [16] Wakili, K. G., Binder, B., Vonbank, R., 2003. A simple method to determine the specific heat capacity of thermal insulations used in building construction, Energy and Buildings 35 (2003) 413-415.
- [17] Wilkes, K.E., Child, P.W., 1992. Thermal performance of fiberglass and cellulose attic insulation, in: thermal performance of the exterior envelopes of buildings V, ASHRAE/DOE/BTECC/CIBSE Conference, Clear water beach, Florida, December 7-10 (1992) 357-367.
- [18] Besant, R.W., Miller, E., 1982. Thermal resistance of loose-fill fiberglass insulation spaces heated from below, in: thermal performance of the exterior envelope of building II, ASHRAE/DOE Conference, Las Vegas, 6-9 December, (1982) 720-733.
- [19] Mohammed S., Al-Homoud, 2005. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials, Building and environment, 40 (2005) 353-366.
- [20] Karakoç, T. H., Turan, O., Binyıldız, E., Yıldırım, E., 2011. Isı Yalıtımı, ODE yayınları.
- [21] İZOCAM, (1981). Isı, ses, yangın izolasyon, Teknik el kitabı.
- [22] Abdou, A. A., Budaiwi, I. M., Al-Homoud, M., 2005. Comparison of thermal conductivity measurement of building insulation materials under various operating temperatures, Journal of building physics, 29 (2005) 171-184.
- [23] Gnip, I., Vejelis, S., Vaitkus, S., 2012. Thermal conductivity of expanded polystyrene (EPS) at 10 °C and its conversion to temperatures within interval from 0 to 50 °C, Energy and Buildings, 52 (2012) 107-111.
- [24] Lakatos, A., Kalmar, F., 2013. Investigation of thickness and density dependence of thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials, Materials and structures, 46 (2013), 1101-1105.

- [25] Lakatos, A., 2014. Comparison of the thermal properties of different insulating materials, *Advance materials research*. 899 (2014) 381-386.
- [26] Ochs, F., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., 2008. Effective thermal conductivity of moistened insulation materials as a function of temperature, *International journal of heat and mass transfer*, 51 (2008) 539-552.
- [27] Karamanos, A., Hاديarakou, S., Papadopoulos, A.M., 2008. The impact temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. *Energy and Buildings*, 10 (2008) 1402-1411.
- [28] Özel, C., Kuru, M., Bayram, Y., 2015. Mineral ve Fiber içeren polimer betonların plaka sıcaklıklarına bağlı ısı iletkenlik katsayılarının incelenmesi, *SDÜ fen bilimleri enstitüsü dergisi*, 19 (1), (2015) 27-33.
- [29] Demir, İ., Başpınar, S.M., Görhan, G., Kahraman, E., Akyol, O., 2011. Pomza agregalı hafif beton ısıl özelliklerine polistiren köpük ve uçucu kül katkısının etkileri, *X. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi*, 13/16 nisan (2011) 911-916.
- [30] Othuman, Md Azree, M., 2011. Effective thermal conductivity of foamcrete of different densities, *Concrete Research Letters*, 2 (1) (2011) 181-189.
- [31] Alavez-Ramirez, R., Chinas-Castillo, F., Morales-Dominguez, V.J., Ortiz-Guzman, M., 2012. Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels, 37 (2012) 425-431.
- [32] Kuru, M., 2016. Determination of thermal conductivity of closed-cell insulation materials that depend on temperature and density, *Arabian Journal Science Engineering*, DOI 10.1007/s13369-016-2122-6.
- [33] Kuru, M., 2016. Açık hücreli yalıtım malzemelerinin sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik katsayılarının ısı akış ölçer yöntemiyle belirlenmesi, 1. International conference on engineering technology and applied sciences, (2016) 333-339.
- [34] Jing Liu, M. Y., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Mo, K.H., 2014. Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete, *Energy and building*, 72 (2014) 238-245.
- [35] Chen, B., Liu N., 2013. A novel lightweight concrete-fabrication ant its thermal and mechanical properties, *Construction and building materials*, 44 (2013).
- [36] Kodur, V.K.R., Sultan, M.A., 2003. Effect of temperature on thermal properties of high-strength concrete, *Journal of materials in civil engineering*, v. 15, no.2 (2003) 101-107.
- [37] Sayadi, A.A., Tapia, J.V., Neitzert, T.R., Clifton, C.G., 2016. Effect of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete, *Construction and building materials*, 112 (2016) 716-724.
- [38] Szodrai, F., Lakatos, Á., Kalmár, F., 2016. Analysis of the change of the specific heat loss coefficient of buildings resulted by the variation of the geometry and the moisture load DOI: 10.1016/j.energy.2016.09.073,(2016) *Energy*, 115, pp. 820-829.