



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.05.2022
Kabul Tarihi : 08.09.2022

Received Date : 12.05.2022
Accepted Date : 08.09.2022

KÂĞIR BLOK ÜRETİMİNDE FARKLI ORIJİNLİ İKİ POMZANIN PERFORMANSLARI ÜZERİNE KARŞILAŞTIRMALI BİR ANALİZ: TOMARZA VE TATVAN ÖRNEĞİ

A COMPARATIVE ANALYSIS ON THE PERFORMANCES OF DIFFERENT ORIGINATED TWO PUMICE IN PRODUCTION OF MASONRY BLOCKS: TOMARZA AND TATVAN SAMPLE

Lütfullah GÜNDÜZ¹ (ORCID: 0000-0003-2487-467X)
Şevket Onur KALKAN^{2*} (ORCID: 0000-0003-0250-8134)

^{1,2} İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şevket Onur KALKAN, sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, ince, orta ve iri boyut pomza agregası olarak 0/4 mm, 4/8 mm 8/12 mm ebatlarda pomza agregalı hafif beton (PAHB) numuneleri üretilmiştir. Pomza agregaları Bitlis-Tatvan (BT) ve Kayseri-Tomarza (KT) olmak üzere iki farklı pomza ocağından elde edilmiştir. PAHB tasarımlarında ağırlıkça 30:50:20, 30:30:40 ve 20:50:30 olarak üç ince:orta:iri agregası oranı kullanılmıştır. Her bir grup için karışımda sırasıyla 130, 170, 200 ve 240 kg/m³ dozajlarında çimento kullanılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında, pomza agregalı kâğır blok (PAKB), deneme küp numunelerinde kullanılan karışım oranları ile aynı şekilde tam ölçekli olarak üretilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, BT ve KT agregası ile hazırlanmış PAHB küp örneklerinde en yüksek dayanım değerleri 2,27 ve 3,18 MPa ile 240 kg/m³ çimento dozajına ve sırasıyla, 30:30:40 ve 30:50:20 agregası kullanım oranına sahip karışımlarda elde edilmiştir. Betonun yoğunluk seviyesi arttıkça kuruma büzülmesinin ve rutubet genişlemesinin arttığı ancak, agregası/çimento oranının artması ile azaldığı gözlemlenmiştir. Kâğır bloklarda en düşük ısı iletkenlik katsayısına 0,120 W/mK ile BT pomza agregalı blok numunelerinde tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kâğır blok, pomza, hafif beton, rötre, yalıtım

ABSTRACT

Pumice aggregate lightweight concretes (PAHB) were produced with fine, medium and coarse pumice aggregates as 0/4 mm, 4/8 mm and 8/12 mm. The pumice aggregates were obtained from two different pumice quarries, namely Bitlis-Tatvan (BT) and Kayseri-Tomarza (KT). Three different fine:medium:coarse aggregate ratios by weight, 30:50:20, 30:30:40 and 20:50:30 were used in PAHB designs. Also, four different cement dosages of 130, 170, 200 and 240 kg/m³ were used. In the second stage, pumice aggregate masonry block (PAKB) was produced in full scale with the same mixing ratios used in the cube samples. According to the results, the highest strength values in PAHB cube samples prepared with BT and KT aggregates were obtained as 2,27 and 3,18 MPa in mixtures with cement dosage of 240 kg/m³ and aggregate usage ratio of 30:30:40 and 30:50:20, respectively. As the density of concrete increased, the drying shrinkage and moisture expansion increased, but decreased with the increase of the aggregate/cement ratio. The lowest thermal conductivity coefficient in masonry blocks was found as 0,120 W/mK in BT aggregate block samples.

Keywords: Masonry block, pumice, lightweight concrete, shrinkage, insulation

ToCite: GÜNDÜZ, L., & KALKAN, Ş. O., (2022). KÂĞIR BLOK ÜRETİMİNDE FARKLI ORIJİNLİ İKİ POMZANIN PERFORMANSLARI ÜZERİNE KARŞILAŞTIRMALI BİR ANALİZ: TOMARZA VE TATVAN ÖRNEĞİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), 537-555.

GİRİŞ

Pomza tarihi süreç içerisinde inşaat sektöründe kullanılan en eski malzemelerden biridir. Dünyanın pomza kullanımının ilk referans örneği, Vitruvio'nun MÖ 1. yüzyıla ait mimari özetinde görülmektedir. Antik Romalılar döneminde, pomza termal banyo ve tapınakların yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. En çarpıcı örneklerden biri kubbe yapımında pomza taneciklerinin kullanıldığı Roma Panteonu'dur (Anonim, 2021). Hafif beton üretiminde dayanıklılığı ve tokluğu nedeniyle pomza, iki bin yılı aşkın süredir kullanıldığı bilinen hafif agregata türlerinden biridir. Portland çimentosu, pomza agregası ve su karışımından oluşan harç karışımlarından çatı kiremitleri, hafif zemin dolguları, yapısal döşeme plakaları, prefabrik veya dış cephe yalıtım levha ürünleri, kâgir blok elemanları vb. bir dizi alternatif ürün geliştirilebilir ve uygulanabilir (Neville, 1996; Failla vd., 1997; Gündüz, 2005). Türkiye'nin farklı bölgelerinde oluşan pomza agregaları, uygun fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı uzun yıllardır dünyanın birçok ülkesine ihraç edilmekte ve farklı ürünlerde kullanılmaktadır (Gündüz, 2005b). Binanın ölü yükünü azaltmak için genellikle hafif agregalarla düşük yoğunluklu beton kullanımı bilinmektedir. Deprem ivmesinin neden olduğu riskleri azaltmak için bina ölü yükünün en aza indirilmesi son derece önemlidir (Yaşar vd., 2003). Bu nedenle yapılarda kullanılacak malzemelerin detaylı deneysel analizleri yapılmalı ve deprem risklerine karşı dayanımları incelenmelidir. Bu yaklaşım, projelerde ve inşaat mühendisliği uygulamalarında uygun malzeme seçiminin bel kemiğini oluşturmaktadır (Gündüz & Uğur, 2005).

Hafif agregadan üretilen yapı elemanları, taşıyıcı, yarı taşıyıcı ve/veya taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında kullanılmaktadır. Özellikle taşıyıcı olmayan ürünler, duvar birimlerinin ısı ve ses yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir etki sağlar. Türkiye'de ve dünyanın diğer ülkelerinde uzun yıllara dayanan deneyimler, farklı malzemelerden üretilen çok sayıda ve ağırlıktaki kâgir beton blokların bina yapımında tercih edildiğini göstermiştir (Gündüz, 2005b). Kâgir blok elemanlarının üretiminde ısı iletkenliği düşük hafif agregaların kullanılması da ürünlerin maliyetlerine etkin bir çözüm sunabilmektedir (Al-Jabri vd., 2005). Pomza agregalarıyla yapılan hafif duvar blokları, çoğu uygulamada yoğunluğu yüksek ürünlere kıyasla duvarların yalıtım performanslarının gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. Hafif agregalı blok elemanlarıyla inşa edilen duvarların maliyetini diğer alternatif duvar sistemleriyle rekabet edebilir hale getirmiştir. Ancak yapısal yükün azaltılması, yangın dayanımının iyileştirilmesi, dayanım değerindeki artış ve ısı - akustik konfor özelliklerinin iyileştirilmesi göz önüne alındığında, hafif betondan yapılan kâgir bloklar uygulamalarda daha çok tercih edilen bir ürün olmuştur. Ayrıca bu tür blok elemanları maliyet değerlendirmeleri bağlamında daha aktif bir rol oynamaktadır (ESCSI, 1997).

Pomza agregalı kâgir duvar blokları, Türkiye'de geleneksel olarak kullanılan diğer alternatif yapı elemanlarına göre %60'a varan daha düşük yoğunluk değerleri göstermektedir. Pomza agregalı hafif betondan mamul kâgir blok elemanları, yüksek ısı direnç ve düşük ısı köprüleri oluşturarak duvar uygulamalarında üstün yalıtım performansı sağlar. Bununla birlikte, üstün yangın direnci, etkili ses emilimi, mükemmel sismik performans, düşük rötre davranış özellikleri sağlar (Gündüz, 2005b). Pomza agregalar, kırılmış ve boyutlandırılmış doğal şekilleri ile kâgir blok elemanlarının üretiminde kimyasal ve fiziksel olarak stabil bir malzeme olarak yıllardır kullanılmaktadır (LAVA, 1998).

Ülkemizde bulunan yerel kaynaklarının çimentolu ürünler gibi ülkemizde yoğun olarak kullanılan malzemeler dahilinde araştırılması ve ekonomiye kazandırılması oldukça önemli bir husustur. Bu tip yerel kaynaklardan bir tanesi ise pomza madenidir. Pomza agregalar doğal şekilleri itibarıyla gözenekli yapıya sahip inorganik kayaç yapıları gösterirler. Gözenek oluşumları pomzanın hafif agregata olarak kullanımını gündeme getirmesinin yanı sıra birim yoğunluk değerlerinin düşük oluşu, birçok endüstriyel alanda kullanımı sağlamaktadır. Günümüzde birim ağırlığı düşük ve gözenekliliği yüksek olan birden fazla pomza oluşumlarına rastlamak mümkündür. Ancak, bu oluşumlardaki malzemenin her ne kadar fiziksel görünümü ve oluşum mekanizmaları birbirlerine eşdeğer veya yakın olsa da yapısal ve mekanik özellikleri birbirinden farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıkların ölçütleri ve ürünlere olan etkilerini belirlemek amacıyla bir dizi araştırma çalışması yapmak kaçınılmaz olmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de iki farklı doğal karakteristiğe sahip Bitlis-Tatvan bölgesi ve Kayseri-Tomarza bölgesinde bulunan pomza agregalarının, taşıyıcı olmayan ve boşluklu geometrik tasarıma sahip kâgir blok elemanlarının üretiminde ürün performansına etkileri deneysel olarak karşılaştırmalı analiz edilmiştir. Agregata kullanımı açısından oluşan farklılıklar tartışılmıştır. Konu üzerine yeni araştırmalar yapacak araştırmacılara ışık tutulması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Test Örneklerinde Kullanılan Malzemeler

Pomza, inşaat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan doğal gözenekli özellikte, volkanik kökenli inorganik hafif bir agregadır. İnşaat sektöründe hafif beton üretimleri yanı sıra daha çok kâgir blok elemanlarının üretiminde ve sıva ve/veya örgü harcı üretimlerinde ana agrega malzeme olarak kullanımları yaygındır. Pomza agregası, oluşum mekanizmasına ve volkanik orijinine bağlı olarak farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler gösterebilmektedir (Gündüz, 1998; Berge, 1983). Bu farklılık doğal olarak pomza agreganın kullanılmış olduğu yapı malzemelerinin karakteristiğinin de farklı olmasını sağlar. Pomza agregaların kâgir blok üretiminde performanslarının analizi amacıyla Türkiye'nin iki farklı coğrafik bölgesinde yer alan *Bitlis-Tatvan* ve *Kayseri-Tomarza* pomza ocaklarından doğal tüvenan formları korunarak tedarik edilen pomza agrega örnekleri laboratuvar ortamına getirilmiştir. Pomza ocaklarına ait sembolik görseller Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bitlis-Tatvan Bölgesi Pomza Ocağı Sembolik Görünümü



Şekil 2. Kayseri-Tomarza Bölgesi Pomza Ocağı Sembolik Görünümü

Ocaklardan temin edilen pomza agregaların doğal nemi korunması amacıyla naylon esaslı poşetlerde muhafaza edilmiştir. Laboratuvarda bu doğal nemleri korunarak pomza agrega malzemeler öncelikle bir kırıcıda kırılarak boyut ufalama işlemine tabi tutulmuşlardır. Kırma işlemi sonrası, pomza agrega örneklerinin genel görünümü Şekil 3'te verilmiştir. Sonrasında kırılmış her bir pomza agregası, üç ayrı boyut fraksiyonunda sınıflandırılmışlar: 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-12 mm boyut aralıkları.



Şekil 3. Kırma İşlemi Sonrası Pomza Agrega Örneklerinin Genel Görünümü

Bu çalışmada Bitlis-Tatvan bölgesi pomza agrega örnekleri “BT”, Kayseri-Tomarza bölgesi pomza agrega örnekleri ise “KT” olarak kodlanmıştır. Bitlis-Tatvan bölgesi boyutlandırılmış pomza agrega örneklerinin doğal nem içerikleri sırasıyla 0-4 mm BT için %86, 4-8 mm BT için %75 ve 8-12 mm BT için %72’dir. Kayseri-Tomarza bölgesi boyutlandırılmış pomza agrega örneklerinin doğal nem içerikleri ise sırasıyla 0-4 mm KT için %9, 4-8 mm KT için %12 ve 8-12 mm KT için %15’tir. Boyutlandırılmış tüm pomza agrega örnekleri daha sonra bir etüv ortamında kurutulmuş, kuru durumdaki yığın yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Pomza agregaların yığın yoğunlukları sırasıyla, 0-4 mm BT için 478 kg/m³, 4-8 mm BT için 282 kg/m³, 8-12 mm BT için 257 kg/m³, 0-4 mm KT için 624 kg/m³, 4-8 mm KT için 591 kg/m³ ve 8-12 mm KT için 503 kg/m³’tür.

Bu çalışmadaki tüm karışımlarda ASTM Tip I (42,5 MPa) çimento tipi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan çimento ve pomza agregalarının kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir. Bitlis-Tatvan pomzası Kayseri-Tomarza pomza örneklerine göre daha yüksek silis içeriğine sahiptir. Agreganın kimyasal bileşiminde yüksek oranlı silika içeriği genellikle kimyasal ortamlara karşı daha kararlı bir özellik sergileyebileceğini temsil edebilmektedir.

Tablo 1. Çimento ve Pomza Örneklerinin Kimyasal Özellikleri

Bileşen (%)	Çimento	BT	KT
SiO ₂	20,18	69,27	68,35
Al ₂ O ₃	5,79	13,16	15,34
Fe ₂ O ₃	4,34	1,90	3,23
CaO	62,27	0,84	2,94
Na ₂ O	0,14	3,81	4,04
K ₂ O	0,89	4,45	2,81
MgO	2,74	0,47	0,98
LOI	1,46	1,84	1,77

Kimyasal analiz içerikleri irdelendiğinde BT ve KT pomza agrega örneklerinin asidik karakterli olduğu ve alümina açısından zengin oldukları görülmektedir. Pomzanın silika içeriği ne kadar yüksek olursa, doğal görünüm rengi de o kadar açık olur. BT pomza agregalar bu bağlamda rengi KT pomza agregalara göre açık grimsi ve daha açık tonludur. Ancak, bünyesinde yüksek oranda su tuttukları için doğal nemli görünüşleri KT pomza agregalara kıyasla ilk bakışta daha koyu grimsi bir renkte görülebilirler. Agrega kurutulduktan sonra rengi daha açık tonda grimsi bir görünüm kazanır. Diğer taraftan KT pomza örnekleri daha az doğal nem içermekte olup, orijin görünüşleri grimsi renktedir. Bileşiminde demir oksit içeriği BT pomza örneğine göre daha yüksek olduğu için grimsi bir renge sahiptir. Bununla birlikte KP agrega örnekleri daha yüksek magnezya içeriği sebebiyle agreganın daha parlak görünümüne etki eder. Pomzanın yüksek silika içeriği ve özellikle ince tane boyutlarındaki geniş yüzey alanı, nemin de bulunduğu kimyasal bir ortama maruz kaldığında alkalilerle oldukça kolay reaksiyona girmesine izin verir (Gündüz, 1998).

Karışım Tasarımı ve Örnek Hazırlama

Pomza agregaların kâgir blok harcı üretiminde uygunluğu, karışım oranlarının tasarımı ve agrega performansları arasındaki farklılığı ön tecrübe edinmek amacıyla kuru karışım sıfır slump kıvamında bir dizi pomza agregalı hafif beton örneklerinin (PAHB) tasarımı yapılarak beton test örnekleri hazırlanmıştır. Daha sonra, bu ön analizlerde

belirlenen karışım oranlarında tam ölçekli ve özel yarık geometrisine sahip bir kagir blok formu için pomza agregalı kagir blok (PAKB) prototip modeli üzerinde performans analizleri yapılmıştır.

Pomza agrega malzemelerin PAHB tasarımlarında fiziksel ve mekanik özelliklerinin etkisini incelemek amacıyla BT ve KT pomza agregalarının her biri ile agrega tane boyut aralıklarının kullanım oranlarına göre 3'er grup PAHB karışımları tasarlanmıştır. Her bir grupta 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-12 mm agrega boyutları için kullanılan oranlar sırasıyla; 1. grup karışımında ağırlıkça 0-4 mm %30, 4-8 mm %50 ve 8-12 mm %20 oranlarında harmanlanmıştır. 2. grup karışımında ağırlıkça 0-4 mm %30, 4-8 mm %30 ve 8-12 mm %40 oranlarında, 3. grup karışımında ise ağırlıkça 0-4 mm %20, 4-8 mm %50 ve 8-12 mm %30 oranlarında harmanlanmıştır. Her bir grup karışımında sırasıyla dört farklı 130, 170, 200 ve 240 kg/m³ dozajlarında çimento kullanılarak kuru karışım kıvamında blok üretimini temsil edecek bir vibrasyon-sıkıştırma ünitesine sahip döküm makinesi yardımıyla laboratuvar ortamında ayrı ayrı 100x100x100 mm boyutlu küp örneklerin dökümleri yapılmıştır. PAHB karışımlarına ait karışım oranları BT ve KT pomza agrega kullanımları için Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Her bir karışıma ait 9 adet küp örnek dökümü yapılmış olup, her bir pomza agrega türü için 12 seri (BT 1 - BT 12 ve KT 1 - KT 12), 108 adet PAHB örneği hazırlanmıştır. Bu bağlamda çalışma kapsamında BT ve KT pomza agregalı hafif beton örnekleri için toplamda 24 seri, 216 test örneği hazırlanmıştır.

Tablo 2. BT Pomza Agregalı Karışım Oranları ve Beton Yoğunlukları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	0-4 mm BT Pomza (kg/m ³)	4-8 mm BT Pomza (kg/m ³)	8-12 mm BT Pomza (kg/m ³)	Agrega/Çimento Oranı (A/C)	Taze Beton Yoğunluğu (kg/m ³)	Sertleşmiş Beton Yoğunluğu (kg/m ³)
BT 1	130	228	211	76	3,96	932	681
BT 2	170	217	201	72	2,88	964	703
BT 3	200	209	193	69	2,36	986	720
BT 4	240	199	184	66	1,87	1016	742
BT 5	130	228	126	151	3,89	920	672
BT 6	170	217	120	144	2,83	952	695
BT 7	200	209	116	139	2,32	975	712
BT 8	240	199	110	132	1,84	1005	734
BT 9	130	152	211	113	3,66	880	642
BT 10	170	145	201	108	2,66	914	667
BT 11	200	139	193	104	2,18	938	685
BT 12	240	133	184	99	1,73	970	708

Tablo 3. KT Pomza Agregalı Karışım Oranları ve Beton Yoğunlukları

Karışım	Çimento (kg/m ³)	0-4 mm KT Pomza (kg/m ³)	4-8 mm KT Pomza (kg/m ³)	8-12 mm KT Pomza (kg/m ³)	Agrega/Çimento Oranı (A/C)	Taze Beton Yoğunluğu (kg/m ³)	Sertleşmiş Beton Yoğunluğu (kg/m ³)
KT 1	130	174	283	99	4,28	903	722
KT 2	170	166	269	94	3,11	929	743
KT 3	200	160	259	91	2,55	948	758
KT 4	240	152	247	86	2,02	972	778
KT 5	130	174	170	198	4,17	885	708
KT 6	170	166	161	188	3,03	912	730
KT 7	200	160	156	181	2,49	931	745
KT 8	240	152	148	172	1,97	957	765
KT 9	130	116	283	148	4,21	892	714
KT 10	170	111	269	141	3,06	919	735
KT 11	200	107	259	136	2,51	938	750
KT 12	240	101	247	129	1,99	963	770

BT 1- BT 4 ve KT 1-KT 4 karışımlarında 4-8 mm boyut aralığındaki pomza agreganın karışımlar arasında en yüksek oranda kullanılması sebebiyle etkinliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. BT 5 – BT 8 ve KT 4 – KT 8 karışımlarında 8-12 mm boyutlu pomza agreganın tane iriliğinin hafif beton özelliklerine etkisini irdelemek amacıyla tasarlanmıştır. Bununla birlikte BT 9 – BT12 ve KT 9 – KT 12 karışımlarında da 0-4 mm boyutunun azalması ince madde oranının düşük miktarda kullanımının beton özelliklerine etkisi irdelemek amaçlanmıştır. Bu bağlamda BT 1 – BT 12 karışımlarında Agreg/Çimento (A/Ç) oranları 1,73 – 3,96, KT 1 – KT 12 karışımlarında da A/Ç oranları 1,99 – 4,28

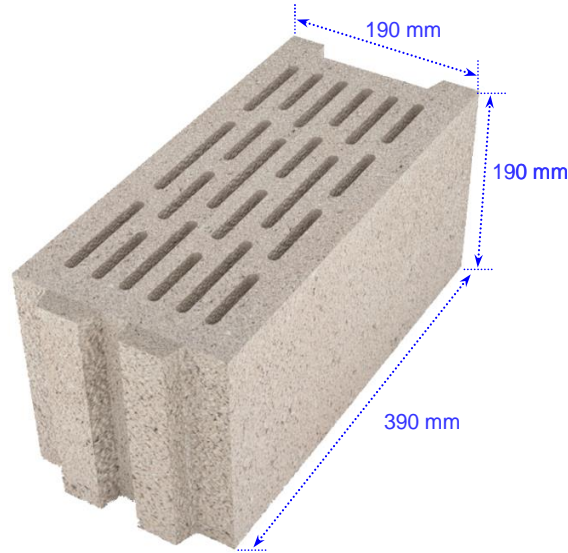
aralıklarında değişim göstermektedir. Karışımlarda kullanılan pomza agregaları tamamen suya doymuş olarak kullanılmıştır. Böylece karışıma giren karışım suyu sadece kimyasal reaksiyonu başlatmak amacıyla kullanılmıştır.

PAHB karışımları, karışım bileşimlerinin başlangıç fiziksel ve mekanik özelliklerini test etmek amacıyla deneme numunesi olarak önce 100x100x100 mm boyutlu küp kalıplara laboratuvar ortamında mevcut bulunan vibrasyon-sıkıştırma özelliğine sahip manuel kullanımlı bir döküm makinesi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen PAHB test örnekleri, döküm presinde dolun-vibrasyon-yerleştirme ve basınçla presleme işlemlerinden sonra hemen kalıptan çıkartılıp laboratuvar ortamında normal hava koşullarında 28 gün boyunca kürlemeye bırakılmıştır. Her iki pomza agrega malzemeye ait PAHB test örneklerinin sembolik test örnekleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu küp numunelerin test sonuçları, tam boyutlu kâgir blok elemanlarının üretiminde kullanılacak hafif harcın dayanım ve fiziksel özelliklerini ön analizlerle belirlemek amacıyla incelenmiştir. 28 gün kür sonrası herhangi bir kurutma işlemine tabi tutulmaksızın sertleşmiş beton yoğunlukları ölçülmüş ve basınç dayanım testleri yapılmıştır. Bu değerler her bir pomza türü ve karışım oranları açısından irdelenmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında kuruma büzülmesi ve rutubet genişmesi özelliklerini belirlemek amacıyla her PAHB karışım için 10x10x40 cm prizma örnekleri hazırlanmıştır. Tüm hafif beton numunelerinin kür sonrası kuruma büzülmesi (rötresi) ve rutubet genişmesi özellikleri bu numuneler test edilerek ASTM C426'ya göre belirlenmiştir.



Şekil 4. PAHB Test Örneklerinin Sembolik Genel Görünümü

Farklı doğal özelliklere sahip BT ve KT pomza agrega türleri kullanılarak, PAHB'dan yapılmış, taşıyıcı olmayan ve duvarlarda ısı yalıtımı amacıyla da kullanılabilir kâgir blok elemanlarının geliştirilmesi üzerine yazarlar tarafından laboratuvar ortamında bir dizi araştırma çalışması yapılmıştır. PAHB küp örnekleri, araştırmada hafif agregalı kâgir beton elemanlarının üretilme olasılığı için öncelikle denemek üzere ön blok döküm denemeleri uygulanmıştır. Deneme küp numune testi sonuçlarına göre, küp numune testlerinde kullanılan tüm karışım oranları için tam ölçekli üretim koşulları altında pomza agregalı kâgir blok (PAKB) elemanlarının dökülmesine karar verilmiştir. PAKB elemanları daha sonra, BT ve KT iki farklı pomza agregası ile üretilerek teknik değerlendirmeleri yapılmıştır. Kâgir blok numunelerinin dökümünde her bir ayrı seride hafif agrega olarak BT ve KT pomza agregaları kullanılmıştır. PAKB örnekleri üretim tesislerinde olduğu gibi servo kontrollü yarı otomasyon bir blok üretim makinesinde üretilmiştir. PAKB örnekleri 190 × 390 × 190 mm (genişlik × uzunluk × yükseklik) anma boyutlarında olup, geometrik olarak 6 sıra boşluklu 21 gözlü sık dilimli (yarık tasarımlı) ve lamba zıvanalı formundadır. PAKB örneklerinde bu tasarımın kullanımı ile eşdeğer blok boyutlarına sahip ancak daha yüksek hacimsel oranda boşluk içeren blok tasarımlara nazaran daha yüksek değerlerde mukavemet ve daha iyi ısı yalıtım değerleri elde edilebilmesi amaçlanmıştır. Pomza agrega türünün PAKB elemanlarının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde gerçek durumda analiz etmek için, deneme küp numunelerinde kullanılan karışım oranları ile aynı şekilde tam ölçekli blok formlarında her bir pomza agrega türü ve karışımlarında 3'er adet blok analiz edilmiştir. Analizlerde kullanılan PAKB tasarımının genel görünümü sembolik olarak Şekil 5'te verilmiştir. Kâgir blok analizlerinde TS EN 771-3 (2005) ve ilgili standartların öngördüğü prensipler kullanılmıştır.



Şekil 5. PAKB Tasarımının Sembolik Genel Görünümü

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Tüm PAHB küp numunelerinin basınç dayanımı, kuruma büzülmesi, rutubet genleşme ve su emme değerleri detaylı bir özet olarak BT ve KT pomza agrega malzemeleri için sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. Ayrıca tüm PAHB karışım bileşimleri için tam ölçekli PAKB elemanlarının kuru durumda birim ağırlığı, birim hacim kütlesi, basınç dayanımı ve ısıl iletkenlik bulguları BT ve KT pomza agrega malzemeleri için sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. BT Pomza Agregalı Hafif Beton Karışımlarının ve Kâgir Blok Elemanların Özellikleri

Özellikler	Karışımlar											
	BT 1	BT 2	BT 3	BT 4	BT 5	BT 6	BT 7	BT 8	BT 9	BT 10	BT 11	BT 12
PAHB Küp Test Örnekleri												
Agrega/Çimento Oranı	3,96	2,88	2,36	1,87	3,89	2,83	2,32	1,84	3,66	2,66	2,18	1,73
Su Emme Oranı, (%)	36,0	32,1	30,0	26,2	35,0	34,3	30,5	27,0	40,8	35,0	33,5	33,0
Basınç Dayanımı, (N/mm ²)	1,63	1,85	1,99	2,22	1,73	1,84	2,05	2,27	1,32	1,57	1,74	1,88
Kuruma Büzülmesi, (%)	0,047	0,055	0,059	0,063	0,048	0,057	0,057	0,061	0,049	0,056	0,057	0,062
Rutubet Genleşmesi, (%)	0,043	0,045	0,047	0,049	0,042	0,046	0,047	0,049	0,043	0,046	0,047	0,049
PAKB Kâgir Blok Örnekleri												
Birim Ağırlık, (kg)	6,65	7,08	7,39	7,80	6,59	7,02	7,33	7,75	6,38	6,81	7,13	7,56
Birim Hacim Kütle, (kg/m ³)	625	665	694	734	620	659	689	728	599	640	671	711
Basınç Dayanımı, (N/mm ²)	1,22	1,43	1,57	1,64	1,50	1,74	2,02	2,06	1,15	1,37	1,51	1,59
Isıl İletkenlik, (W/mK)	0,122	0,128	0,130	0,136	0,122	0,126	0,129	0,134	0,120	0,123	0,126	0,131

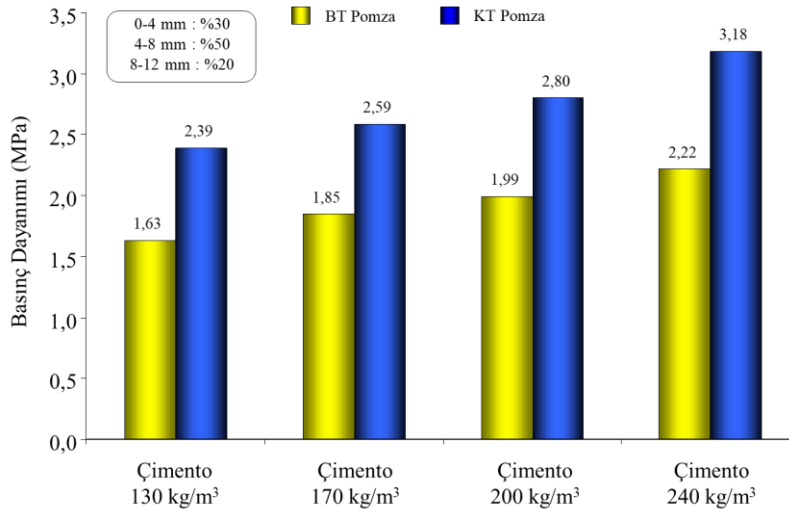
Tablo 5. KT Pomza Agregalı Hafif Beton Karışımlarının ve Kâgir Blok Elemanların Özellikleri

Özellikler	Karışımlar											
	KT 1	KT 2	KT 3	KT 4	KT 5	KT 6	KT 7	KT 8	KT 9	KT 10	KT 11	KT 12
PAHB Küp Test Örnekleri												
Agrega/Çimento Oranı	4,28	3,11	2,55	2,02	4,17	3,03	2,49	1,97	4,21	3,06	2,51	1,99
Su Emme Oranı, (%)	29,3	27,2	23,2	20,8	32,0	27,6	25,2	24,4	33,3	29,0	26,5	21,9
Basınç Dayanımı, (N/mm ²)	2,39	2,59	2,80	3,18	2,33	2,55	2,73	2,85	2,29	2,48	2,67	2,98
Kuruma Büzülmesi, (%)	0,038	0,048	0,051	0,054	0,040	0,048	0,051	0,053	0,039	0,050	0,050	0,055
Rutubet Genleşmesi, (%)	0,034	0,040	0,042	0,045	0,035	0,042	0,043	0,045	0,036	0,042	0,043	0,045
PAKB Kâgir Blok Örnekleri												
Birim Ağırlık, (kg)	9,13	9,39	9,58	9,83	8,94	9,20	9,40	9,66	9,01	9,27	9,46	9,73
Birim Hacim Kütle, (kg/m ³)	859	883	900	924	840	865	884	908	847	871	890	914
Basınç Dayanımı, (N/mm ²)	2,03	2,28	2,45	2,65	2,35	2,53	2,63	2,74	2,37	2,44	2,49	2,58
Isıl İletkenlik, (W/mK)	0,147	0,151	0,154	0,158	0,146	0,149	0,152	0,153	0,148	0,150	0,152	0,155

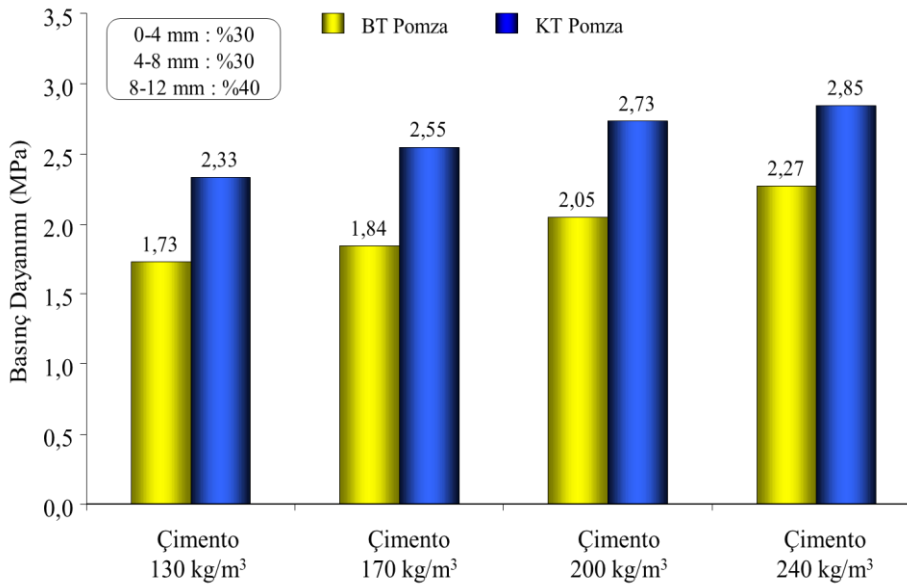
Küp Örneklerinin Analizi

Basınç dayanımı ve yoğunluk

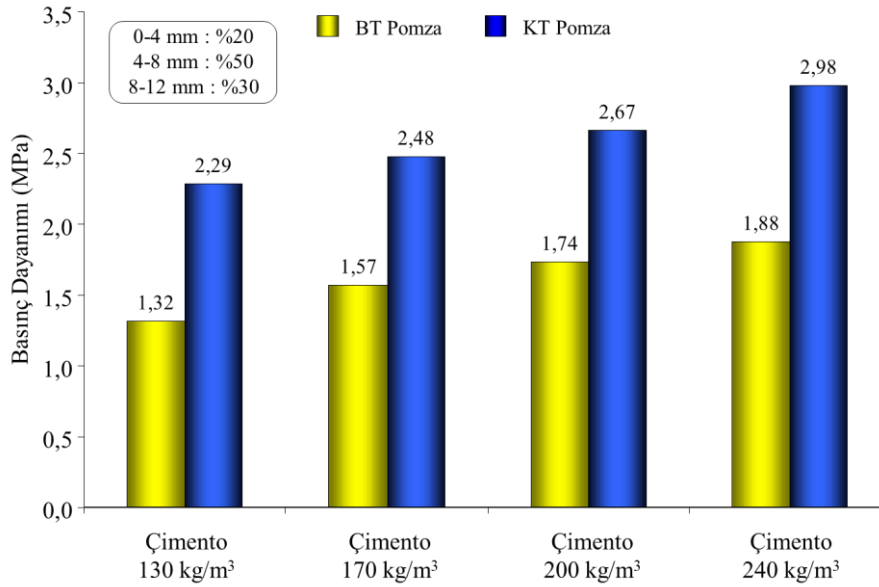
Tüm pomza agrega türleri için teknik olarak genel beklenti iri agrega oranı arttıkça basınç dayanım değerlerinin azalması eğilimindedir. Ancak, PAHB küp numunelerinin basınç dayanımı değerleri irdelendiğinde bu beklentiden farklı bir durumun olduğu gözlenmekle birlikte karışım tasarımındaki ince-orta ve iri boyut agrega dağılımının betonun mukavemetini doğrudan etkilediği belirlenmiştir. PAHB küp numunelerinin basınç dayanımı değerleri farklı çimento dozajlarına göre Şekil 6 – Şekil 8’de her bir seri için sırasıyla verilmiştir. Elde edilen basınç dayanım analiz bulguları irdelendiğinde, Bitlis-Tatvan bölgesi pomza agregası ile hazırlanmış PAHB küp örneklerinde en yüksek dayanım değerlerinin ikinci seri olarak tasarlandığı 30:30:40% oranlarında harmanlanmış ince-orta ve iri boyut BT pomza agregalı karışımlarda elde edilmiştir. Bu karışım serisinde 8-12 mm boyutlu iri agrega kullanımı diğer karışım serilerine kıyasla her ne kadar en yüksek oranda (%40) görülse de karışımdaki agregaların harmanlanması sonrası tane boyut dağılımının daha homojen bir forma ulaştığı ve yaş harcın kalıba vibrasyon ve presleme yöntemiyle yerleştirilmesi sürecinde iri boyut agreganın tane mukavemetinin düşük olması sebebiyle kısmen ufalanarak daha düşük boyutlu hale gelebildiği görülmüştür. Bu davranışın kısmen beton matrisinde daha sıkı bir hamur oluşturmasına neden olduğu tecrübe edinilmiştir. Çimento dozajı arttıkça bu seride basınç dayanımları 1,27 N/mm² ile 2,27 N/mm² arasında değişmektedir. Diğer BT-PAHB küp örneklerinin serilerinde ise çimento dozajı artışında basınç dayanımları 1,32 N/mm² ile 2,22 N/mm² arasında değişmiştir.



Şekil 6. Pomza Agregası Karışım Oranları ve Çimento Dozajına Bağlı Basınç Dayanım Değişimi



Şekil 7. Pomza Agregası Karışım Oranları ve Çimento Dozajına Bağlı Basınç Dayanım Değişimi



Şekil 8. Pomza Agregası Karışım Oranları ve Çimento Dozajına Bağlı Basınç Dayanım Değişimi

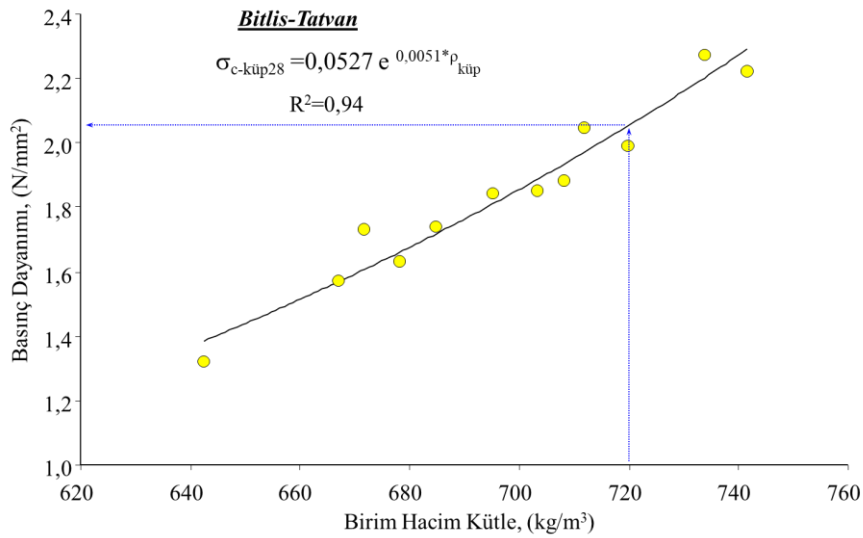
Diğer pomza agregası malzemesi için, Kayseri-Tomarza bölgesi pomza agregası ile hazırlanmış PAHB küp örneklerinde en yüksek dayanım değerlerinin ise birinci seri olarak tasarlandığı 30:50:20% oranlarında harmanlanmış ince-orta ve iri boyut KT pomza agregalı karışımlarda elde edilmiştir. Bu karışım serisinde 8-12 mm boyutlu iri agregası kullanımı diğer karışım serilerine kıyasla en düşük oranda (%20) olup, 4-12 mm orta boyut olarak da kabul agregası grubunun agregası harmanı içerisinde ağırlıkça %50 oranında yer alması PAHB küp örneklerinin mukavemetini doğrudan etkilemiştir. KT pomza agregası orta boyutta kırma işlemi sonrası ince madde oranının yüksekliği dikkat çekmiş olup, elde edilen PAHB matrisinde daha kompakt bir hamur oluşumunu sağlamıştır. KT pomza agregalarının gözenek oranının BT pomzalarından daha düşük oluşu, gözenek formlarının daha düzenli bir doğaya sahip olması, yığın yoğunluğunun daha yüksek oluşu gibi faktörlere bağlı olarak tane mukavemeti BT pomzalarından daha yüksektir. Bu da KT pomza agregalarının eşdeğer kullanımlarda dayanım iyileşmesi sağlayabileceğini temsil edebilmektedir. BT-PAHB küp örneklerinin değerlerine benzer bir davranışla çimento dozajı arttıkça bu seride de basınç dayanımları 2,39 N/mm² ile 3,18 N/mm² arasında değişmektedir. Diğer KT-PAHB küp örneklerinin serilerinde ise çimento dozajı artışında basınç dayanımları 2,29 N/mm² ile 2,98 N/mm² arasında değişmiştir. Bu serilerin tamamında elde edilen dayanım değerleri açısından iki farklı BT ve KT pomza agregaları mukayese edildiğinde KT pomza agregalı PAHB test örnekleri yaklaşık %40 daha yüksek mukavemet sağladığı belirlenmiştir. Bir diğer değerlendirme de tüm serilerde karışımdaki Agregası/Çimento (A/Ç) oranı düştükçe, PAHB test örneklerinin basınç dayanımları artmaktadır. Bu bağlamda, yüksek mukavemet elde edilmesi öngörülen kâğıt PAKB elemanların üretiminde A/Ç oranı düşük, homojen agregası boyut dağılıma sahip uygun bir pomza agregası türünün yapılacak ön testlerle belirlenerek karışım bileşenlerinin tasarlanması son önem kazanmaktadır.

Hafif agregalı betonların mukavemet değerleri esas alınarak RILEM (RILEM, 1978) tarafından üç farklı grup sınıflandırılmıştır. Bunlar: Sınıf I “Yapısal betonlar”, Sınıf II “Yapısal ve Yalıtım amaçlı betonlar” ve Sınıf III “Dolgu ve amaçlı yalıtım betonları”dır. Bu gruplar içerisinde yapısal betonlar genellikle taşıyıcı ve yüksek mukavemet gerektiren hafif beton türlerini temsil etmektedir. Ayrıca sertleşmiş hafif betonun basınç dayanımı, yoğunluk ve ısı iletkenlik değerleri bu sınıflandırma sisteminde temel parametreler olarak kabul edilir (RILEM, 1978). Kabul edilen bu teknik değer limitleri Tablo 6’da verilmiştir. Bu çalışmada PAHB test örneklerinin hiçbiri Sınıf I yapısal beton ve Sınıf II yapısal ve yalıtım amaçlı beton dayanım gereksinimleri ile eşleşmemiştir. PAHB test örneklerinin tamamı Sınıf III dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar için öngörülen dayanım limitlerini kolaylıkla sağlamaktadır. RILEM limitlerine göre dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için minimum öngörülen dayanım değerinin > 0,5 N/mm²’lik değeri esas alındığında, özellikle KT pomza agregalı karışımlar ile BT pomzalarına kıyasla bu grubun kendi içerisinde değerlendirilmesinde yüksek mukavemetli ürünlerin elde edilebileceği görülmektedir.

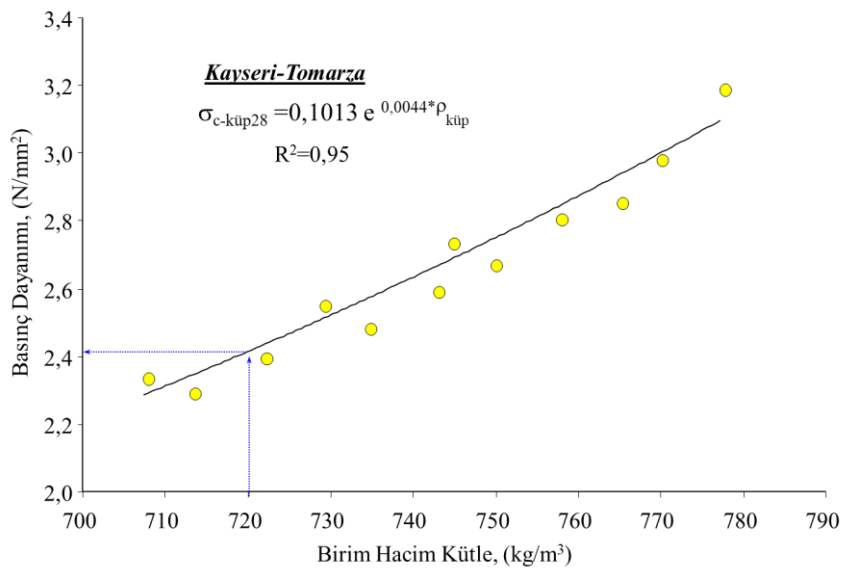
Tablo 6. Hafif Agregalı Beton Gereksinimleri (RILEM, 1978)

Sınıf	I	II	III
Hafif betonun amacı	Yapısal	Yapısal ve Yalıtım	Yalıtım
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	> 15,0	> 3,5	> 0,5
Etüv kuru yoğunluk (kg/m ³)	< 2000	tanımlanmamış	tanımlanmamış
Isıl iletkenlik (W/mK)	-	< 0,75	< 0,30

Yang ve Huang (1996), hafif agregalı betonun dayanım değerinin, beton karışımında kullanılan agreganın teknik özelliklerinin ve hacim oranının bir fonksiyonu olarak değiştiğini incelemiştir. Bununla birlikte, matris yapısındaki düşük görünür özgül ağırlık ve yüksek gözeneklilik, hafif agregaların temel özellikleri olarak kabul edilebilir (Ünal vd., 2007). İri agreganın yüksek gözenekliliği ve düşük yoğunluğu, matris yapısından dolayı zayıf bir özellik gösterir. Buna göre, bu agrega kullanılarak hafif betonun mukavemeti nispeten düşüktür (Bremmer & Holm, 1986). Genel olarak, bir betondaki hafif iri agrega hacminin artmasının beton yoğunluğunun azalması nedeniyle beton mukavemetini azalttığı bilinmektedir. Bu nedenle hafif beton numunelerinin basınç dayanımındaki değişim, yoğunluğuna da bağlıdır. Bu çalışmada BT ve KT pomza agrega kullanımlarında sertleşmiş betonun etüv kuru yoğunluğunun artmasıyla PAHB küp numunelerin basınç dayanımındaki artış tüm numunelerde yaşanmıştır. BT ve KT pomza agrega PAHB küp numunelerin basınç dayanımı ve yoğunluğu arasındaki ilişki Şekil 9 ve Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Birim Hacim Kütle-Basınç Dayanım İlişkisi (BT- PAHB Örnekleri)



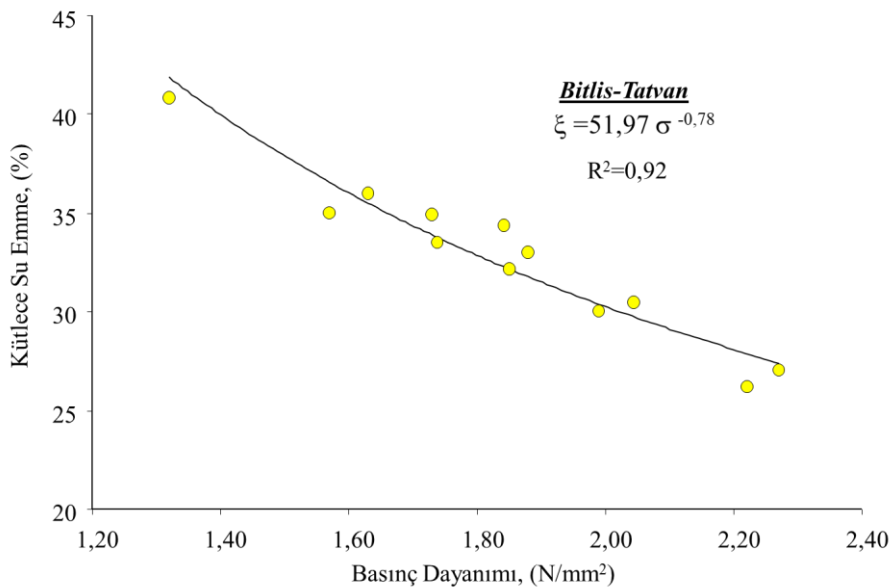
Şekil 10. Birim Hacim Kütle-Basınç Dayanım İlişkisi (KT- PAHB Örnekleri)

Grafiksel ilişkiler incelendiğinde BT ve KT pomza agregası türleri için dayanım ve beton yoğunluğu arasında lineer kabul edilebilecek bir ilişki görülmektedir. Bu ilişkiler için korelasyon katsayısı çok anlamlı olup, bu agregası malzemeleriyle üretilen PAHB örneklerinin basınç dayanımları bu analizlerde elde edilen regresyonel eşitlikler yardımıyla tahmin edilebilir. Dolgu ve yalıtım amaçlı kullanılacak hafif beton türleri için RILEM limitlerinde yoğunluk değeri ile ilgili bir sayısal değer deklere edilmemiş olmasına rağmen, endüstriyel uygulamalarda genel bir eğilim olarak sertleşmiş betonun etüv kuru yoğunluk değerinin $<1450 \text{ kg/m}^3$ 'ten düşük olması tecrübe edilmiştir. BT ve KT pomza agregalı hafif beton örneklerinde elde edilen en yüksek yoğunluk değeri 778 kg/m^3 'tür. Tüm karışımlara ait PAHB örneklerinin yoğunluk değerleri dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betondan mamul ürünlerin elde edilebileceğini göstermektedir. BT ve KT agregasının betonun dayanım – yoğunluk ilişkisinin irdelenmesi amacıyla; örneğin her iki pomza türünde 720 kg/m^3 'lük eşdeğer bir beton yoğunluk değeri ele alındığında, bu yoğunlukta BT-PAHB örneklerinde eşdeğer kür süresinde $2,07 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir dayanım elde edilirken, aynı yoğunlukta KT-PAHB örneklerinde $2,41 \text{ N/mm}^2$ 'lik bir dayanım elde edilmektedir. Bu yalnız irdeleme, KT pomzasının BT pomzasına göre beton örneklerinin mukavemetinde yaklaşık %16,4 kadar daha etken olduğunu göstermektedir.

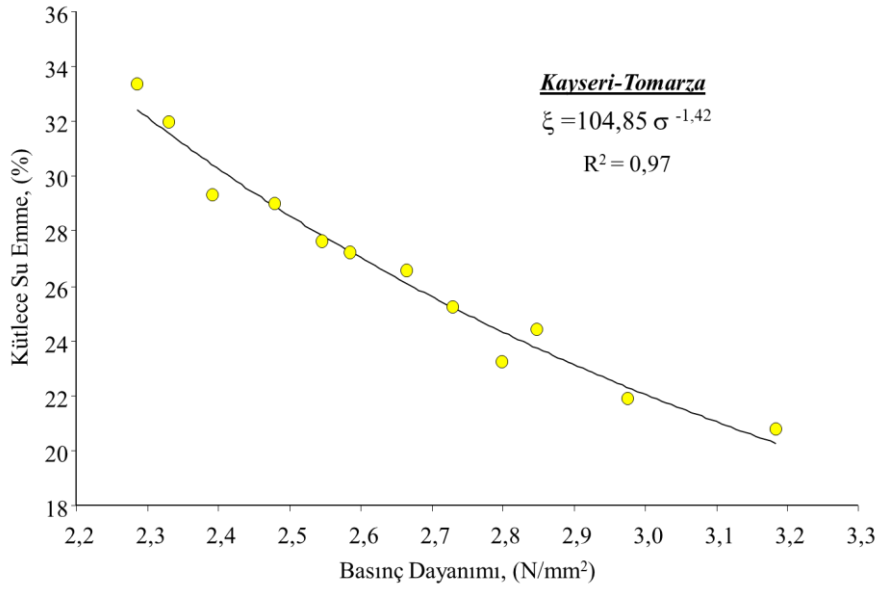
Pomza agregasının düşük özgül ağırlığı nedeniyle karışımlarda artan agregası/çimento oranıyla 28 günlük sertleşmiş PAHB örneklerinin kuru yoğunlukları azalmaktadır. Ayrıca, eşdeğer karışım bileşiminde BT ve KT pomza agregası türleri için PAHB örneklerinin kuru yoğunlukları değişken olmuştur. En yüksek yoğunluk, KT pomzası için birinci seri olarak tasarlanmış 30:50:20% oranlarında harmanlanmış ince-orta-iri boyut agregalı KT 4 karışımında 778 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. KT pomza agregalı diğer sertleşmiş PAHB örneklerinin yoğunlukları bu değer ile 708 kg/m^3 aralığında değişmektedir. BT pomzası ile yapılmış sertleşmiş PAHB örneklerinin yoğunlukları KT pomzası değerlerinden genellikle düşük olup, en yüksek yoğunluk değeri birinci seri olarak tasarlanmış 30:50:20% oranlarında harmanlanmış ince-orta-iri boyut agregalı BT 4 karışımında 742 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. En düşük yoğunluk değeri ise üçüncü seri olarak tasarlanmış 20:50:30% oranlarında harmanlanmış ince-orta-iri boyut agregalı BT 9 karışımında 642 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Eşdeğer bir karışım tasarımında BT ile KT pomza agregalı betonun yoğunlukları arasında yaklaşık %4,9'luk bir fark olup, BT pomza agregaları daha düşük yoğunluk değerleri sağlamaktadır.

Su emme

Hafif betonların analizinde beton karışımlarının su emme kapasitesi ve/veya su emme özelliği ilgi çekicidir. Genel olarak, su emme kapasitesinin yüksek olması, hafif betonların mukavemetini ve ısı iletkenliğini düşürür. Çalışma kapsamında yapılan test bulgularına göre, karışımdaki A/Ç oranı arttıkça, PAHB örneklerinin kütlece su emme oranları da artmaktadır (Tablo 4 ve Tablo 5). Bununla birlikte, çimento dozajının artması, betonun su emme kabiliyetini düşürmektedir. Bu bağlamda PAHB örneklerinin mukavemeti ile su emme kabiliyetleri arasında bir ilişkinin varlığı gözlenmiştir. BT-PAHB ve KT-PAHB örneklerinin dayanım – su emme ilişkisi sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12'de analiz edilmiştir.



Şekil 11. Basınç Dayanımı – Su Emme İlişkisi (BT-PAHB)



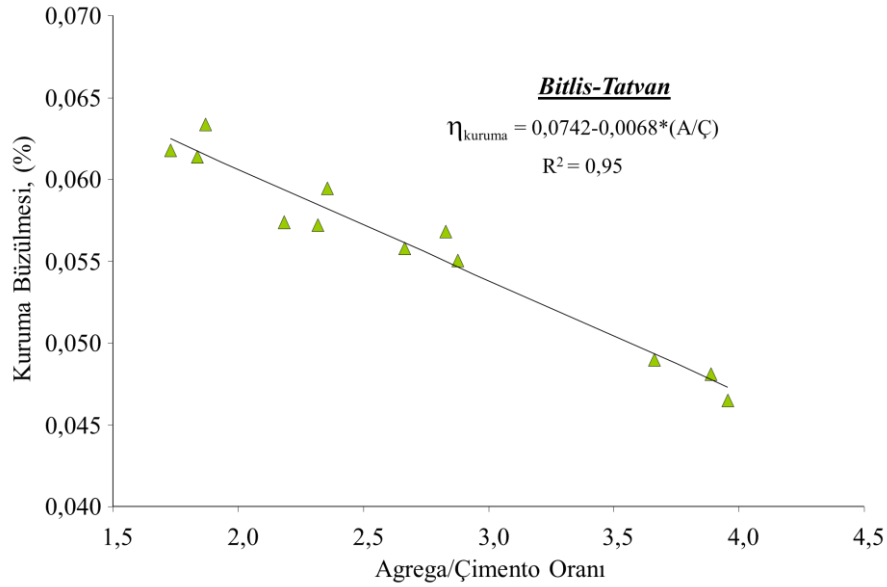
Şekil 12. Basınç Dayanımı – Su Emme İlişkisi (KT-PAHB)

En düşük su emme değeri, BT pomzası için BT 4 karışımında %26,2, en yüksek su emme değeri ise BT 9 karışımında %40,8 olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan en düşük su emme değeri, KT pomzası için KT 4 karışımında %20,8, en yüksek su emme değeri ise KT 9 karışımında %33,3 olarak belirlenmiştir. Bu örneklerin dayanım ve yoğunluk değerleri irdelendiğinde pomza agreganın yoğunluğu arttıkça, azalan gözeneklilik olgusuna da bağlı olarak su emme kabiliyetinin azaldığı genel bir eğilimdir. Ayrıca beton örneklerinin hazırlanmasında kullanılan çimento dozajının miktarı da su emme potansiyeline temel etken faktörlerdendir. Analiz bulguları, hafif beton tasarımında ince-orta-iri boyut agregası kullanım oranlarının sertleşmiş betonun su emme kabiliyetine etken olduğunu göstermiştir. Agregası tane boyutu oransal kullanımlarına göre BT ve KT pomza agregalı beton örneklerinin eşdeğer karışım tasarımlarında su emme değerleri arasında yaklaşık %22,5 - %26'lık bir değişimin olduğunu göstermiştir. BT pomza agregalı beton örnekleri KT agregalı örneklerle göre daha yüksek su emme potansiyeline sahiptir. Özellikle karışımda iri boyut agregası oranı arttıkça bu davranış daha da belirgin hale gelmektedir. BT ve KT agregalı hafif betonlarda çimento içeriğine ve A/Ç oranlarına bağlı olarak daha düşük su emme değeri sağlayacak şekilde tasarımlar da düzenlenebilir.

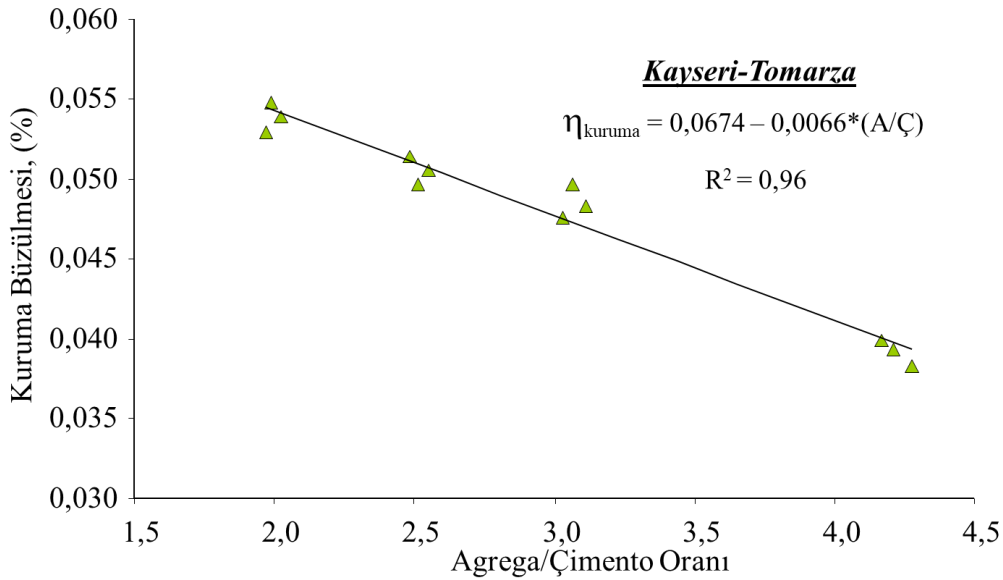
Kuruma Büzülmesi ve Rutubet Genleşmesi

Betonların kuruma rötresi sadece pomza agregalı betonlarda değil, tüm hafif agregası bileşenlerine sahip betonlarda da detaylı olarak incelenmesi gereken teknik bir özelliktir. Betonun matris yapısında agregası özelliğinden kaynaklanan son derece ince hücreli yapıya sahip gözenek ve hücre duvarlarının bulunması, betonun matris yapısında gözeneklere emilen suyun kısmen de olsa kuruma sürecinde büzülme olgusu göstermesi kaçınılmaz olabilir (Gündüz, 1998; Berge, 1983). Hossain (2004), pomza agregalı betonun kuruma büzülmesinin hafif agregası içermeyen kontrol betonundan daha yüksek değerler gösterdiğini deneyimlemiştir. Beton karışımındaki pomza agregası miktarının artması da rötresi değerini artıran bir faktör olarak görülebilmekte ve su emmesi yüksek olan agregaların betonda da yüksek rötresi olgusu oluşturduğu gözlemlenmiştir (ACI, 1989). Kostmatka vd. (2002), düşük yoğunluklu ve yük taşıyan betonun kuruma rötresi değerinin normal yoğunluklu betondan yaklaşık %30 daha yüksek olduğunu bildirmiştir. Hafif agregalı beton bileşimlerinin büzülme özelliğinin normal yoğunluklu betona göre %50 daha fazla olabileceği de bildirilmiştir (FIP, 1983).

BT-PAHB ve KT-PAHB örneklerinin kuruma büzülmesi analiz bulguları Şekil 13 ve Şekil 14'de dağılım grafikleri olarak gösterilmektedir. Varyasyonlar, betonun yoğunluk seviyesi arttıkça kuruma büzülmesinin sistematik kabul edilebilecek bir şekilde arttığını göstermektedir. BS 6073 (1981) standardında (Bölüm 1) duvar elemanları için kuruma rötresi değerinin ortalama %0,06 veya daha az olması gerektiğini öngörülmüştür. Araştırmada kullanılan tüm PAHB karışımları bu standartta öngörülen teknik özellikleri sağlamaktadır (Tablo 4 ve Tablo 5).



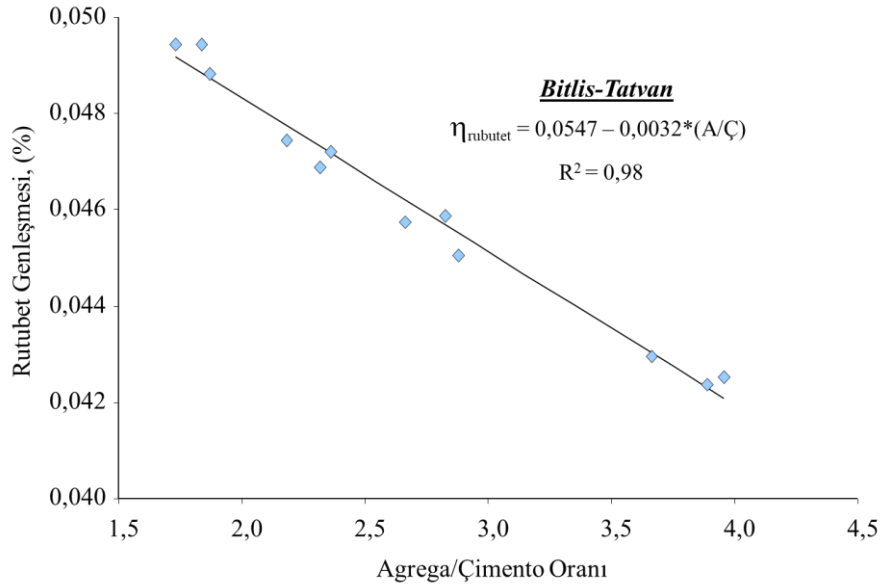
Şekil 13. Kuruma Büzülmesi Analizi (BT- PAHB)



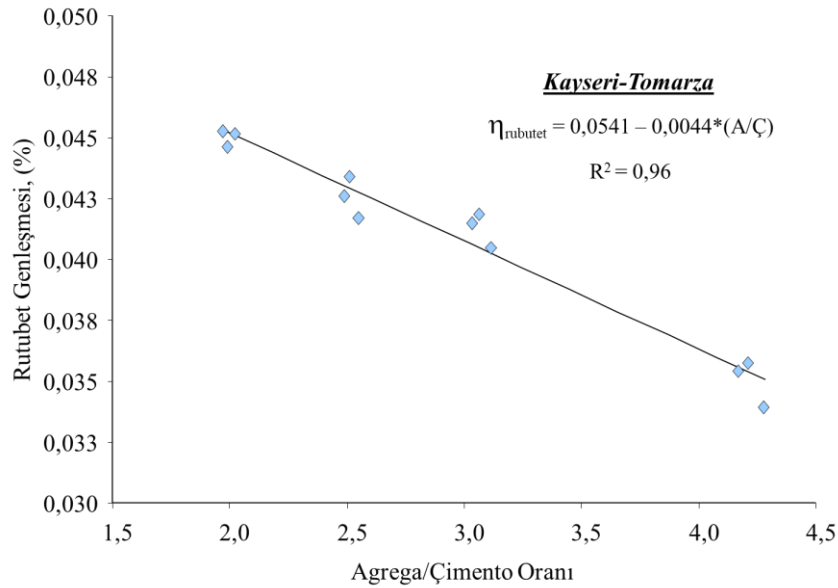
Şekil 14. Kuruma Büzülmesi Analizi (KT- PAHB)

En düşük kuruma büzülmesi değeri, BT pomzası için BT 1 karışımında %0,047, en yüksek kuruma büzülmesi değeri ise BT 4 karışımında %0,063 olarak belirlenmiştir. BS 6073 (1981) standardında (Bölüm 1) duvar elemanları için öngörülen %0,060'lık maksimum kuruma büzülmesi (rötresi) değerinin, bu karışım kombinasyonunda aşıldığı görülmektedir. Analizde kullanılan diğer BT- PAHB örneklerinin kuruma büzülme değerleri irdelendiğinde benzer şekilde BT 8 ve BT 12 karışımlarının da rötre değerlerinin bu eşik değerini aştığı görülmüştür. Bu karışımların ortak özelliği serilerdeki en yüksek çimento dozajlı ve en düşük A/Ç oranlı tasarımlardır. Buradan görüleceği üzere çimento dozajının artması, hafif beton yoğunluğunun artmasına paralel olarak kuruma büzülmesi olgusunu artırmaktadır. KT pomzalı örnekler irdelendiğinde ise en düşük kuruma büzülmesi değeri KT 1 karışımında %0,038, en yüksek kuruma büzülmesi değeri ise KT 12 karışımında %0,055 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla BS 6073 (1981) standardında (Bölüm 1) duvar elemanları için öngörülen %0,06'lık maksimum kuruma büzülmesi (rötresi) değerinin, KT pomza agregalı örneklerin hiç birisinde bu eşik değerini aşılmadığı görülmüştür. KT pomza agregaların gözenek olgusu, kapalı ve açık gözenek formlarının genel karakteristiğinin hafif betonun kuruma büzülmesi açısından BT agregalara göre daha avantajlı bir davranış sergilediği görülmüştür. BT-PAHB ve KT-PAHB test örneklerinin A/Ç oranları arttıkça kuruma büzülme oranları düşmektedir. BT-PAHB test örneklerinin karışım oranı değişimlerine göre kuruma büzülmesinin KT-PAHB örneklerine göre eşdeğer kabul edilebilecek kararlı bir davranış oluşturmaktadır. En yüksek ve en düşük kuruma rötresi değerleri arasında BT pomza agregalı örnekler için %0,016'lık bir fark söz konusu iken,

bu fark KT pomza agregalı örnekler için hemen hemen eşdeğer düzeyde olup %0,017'dir. BT-PAHB ve KT-PAHB örneklerinin rutubet genişmesi bulguları Şekil 15 ve Şekil 16'da dağılım grafikleri olarak gösterilmektedir. Varyasyonlar, kuruma rötresine benzer şekilde betonun yoğunluk seviyesi arttıkça rutubet genişmesinin de sistematik kabul edilebilecek bir şekilde arttığını göstermektedir (Tablo 4 ve Tablo 5).



Şekil 15. Rutubet Genleşmesi Analizi (BT- PAHB)



Şekil 16. Rutubet Genleşmesi Analizi (KT- PAHB)

En düşük rutubet genişmesi değeri, BT pomzası için BT 5 karışımında %0,042, en yüksek rutubet genişmesi değeri ise BT 8 ve BT 12 karışımlarında %0,049 olarak belirlenmiştir. KT pomzalı örnekler irdelendiğinde ise en düşük rutubet genişmesi değeri KT 1 karışımında %0,034, en yüksek rutubet genişmesi değeri ise KT 4, KT 8 ve KT 12 karışımlarında %0,049 olarak belirlenmiştir. Bu karışımların ortak özelliği serilerdeki en yüksek çimento dozajlı ve en düşük A/Ç oranlı tasarımlardır. Buradan görüleceği üzere çimento dozajının artması, hafif beton yoğunluğunun artmasına paralel olarak rutubet genişmesi olgusunu artırmaktadır. Genel eğilim, KT pomza agregaların BT agregalara göre daha düşük rutubet genişmesi değerleri sağlayabildiğidir. PAHB karışımları ile üretilecek yapı elemanlarında rötresiz veya minimum rötre değerli ürünlerin tasarlandığı durumlarda BT pomza agregalara kıyasla KT pomza agregalı karışımların daha düşük rötre değerleri sağlayabileceği anlaşılmaktadır. BT-PAHB ve KT-PAHB test örneklerinin A/Ç oranları arttıkça rutubet genişmesi oranları düşmektedir. KT-PAHB test örneklerinin karışım oranı değişimlerine göre rutubet genişmesinin BT-PAHB örneklerine göre daha kararlı davranış oluşturmaktadır.

En yüksek ve en düşük rutubet genleşmesi değerleri arasında BT pomza agregalı örnekler için %0,007'lik bir fark söz konusu iken, bu fark KT pomza agregalı örnekler için daha yüksek düzeyde olup %0,011'dir.

Tam Ölçekli Kagir Blok Analizi

Basınç dayanımı ve birim ağırlık

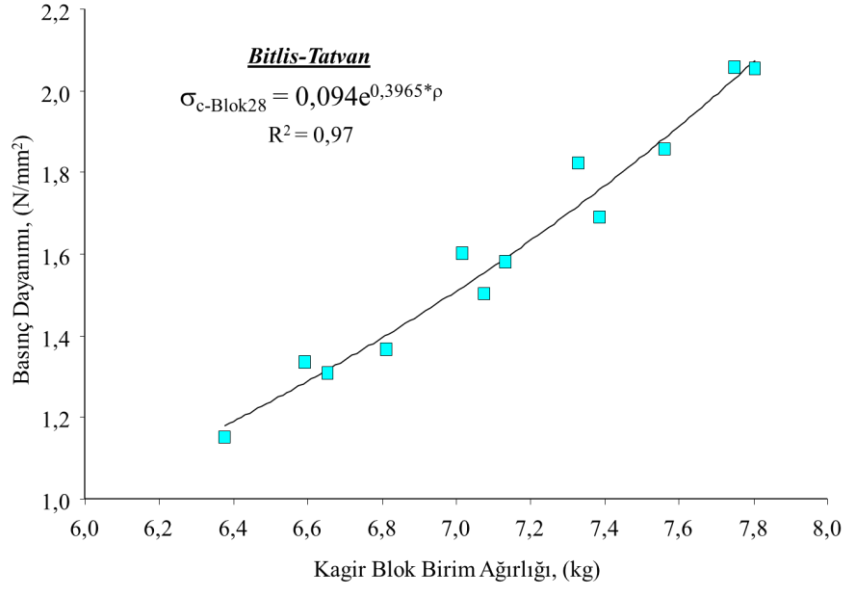
Hafif agregalı kâgir beton blok elemanları, karışımlarda kullanılan agrega türüne ve kullanım oranlarına bağlı olarak, normal ağırlıklı beton bloklardan yaklaşık 4 ila 6 kat daha düşük yoğunluk değerlerine sahiptir. Güncel olarak yürürlükte olan EN standartlarında, kâgir blok elemanları için önerilen bir dayanım değeri limiti tanımlanmamış olsa da BS 6073 (1981) standardının 1. Kısımında tüm kâgir blok elemanlarının duvar örgüsünde kullanımı için minimum dayanım değerinin $2,8 \text{ N/mm}^2$ olması gerektiği vurgulanmıştır. Ancak, TS EN 771-3 (2005) standardında beton blok örneklerinin basınç dayanımı ile ilgili limit aralığı verilmemiş, beton blok basınç dayanımı beyana bağlı bırakılmıştır. Bununla birlikte, RILEM (RILEM, 1978) tarafından sınıflandırılmış yapısal ve yalıtım amaçlı hafif betonlar ile dolgu ve yalıtım amaçlı yalıtım hafif betonları için limit değer olarak öngörülen basınç dayanımları (Tablo 6) sırasıyla $>3,5 \text{ N/mm}^2$ ve $>0,5 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Ancak buradaki dayanım değerleri hafif betonun dayanım değerleri olup, kâgir blok elemanının değerlerini doğrudan temsil etmemektedir. Endüstriyel uygulamalarda BS 6073 (1981) standardında öngörülen $2,8 \text{ N/mm}^2$ 'lik blok dayanım değerlerinden daha düşük mukavemetli blok elemanları kullanılabilir. Özellikle dolgu ve yalıtım amacıyla uygulanacak ve taşıyıcı olmayan duvarlarda uygulama için tercih edilebilecek kâgir blok elemanları için RILEM 3. grup hafif beton limitleri dikkate alındığında kâgir blok için öngörülebilir minimum basınç dayanım değerinin $1,30 \text{ N/mm}^2$ 'lik değeri sağlaması öngörülebilir olduğu düşünülmektedir. Aynı zamanda saha incelemelerinde edinilen teknik tecrübe ile üretimleri sonrası $1,30 \text{ N/mm}^2$ 'lik dayanıma ulaşmış kâgir blok elemanları gerek nakliye sırasında gerekse şantiye ortamında taşınması sürecinde blok elemanı zayıflarının teknik bir görüş olarak eşik değeri kabul edilebileceğini göstermiştir. Diğer bir deyişle bu dayanım değerinden daha düşük mukavemet değerlerine sahip blok elemanlarının zayıflar oluşturma riski yüksektir. Bu bağlamda çalışma kapsamında irdelenen tüm PAKB örnekleri bu teknik değer esas alınarak yorumlamalar yapılmıştır.

Genellikle karışımlarda agrega yoğunluğunun düşük olması ve agrega hacminin yüksek olması kâgir blok mukavemetini azaltır. Tam ölçekli kâgir bloklar üzerinde yapılan araştırma çalışmaları, gerekli yüksek dayanım değerlerine ulaşmak için pomza agrega türü ve karışım kompozisyonlarının çok önemli parametreler olduğunu göstermiştir. Farklı pomza agregaları için aynı karışım kompozisyonunda çimento miktarı arttıkça blok birim ağırlık artışı da artmaktadır. Ancak ince agrega içeriğinin artırılması aynı çimento içeriğinde blok birim ağırlığını ve blok mukavemetini de artırmaktadır. Bu karakteristik, test edilen tüm karışım serilerinde gözlenmiştir. Hafif agregalı beton harcından mamul kâgir blok elemanlarının basınç dayanımı genellikle blok elemanının tasarım parametreleri ve blok harcı parametreleri olmak üzere başlıca iki farklı etmene bağlıdır. Blok elemanı tasarım parametreleri olarak bloğun geometrik şekli, doluluk ve boşluk oranları, tasarımındaki sıra boşluk sayısı ve formu gibi özellikleri sayılabilir. Blok harcı parametresi olarak da bloğun üretiminde kullanılan agrega türü, tane boyut dağılımı, hafif beton harcının yoğunluğu, kâgir blok elemanı dökümünde harcın kalıba yerleşme oranı, sıkışabilirlik oranı, çimento dozajı, agrega/çimento oranı ve su/çimento oranı vb. faktörlerin etkinliği sayılabilir. Bu çalışmada ileri farklı pomza ile yapılmış tüm PAKB örneklerinde geometrisi ve tasarımı eşdeğer olan kâgir blok kalıbı standart bir blok normu olarak kullanılmıştır. Blok kalıbı tüm karışım oranlarında sabit olduğu için, tam ölçekli blok örneklerinin değerlendirilmesinde blok elemanı tasarım parametreleri açısından bir mukayese yapılmamıştır.

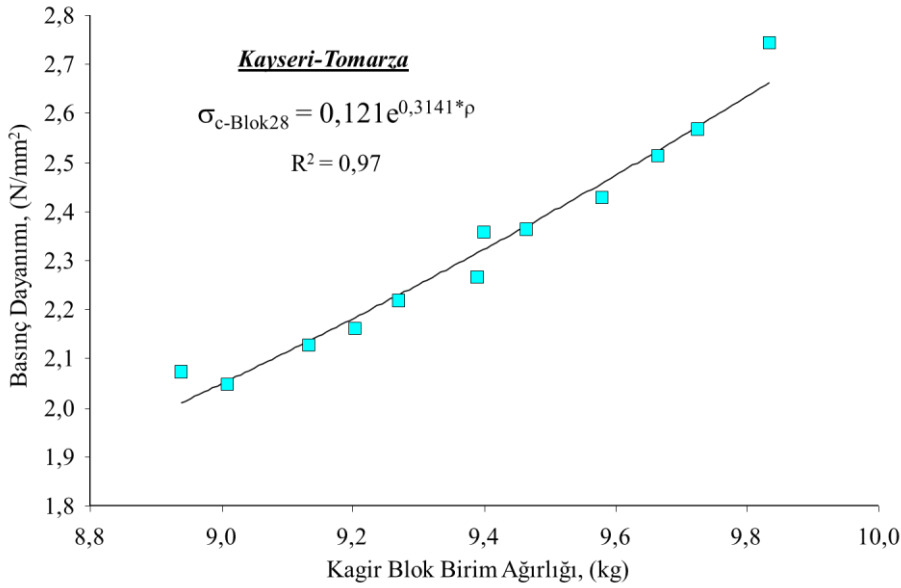
BT-PAKB örnekleri ve KT-PAKB örneklerinin incelemelerinde pomza agrega türü, oranları ve karışım bileşenlerinin genel değişimi üzerinde teknik mukayeseler bu çalışmada ağırlık kazanmıştır.

BT-PAKB ve KT-PAKB örneklerinin analizlerde elde edilen teknik bulguları özetle Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. Hazırlanan karışımlarda A/Ç oranı arttıkça PAKB örneklerinin birim ağırlıkları düşmekte olup, daha hafif blok elemanları elde edilmektedir. BT pomza agrega kullanılarak üretilmiş ve en yüksek birim ağırlığa sahip PAKB örneği BT-10 karışımıyla $7,75 \text{ kg}$, en düşük birim ağırlığa sahip PAKB örneği ise BT-9 karışımıyla $6,38 \text{ kg}$ olarak elde edilmiştir. Bu değerler, blok elemanın kuru durumda ve nem içermeyen değerleridir. Bununla birlikte KT pomza agrega kullanılarak üretilmiş ve en yüksek birim ağırlığa sahip PAKB örneği KT-4 karışımıyla $9,83 \text{ kg}$, en düşük birim ağırlığa sahip PAKB örneği ise KT-5 karışımıyla $8,94 \text{ kg}$ olarak elde edilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, BT pomza agrega ile aynı tasarıma sahip bir kâgir blok elemanında aynı şartlarda dökümü yapılmasına rağmen KT pomza agregaya göre daha hafif blok üretimini mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda kuru durumda BT pomza agregaları ile eşdeğer formatta KT pomza agregalara kıyasla yaklaşık %33 daha hafif blok elemanı elde edilebileceği görülebilmektedir. Ancak kâgir blok elemanının birim ağırlığının düşmesi (hafiflemesi) dayanım değerimin de

düşebileceğine işaret eder. Çalışma kapsamında bu durum BT ve KT pomza agregalı bloklar için ayrı ayrı analiz edilmiş olup, teknik bulgular Şekil 17 ve Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 17. Kâgir Blok Birim Ağırlığı – Basınç Dayanım İlişkisi (KT- PAKB)



Şekil 18. Kâgir Blok Birim Ağırlığı – Basınç Dayanım İlişkisi (KT- PAKB)

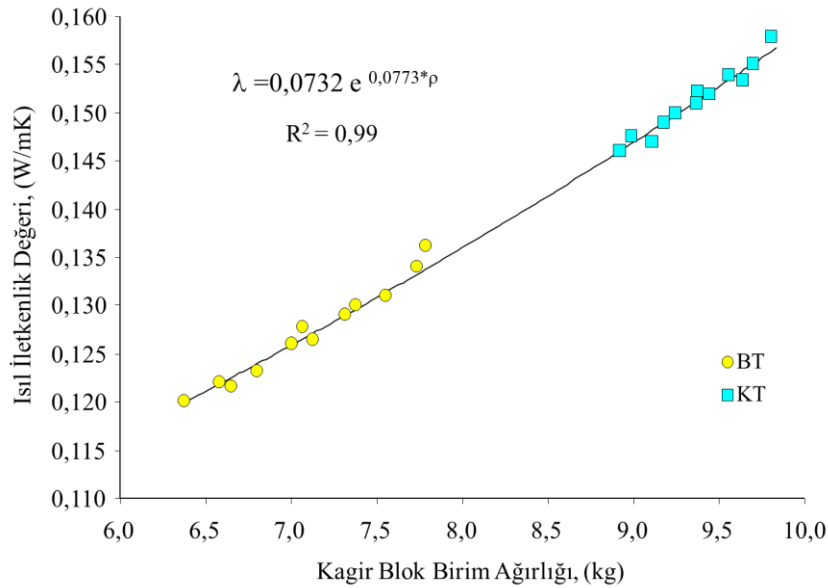
Bu grafiksel analizlerden de görüldüğü üzere kâgir bloğun birim ağırlığı arttıkça, azalan A/Ç oranına da bağlı olarak basınç dayanımında lineer kabul edilebilecek eğilimle artmaktadır. BT pomza agregası kullanılarak üretilmiş ve en düşük dayanımlı PAKB örneği BT-9 karışımıyla 1,15 N/mm², en yüksek dayanımlı PAKB örneği ise BT-8 karışımıyla 2,06 N/mm²'dir. KT pomza agregası kullanılarak üretilmiş ve en düşük dayanımlı PAKB örneği KT-9 karışımıyla 2,05 N/mm², en yüksek dayanımlı PAKB örneği ise KT-4 karışımıyla 2,74 N/mm²'dir. KT pomza agregalı blokların dayanımı BT pomza agregalı blok dayanımlarından daha yüksektir. Yukarıdaki paragraflarda da değinildiği üzere, bu çalışma kapsamında kâgir blokların dayanım açısından irdelenebilirlik kriteri minimum 1,30 N/mm² olarak öngörülmüştür. Bu yaklaşım dikkate alındığında KT pomza agregalı kâgir blokların tüm karışım oranlarında uygulanabileceği belirlenmiştir. Ancak, BT pomza agregalı kâgir bloklardan BT-9 karışımı hariç diğer tüm karışım oranlarında uygulanabileceği belirlenmiştir.

Isı iletkenlik

Doğal gözenekli pomza agregalı hafif beton harcından mamul kâgir blok elemanların, binalarda taşıyıcı olmayan dolgu duvar uygulamalarında yalıtıma ek ürün olarak kullanılması yaygın bir uygulamadır (Gündüz, 2005b; ESCSI, 1997; Brown & Skinner, 1990; Bomhard, 1980). PAKB elemanlarının ısı iletkenlik değerlerini belirlemek için laboratuvar koşullarında oluşturulmuş korumalı sıcak kutu aparatı yöntemi kullanılmıştır.

Al-Jabri vd. (1997), sıcak iklim koşullarında iklimsel bir ortam yaratmak için kâgir beton blok elemanların ısı yalıtım özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmada blok elemanları vermikülit (VerBlock) ve polistren boncuk katkılı blok (PolyBlock 1) olmak üzere iki farklı yerel malzeme kullanılarak üretilmiştir. Ancak bu malzemelerin bir arada kullanılmasıyla üretilen ısı yalıtım blokları (PolyBlock 2) ve geleneksel beton bloklar da üretilmiştir. Test edilen kâgir blokların ısı iletkenlik değerleri VerBlock, PolyBlok1, PolyBlock2 ve konvansiyonel beton kâgir blok elemanları için 0,616-1,60 W/mK aralığında değişim gösterdiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında BT ve KT pomza agregalı bloklar için analiz edilen ısı iletkenlik bulguları Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. BT- PAKB örneklerinden BT-9 karışımıyla üretilmiş blok elemanı en düşük ısı iletkenlik değerine sahip olup değeri 0,120 W/mK'dir. KT-PAKB örneklerinden KT-5 karışımıyla üretilmiş blok elemanı ise en düşük ısı iletkenlik değerine sahip olup değeri 0,146 W/mK'dir. BT pomza agregaların yoğunluklarının düşük olması KT pomza agregalara göre ısı iletkenlik değerlerinde daha düşük, daha yalıtım özelliği yüksek kâgir blok elemanların elde edilebilmesini mümkün kılmıştır. Diğer taraftan, çimento içeriğinin artması, karışımlarda kullanılan her bir pomza agregası türü için ısı yalıtım özelliğini düşürücü bir etki sergilemiştir. Ancak genel olarak blokların ısı iletkenlikleri pomza agregalarının türüne göre değişmektedir. Pomza agregasının birim ağırlığı ne kadar düşük ise, kâgir bloğun ısı iletkenliği de o ölçüde düşük düzeyde olur.

BT ve KT pomza agregası türleri ile üretilen her bir kâgir blok elemanın birim ağırlık değerine karşı elde edilen ısı iletkenlik değeri grafiksel analiz ile Şekil 19'da verilmiştir. Grafiksel analiz incelendiğinde eşdeğer tasarım formuna sahip bir blok elemanında farklı agregası türleri kullanılsa bile blok elemanın birim ağırlık değeri ile ısı iletkenlik değeri arasında lineer bir ilişkinin varlığı önem kazanmaktadır.



Şekil 19. Birim Ağırlık Değeri ile Isıl İletkenlik İlişkisi

BT pomza agregalı blok numunelerin ısı iletkenliği 0,120 W/mK ile 0,136 W/mK arasında değişirken, KT pomza agregalı blok numunelerinde bu özellik 0,146 W/mK ile 0,158 W/mK arasında değişmektedir. Eşdeğer tasarım formuna sahip PAKB örneklerinde BT pomza agregası ve KT agregası kullanımı arasında ısı yalıtım performansı açısından yaklaşık %19'luk bir fark oluşmaktadır. Üretilen PAKB örneklerinde karışım bileşiminin ince tane içeriği, çimento miktarı ve A/Ç oranı, kâgir bloğun ısı iletkenlik değerini, doğrudan etkileyen faktörler olduğu belirlenmiştir.

RILEM (RILEM, 1978) dokümantasyonunda kâgir blok elemanlarının yalıtım amaçlı kullanımında öngörülen ısı iletkenlik limiti <0,30 W/mK'dir. Bununla birlikte hafif agregalı betondan yapılmış kâgir blok yoğunluğunun 1450 kg/m³'ten daha düşük olması gerekliliği vurgulanmaktadır. Her iki ayrı pomza ile üretilen yapılmış PAKB örneklerinin tamamı RILEM'in öngördüğü teknik limitleri karşılamakta olup, taşıyıcı olmayan duvar

uygulamalarında dolgu ve aynı zamanda yalıtıma katkı sağlayan kagir blok elemanları olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, ince, orta ve iri boyut pomza agregalı hafif beton (PAHB) numuneleri üretilmiştir. Pomza agregaları Bitlis-Tatvan (BT) ve Kayseri-Tomarza (KT) olmak üzere iki farklı pomza ocağından elde edilmiştir. Hafif betonların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlendikten sonra, aynı hafif beton karışım oranları ile tam ölçekli hafif beton blok örnekleri üretilmiş ve beton blokların fiziksel ve mekanik özellikleri irdelenmiştir. Çalışma sonuçlarına göre;

1. BT agregası ile hazırlanmış PAHB küp örneklerinde en yüksek dayanım değerleri 2,27 MPa ile 240 kg/m³ çimento dozajına ve 30:30:40 agrega kullanım oranına sahip karışımlarda elde edilmiştir. KT agregalı küp örneklerinde ise 3,18 MPa basınç dayanımı ile 240 kg/m³ çimento dozajına ve 30:50:20 agrega kullanım oranına sahip karışım en yüksek basınç dayanımına sahip karışım olmuştur.

2. Hafif agregalı betonların mukavemet değerleri esas alınarak RILEM tarafından üç farklı grup sınıflandırılmıştır. PAHB test örneklerinin tamamı Sınıf III dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar için öngörülen dayanım limitlerini kolaylıkla sağlamaktadır. RILEM limitlerine göre dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için minimum öngörülen dayanım değerinin > 0,5 N/mm²'lik değeri esas alındığında, özellikle KT pomza agregalı karışımlar ile BT pomzalarına kıyasla bu grubun kendi içerisinde değerlendirilmesinde yüksek mukavemetli ürünlerin elde edilebileceği görülmektedir.

3. BT ve KT pomza agregalı hafif beton örneklerinde elde edilen en yüksek yoğunluk değeri 778 kg/m³'tür. Birim hacim kütlesi artan karışımların basınç dayanımlarının arttığı ve basınç dayanımındaki artışın su emme karakteristiğini azalttığı tespit edilmiştir. BT pomza agregalı beton örnekleri KT agregalı örnekler göre daha yüksek su emilim potansiyeline sahiptir.

4. Betonun yoğunluk seviyesi arttıkça kuruma büzülmesinin ve rutubet genleşmesinin arttığı ancak, agrega/çimento oranının artması ile azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük kuruma büzülmesi değeri, BT pomzası için BT 1 karışımında %0,047, en yüksek kuruma büzülmesi değeri ise BT 4 karışımında %0,063 olarak belirlenmiştir. KT pomzalı örnekler irdelendiğinde ise en düşük kuruma büzülmesi değeri KT 1 karışımında %0,038, en yüksek kuruma büzülmesi değeri ise KT 12 karışımında %0,055 olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla BS 6073 (1981) standardında (Bölüm 1) duvar elemanları için öngörülen %0,060'lık maksimum kuruma büzülmesi (rötresi) değerinin, KT pomza agregalı örneklerin hiç birisinde bu eşik değerin aşılmadığı görülmüştür.

5. BT pomza agrega kullanılarak üretilmiş ve en yüksek birim ağırlığa sahip PAKB örneği BT-10 karışımıyla 7,75 kg, en düşük birim ağırlığa sahip PAKB örneği ise BT-9 karışımıyla 6,38 kg olarak elde edilmiştir.

Kagir bloklar üzerinde yapılan testlerde en düşük ısı iletkenlik katsayısına 0,120 W/mK ile BT pomza agregalı blok numunelerinde tespit edilmiştir. RILEM (RILEM, 1978) dokümantasyonunda kagir blok elemanlarının yalıtım amaçlı kullanımında öngörülen ısı iletkenlik limiti <0,30 W/mK'dır.

KAYNAKLAR

ACI, (1989). Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete, ACI 221R-89, ACI Committee 221 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

Al-Jabri, K. S., Hago, A. W., Al-Nuaimi, A. S., & Al-Saidy, A. H. (2005). Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 1472-1479.

Anonim. (2021). The Pantheon in Rome, The Temple of al Gods. <https://www.italyguides.it/en/lazio/rome/ancient-rome/pantheon>

Berge, O., (1983) Lätt isolerande konstruktrionsbeton med isländsk pimpsten som ballast, Västra Frölunda.

Bomhard, H., (1980). Lightweight concrete structures, potentialities, limits and realities, The Concrete Society, The Construction Press, Lancaster, London, New York, UK, pp.227-290.

Bremmer, T. W., & Holm, T. A., (1986). Elasticity, compatibility and the behavior of concrete. ACI Material Journal, vol. 83, no. 2, pp. 244-250.

- Brown, B. J., & Skinner, M. (1990). Report On Concrete Mix Design For Lightweight Masonry Units Using Yali Pumice Coarse and Fine Aggregates. Report No: 89/3408D/2923, STATS Scotland Ltd., East Kilbride, Scotland, UK.
- BS, (1981). BS 6073-1:1981, Precast concrete masonry units - Specification for precast concrete masonry units.
- ESCSI, (1997). A Tehnical report on Rotary Kiln Produced Structural Lightweight Aggregate, Expanded Shale, Clay and Slate, England, pp.1-19.
- Failla, A., Mancuso, P., Miraglia, N., & Ruisi, V. (1997). Experimental – Theoretical Study on Pumice Aggregate Lightweight Concrete”, Technical Report The Instuto di Scienza delle Costruzioni, Facolta di Ingegneria, Palermo; Published by Ministero della Publica Instuzione, Palermo, Italy, pp.3-22.
- FIP, (1983). FIP Manual of Lightweight Aggregate Concrete, 2nd ed., Survey Univ. Press, London.
- Gündüz, L. (2005a). İnşaat Sektöründe Bimsblok, Süleyman Demirel Üniversitesi, Pomza Araştırma ve Uygulama Merkezi, Isparta.
- Gündüz, L. (2005b). A technical report on lightweight aggregate masonry block manufacturing in Turkey, Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey, pp 1-110, 2005.
- Gündüz, L., & Uğur, İ. (2005). The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures. Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 1859-1864.
- Gündüz, L., (Ed.) (1998). Pomza Teknolojisi (Pomza Karakterizasyonu), Cilt I, Isparta, Türkiye, s285.
- Hossain, K. M. A., (2004). Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. Cement and Concrete Research, vol. 34, pp. 283-291.
- Kostmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., Macleod, N. F., & McGrath, R. J., (2002). Design and control of concrete mixtures, 7th Canadian ed., Engineering Bulletin, vol. 101, Cement Association of Canada, Ottawa, Ontario.
- LAVA, (1998). Maple Aggregates, LAVA pumice stone and its use, Printed in England by James Quentin Associates Limited, Brighton, England, pp.1-8.
- Neville, A. M. (1996). Properties of Concrete, Fourth and Final Edition, Harlow, UK: Addison Wesley Longman Limited.
- RILEM, (1978). Functional Classification of Lightweight Concretes, Recommendation, RILEM LC2, second edition.
- TSE, (2005). TS EN 771-3, Kâgir birimler - Özellikleri - Bölüm 3: Beton kâgir birimler (Yoğun ve hafif agregalı), Ankara.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T., & Yıldız, A. (2007). Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. Building and Environment, vol. 42, no. 2, pp. 584-590.
- Yang, C. C. & Huang, R. A. (1996). A two-phase model for predicting the compressive strength of concrete. Cement and Concrete Research, vol. 26, no. 10, pp. 1567-1577.
- Yasar, E., Atis, C. D., Kılıç, A., & Gulsen, H. (2003). Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash, Materials Letters, vol. 57, pp. 2267-2270.