

Atık Kâğıt ve Aktif Orijinli Genleşmiş Perlit İçeren Hafif Yapı Elemanları Üzerine Bir İnceleme

A Study on Lightweight Building Elements Containing Waste Paper and Active Origin Expanded Perlite

Lütfullah Gündüz¹ , Şevket Onur Kalkan^{1*} 

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir Türkiye

Öz

Küresel ısınma, inşaat sektörü dahil olmak üzere tüm sektörleri yakından etkileyen önemli bir konudur. Bu nedenle, düşük enerji tüketimiyle üretilebilen malzemeler geliştirmek için birçok girişim gerçekleştirilmektedir. Bunlardan bir tanesi atık kağıtların yapı malzemeleri üretiminde kullanımı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, binalarda ısı yalıtımı açısından boşluklu hafif kagir beton blokların kullanımı da son yıllarda oldukça yaygınlaşmıştır. Bu makalede, geri dönüştürülmüş atık kâğıt ve aktif orijinli genleşmiş perlit ve pomzanın dolgu duvar yapımında kullanılan hibrit agregalı sürdürülebilir yapı elemanlarının incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmada, hafif yapı malzemesi üretiminde çevre dostu ve sürdürülebilir alternatifler oluşturmak için atık kâğıt, pomza ve perlit kullanılarak elde edilen kagir blokların mekanik özellikleri, yoğunluk ve ısı yalıtımı açısından performansı değerlendirilmiştir. Atık kâğıt gibi geri dönüştürülmüş malzemelerle geleneksel yapı malzemelerine kıyasla daha düşük maliyetli, çevreye duyarlı ve enerji verimliliği sağlayan yapı elemanlarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, atık kâğıt kullanımının artışı ile malzemenin basınç dayanımı düşse de RILEM'e göre gerekli basınç dayanım kriterlerini sağlayabildiği gözlemlenmiştir. Küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri 2,76 MPa - 3,38 MPa aralığında belirlenmiştir. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kagir bloğun birim ağırlıklarında 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %16,4, %15,2, %14,4 ve %13,8'lik hafiflemesini sağlamıştır. Ayrıca, %35 atık kâğıt kullanımı ile hafif bloklarda 0,143 ile 0,167 W/mK ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin sağlanabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, hibrit agregalı yapı elemanlarının inşaat sektöründe hafif dolgu duvarlar için potansiyel bir alternatif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Abstract

Global warming is an important issue that closely affects all sectors, including the construction sector. For this reason, many initiatives are being carried out to develop materials that can be produced with low energy consumption. One of these can be considered as the use of waste paper in the production of building materials. In addition, the use of hollow lightweight masonry concrete blocks in terms of thermal insulation in buildings has also become quite widespread in recent years. This article aims to examine sustainable building elements with hybrid aggregates used in the construction of infill walls made of recycled waste paper and active origin expanded perlite and pumice. In the study, the mechanical properties, density and thermal insulation performance of the masonry blocks obtained using waste paper, pumice and perlite were evaluated in order to create environmentally friendly and sustainable alternatives in the production of lightweight building materials. It is aimed to develop building elements that are more cost-effective, environmentally friendly and energy efficient compared to traditional building materials with recycled materials such as waste paper. According to the results obtained, although the compressive strength of the material decreases with the increase in the use of waste paper, it has been observed that it can meet the required compressive strength criteria according to RILEM. Compressive strength values of cube samples after 28 days of curing were determined in the range of 2.76 MPa - 3.38 MPa. The use of 20% waste paper and 15% expanded perlite provided a 16.4%, 15.2%, 14.4% and 13.8% reduction in the unit weight of the masonry block in 110, 150, 180 and 200 doses of binder, respectively. In addition, it was observed that thermal conductivity coefficient values of 0.143 to 0.167 W/mK could be achieved in lightweight blocks with the use of 35% waste paper. This study shows that hybrid aggregate structural elements can be used as a potential alternative for lightweight infill walls in the construction sector.

Anahtar Kelimeler: Atık kâğıt, perlit, kâğıt blok, hafif beton, dayanım, rötre, yalıtım

Keywords: Waste paper, perlite, masonry block, lightweight concrete, strength, shrinkage, insulation

* Sorumlu yazar e-posta (Corresponding e-mail): sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 11.10.2024, Kabul Tarihi (Accepted): 18.03.2025

1. Giriş

Günümüzde artan çevresel endişelerin esas kaynağı, yeterince ekonomik olarak değerlendirilemeyen ve yönetilemeyen atıkların giderek birikmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu atıkların yoğun miktarlarda herhangi bir endüstri alanında katma değer sağlayan birer geri dönüşüm materyali olarak kullanım olasılıklarının araştırılması, günümüzün önemli konuları arasında yer almaktadır. Bu malzemelerin miktar olarak yoğun tüketiminin söz konusu olabileceği özellikle inşaat malzemeleri olarak geri dönüştürülmesi, olası çevresel kirliliğin etkilerinin giderimi, binalarda sürdürülebilir ve ekonomik değerlere sahip yenilikçi malzemelerin geliştirilmesi için pratik yaklaşımlar olarak görülebilmektedir. Son yıllarda, yenilenebilir veya geri dönüştürülmüş malzemelerden üretilen farklı formlardaki yapı malzemelerine olan ilgi giderek önem kazanmaktadır. İnşaat sektöründe oldukça fazla miktarlarda yenilenemeyen kaynak kullandığından, düşük maliyetli ve yalıtım özellikleri olan geri dönüşüm malzemelerinin kullanımıyla yeni nesil sürdürülebilir nitelikte kompozit yapı elemanlarının üretilme potansiyeli, güncel araştırma konuları arasında yerini almıştır [1]. Yapı malzeme üretimlerinde geri dönüşüm materyal olasılıklarından birisi de atık kâğıtların hafif yapı elemanı üretimlerinde ana ve/veya katkı malzemesi olarak kullanılmasıdır. Birçok araştırmacının düşük yoğunluklu duvar tuğlaları geliştirmek amacıyla atık kâğıt, atık kâğıt çamuru, kül, granüle yüksek fırın cürufu, saman balyası, uçucu kül, strafor, geri dönüştürülmüş agregalar, plastik kutular, tarım atıkları üzerinde çalışmaları olduğu görülmektedir [2-11]. Geri dönüştürülebilir malzemeler arasında cam, kâğıt, karton, metal, plastik, lastik, tekstil ürünleri ve elektronikler bulunur. Gıda veya bahçe atığı gibi biyolojik olarak parçalanabilir atıkların kompostlanması veya başka şekilde yeniden kullanımı da bir geri dönüşüm biçimidir. Geri dönüşüm, insanlık tarihinin çoğunda yaygın bir uygulama olmuş ve tarihsel süreçte MÖ dördüncü yüzyılda Platon'a kadar uzandığı görülmektedir [12]. Atık kâğıtlar, özellikle çimento esaslı matrislerde geçişten günümüze değin farklı formlarda yapı malzemesi olarak kullanılmış olup, üretilen kompozit yapı elemanlarının basınç, çekme, eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çok sayıda araştırma yapılmıştır [1-3,6-7,9-10,12]. Ancak, atık kâğıtların boşluklu hafif kagir beton blokların üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili literatürde sınırlı sayıda araştırma sonuçlarına rastlanmaktadır. Yousoff ve ark. [13] beton blokta kum yerine geri dönüştürülmüş kâğıt çamuru kullanımının fiziksel özelliklere etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında kullanılan geri dönüştürülmüş kâğıt çamuru yüzdeleri %5, %10 ve %15'tir. %5 geri dönüştürülmüş kâğıt çamuru kullanımı, %12,24 su emme oranı, 0,25 W/m°C (1,17 W/mK) ısı iletkenlik değeri ve 2457,71 kg/m³ yoğunluk değeri ile beton blokta en etkili oran olarak tespit edilmiştir. Yapılan testlerden elde edilen veriler ışığında, geri dönüştürülmüş kâğıt çamurunun beton bloklarda kullanılmasının inşaatlarda iç bölme duvar, boşluklu dış duvarların iç ve dış bölmeleri, döşeme dolgusu olarak kullanılabilecek iyi bir yan ürün malzemesi olabileceği, çevre dostu ve sürdürülebilir olduğu sonucuna varmışlardır. Akinwumi ve ark. [14] bir yapı malzemesi olarak kullanılmaya uygunluğunu belirlemek için atık gazete ve ofis kâğıdı kullanılarak üretilen betonun yoğunluğunu, su emme kapasitesini, basınç dayanımını ve yangına dayanıklılığını belirlemişlerdir. İncelenen her karışım oranı için, gazete kullanılarak betonun yığın yoğunluğu, su emme, basınç dayanımı ve yangına dayanıklılığının ofis kâğıdı kullanılarak üretilen daha yüksek olduğu bulunmuştur. Kâğıt katkılı betonun su emme ve yangına dayanıklılığının yüksek olduğu ve atık kâğıt içeriği arttıkça arttığı, kâğıt katkılı betonun yığın yoğunluğu ve basınç dayanımının ise düşük olduğu ve atık kâğıt içeriği arttıkça azaldığı bulunmuştur. Kâğıt betonun, özellikle yüksek katlı binaların bölme duvarlarını yapmak için kullanılacak hafif ve yangına dayanıklı içi boş veya dolu blokların üretimi için etkili ve sürdürülebilir bir malzeme olduğu önerilmiştir. Solahuddin ve Yahaya [15] atık kâğıdı (WP), Parçalanmış Fotokopi Atık Kâğıdı (SCPWP) ve Parçalanmış Karton Atık Kâğıdı (SCBWP) olmak üzere iki tür Parçalanmış Atık Kâğıdın (SWP) katkı maddeleri olarak betonun özellikleri ve Betonarme Kirişin (RCB) yapısal davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için kullanmışlardır. Slump, basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları, referans örneğine kıyasla %5-10 SCPWP ilavesi için %4-13 artarken, %15 SCPWP ilavesi için %16-23 azalmıştır. SCBWP için slump, basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları, referansa kıyasla %5-10 ekleme için %10-23 artarken, %15 ekleme için %15-21 azalmıştır. %15 SCPWP ve SCBWP ilavesi su emme ve çiçeklenmede en yüksek etkiyi göstermiştir ve %15 SCBWP ve SCPWP ilavesiyle sırasıyla %11 ve %10,28 artış gözlemlenmiştir.

Gözenekli hafif agregalardan mamul boşluklu geometrik tasarımlara sahip kâgir duvar blokları dünya genelinde inşaat projelerinde yaygın olarak kullanılan çok yönlü yapı malzemeleridir [16]. Bu kâgir bloklar, birim ağırlıklarını azaltan ve yalıtım özelliklerini iyileştiren özel tasarım boşluk geometrilerine ve konfigürasyonlara sahiptirler [17]. Bununla birlikte blok elemanını oluşturan hafif harç bileşiminde gerek birim ağırlığı azaltıcı gerekse yalıtım değerini geliştirici etki sergileyen farklı tane boyutlarında gözenekli agregalar da kullanılmaktadır [17]. Bu agregalar arasında yaygın şekilde pomza taşı, volkan cürüfları, ignimbrit agregalar görülebildiği gibi, genleşmiş perlit, vermikülit, diyatomit gibi agregaları da görmek mümkündür [18-20]. Bununla birlikte bu blok elemanların üretimlerinde endüstriyel artık malzeme hüviyetinde nitelenebilen birçok malzeme de geri dönüşüm agregaları olarak kullanılarak, yapı elemanının teknik performansları iyileştirilebilmektedir. Hafif kâgir bloklar inşaat endüstrisinde taşıyıcı olmayan iç ve dış bölme duvarlar gibi çeşitli uygulamalar için ideal birer yapı bileşeni özelliklerini taşımaktadırlar [16-20]. Bu bağlamda, atık kâğıdın hafif yapı elemanı kâgir duvar elemanlarında kullanılması ayrıca, çöp sahalarına, yakma tesislerine veya diğer kullanım seçeneklerine ekonomik ve karlı birer alternatif de olabilir.

Perlit de pomza gibi volkanik kökenli bir kayaç yapısına sahiptir. Kayaçın bünyesinde oluşum mekanizmasına göre farklı oranlarda kristal suyu bulunur. Bu kristal suyun kayaç bünyesindeki miktarı, sıcaklık etkisine maruz kalan perlitin genleşme oranına etkiyen en belirgin faktördür. Perlitler oluşumları ve bünyesindeki kristal su miktarlarına göre *aktif perlit* ve *pasif perlit* olarak tanımlanabilmektedir. Aktif perlitlerin bünyesinde kristal su miktarı yüksek olup, düşük sıcaklık değerlerinde büyük hacim artışı oluşturarak genleşme karakteristiği gösterirler. Pasif perlitler de ise, kristal su miktarı daha düşük düzeyde olup, ancak yüksek sıcaklık değerlerinde genleşebilirler [21-23]. Aktif perlit özellikli malzemeler, düşük sıcaklık etkisinde genleşme miktarı ayarlanarak (3-10 kat arası) tane mukavemeti ve yoğunluğu görece yüksek genleştirilmiş agrega üretiminin yapılabilmesine de olanak sağlayabilmektedir. Bu perlitlerin genleşme işlemi sonrası yığın yoğunlukları 150–300 kg/m³ aralığında değişim gösterebilmektedir. Bu şekilde elde edilen genleştirilmiş perlit agregalara “*düşük sıcaklıkta genleşmiş perlit*” adı da verilebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, atık kâğıt ve genleşmiş perlitin etkili ve kaliteli bir hafif kâgir blok elemanı üretiminde kullanılmasına odaklanmaktır. Literatür incelendiğinde, atık kâğıt ve perlit agregaların birlikte kullanılması ile üretilen hafif beton örneklerinin teknik analizlerini inceleyen yeterli düzeyde çalışma olmadığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, hafif beton karışımında atık kâğıdın betonun dayanımına etkisinin incelenmesi ve atık kâğıt içeren beton için karışım oranlarının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu çalışma ile evlerde, okullarda, ticari, endüstriyel ve diğer kuruluşlarda üretilen atık kâğıtların geri dönüşümü ve tekrar endüstriyel bir alana ekonomik olarak kazandırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, atık kâğıtların olası çöp toplama alanlarında birikimiyle potansiyel oluşturabileceği kirliliğin çevre üzerindeki etkisini azaltmak ve ekonomik katma değeri olan bir materyal özelliği kazandırmaktadır.

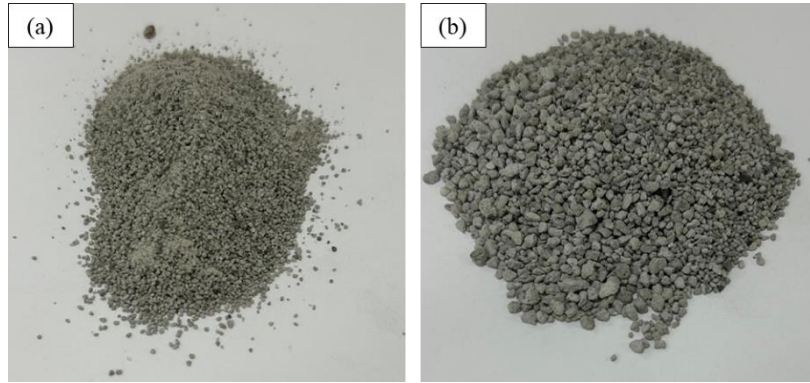
2. Materyal ve Metot

2.1. Test Örneklerinde Kullanılan Malzemeler

Taşıyıcı özellikte olmayan ve dolgu duvar amacıyla kullanılacak hafif yapı elemanı kâgir blok elemanlarının üretiminde gözenekli ve doğal orijinli birden fazla tür hafif agregalar sektörel uygulamalarda kullanıla gelmektedir. Bunlar arasında en yaygın olanları arasında pomza, volkan cürufu, tüfit ve ignimbrit kayaçları gibi doğal malzemeler yer almaktadır. Bu kayaçların ortak özelliği volkanik orijinli olmalarının yanı sıra doğal şekilleriyle hafif yapı elemanı kâgir ürünlerin üretimlerinde kullanılabilir olmalarıdır [21,24-25]. Bu çalışma kapsamında kâgir blok elemanların üretimi amacıyla test örneklerinin hazırlanmasında 3 farklı malzeme, ana agrega malzemeler olarak kullanılmıştır: *Pomza, geri dönüşüm ürünü atık kâğıt ve genleşmiş perlit*.

Pomza agrega malzeme Kayseri-Talas pomza ocaklarından doğal tüvenan formları korunarak tedarik edilmiş ve analizler için laboratuvar ortamına getirilmiştir. Pomza ocağından temin edilen agregalar, doğal nemlerini kaybetmemeleri için kilitli naylon poşetlerde saklanmıştır. Laboratuvarında, nemleri

korunarak primer bir kırıcıda kırılan pomza agregalar, ardından kare göz açıklıklı elekler kullanılarak 0-1 mm ve 1-3 mm olmak üzere iki farklı tane boyut grubuna ayrılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Boyutlandırılmış pomza agregası örneklerinin genel görünümü

Bu çalışmada 0-1 mm boyut aralığındaki pomza agregası örnekleri “FPA”, 1-3 mm boyut aralığındaki pomza agregası örnekleri ise “CPA” olarak kodlanmıştır. FPA ve CPA pomza agregası örneklerinin doğal nem içerikleri sırasıyla %10 ve %13 olup, nemli yığın yoğunlukları ise sırasıyla 630 kg/m³ ve 540 kg/m³’tür. Pomza agregaları çalışma boyunca herhangi bir kurutma işlemine tabi tutulmaksızın bu doğal nemleri ile kullanılmışlardır.

Bu çalışmada bağlayıcı malzeme olarak bütün karışımlarda ASTM Tip I (42,5 MPa) özelliklerine sahip çimento tercih edilmiştir. Çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir. Çimento, pomza ve genleşmiş perlitin kimyasal içeriği Çizelge 1’de verilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan atık kâğıtlar geri dönüşüm ürünü olup, gazete parçaları, artık mukavva kutuları ve kıyılmış kâğıt atıkları toplanarak laboratuvar ortamında biriktirilmiştir. Sonrasında bu materyaller ayrı ayrı fiziksel bir parçalama işlemine tabi tutularak ince boyutlu şeritler ve partiküller şekline indirgenmiştir. Ufalanmış her bir materyal, daha sonra birbirleriyle harmanlanarak karıştırılmış ve ortalama %10’luk bir su ile parçalanmış tüm şerit ve partiküller, su içerisinde bekletilerek hamur haline gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra bu hamur kurutularak selülozik lifsel yapıda atık kâğıt partiküllerinin pekleşmesi sağlanmıştır. Bu şekilde kâğır blok üretimi için testlerde ana agregası olarak değerlendirilebilecek geri dönüşüm ürünü atık kâğıt malzemesi elde edilmiştir (Şekil 2). Kuruma işlemi tamamlanmış ve pekleşmiş formdaki atık kâğıt malzemesi yığınının alınan altı ayrı numune alınarak her birinin birim hacim kütle değerleri sabit hacimli bir ölçü kabı kullanılarak elektronik terazi yardımıyla ağırlıkları ölçülmüştür. Bu ölçümlerde malzeme birim ağırlığının ölçü kabı hacmine oranı olarak belirlenen altı ayrı numunenin yoğunluk değerlerinin aritmetik ortalaması alınmış olup, bu yoğunluk değeri malzemenin yığın yoğunluğu olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan pekleşmiş formdaki atık kâğıt malzemenin yığın yoğunluğu 280±25 kg/m³ olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Geri dönüşüm ürünü atık kâğıt görünümü

Bu çalışma kapsamında orijini aktif perlit özelliğinde olan bir perlit kayacının 630-650°C sıcaklık aralığında genleşmesiyle ortalama yığın yoğunluğu $180 \pm 20 \text{ kg/m}^3$ olan genleşmiş perlit agrega piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır (Şekil 3). Genleşmiş perlit agreganın ortalama boyutu 0-2 mm aralığındadır.



Şekil 3. Genleşmiş perlit agrega sembolik genel görünümü

Çizelge 1. Çimento, pomza ve perlitin bazı majör kimyasal bileşenleri.

Bileşen (%)	Çimento	Pomza	Genleşmiş Perlit
SiO ₂	20,66	68,76	74,4
Al ₂ O ₃	5,89	14,21	18,9
Fe ₂ O ₃	4,12	3,57	0,7
CaO	63,16	2,33	1,8
Na ₂ O	0,17	3,79	3,4
K ₂ O	0,79	2,94	4,6
MgO	2,63	0,88	0,4
Kızdırma kaybı	1,41	1,64	0,87

2.2. Karışım Tasarımı ve Örnek Hazırlama

Atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların kâğır blok üretiminde bir hafif beton bileşimi olarak kullanılacak özellikler taşıyıp taşımadığının analizi amacıyla, öncelikle bir dizi kuru karışım sıfır slump kıvamında hibrit agregalı hafif beton (HAHB) örnekleri hazırlanarak fiziksel ve mekanik analizleri yapılmıştır. Bu örneklerin tasarımında 3 farklı karışım kombinasyonu uygulanmıştır. Bunlar:

- I. Kontrol test örnekleri amacıyla, karışım bileşiminde atık kâğıt ve genleşmiş perlit içermeyen yalnızca pomza agrega kullanılarak tasarlanmış bir seri hafif beton örnekleri, (*karışım bileşiminde yalnızca atık kâğıt ve genleşmiş perlit içeren kombinasyonlar, oluşturulan kuru karışım kıvamındaki harcın işlenebilirliğinin düşük olması sebebiyle bu çalışma kapsamında değerlendirmeye alınmamıştır*).
- II. Karışım bileşiminde toplam agrega miktarının ağırlıkça %20'si atık kâğıt ve %15'i genleşmiş perlit agrega kullanılarak tasarlanmış bir seri hafif beton örnekleri,
- III. Karışım bileşiminde toplam agrega miktarının ağırlıkça %35'i atık kâğıt ve %15'i genleşmiş perlit agrega kullanılarak tasarlanmış bir seri hafif beton örnekleri.

II. ve III. seri karışım tasarımlarında atık kâğıt ve genleşmiş perlit miktarları, karışımındaki pomza agregaya ikame (yer değiştirmeli) olarak tasarlanmıştır. Bu serilerde hazırlanan test örneklerinin analizlerinden elde edilen bulgular bu çalışmanın ilk bölümünü teşkil etmekte olup, kâğır blok üretiminde kullanılacak kuru kıvam formundaki hafif beton harcı için ön bilgilerin elde edilmesini amaçlamaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde, ön analizlerde belirlenen karışım oranlarına uygun olarak, tam ölçekli, iki sıra boşluklu ve 6 gözlü boşluk geometrisi ile üretilen kâğır blok formu için hibrit agregalı kâğır blok (HAKB) numuneleri üzerinde basınç dayanımı, birim ağırlık ve ısı iletkenlik analizleri gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

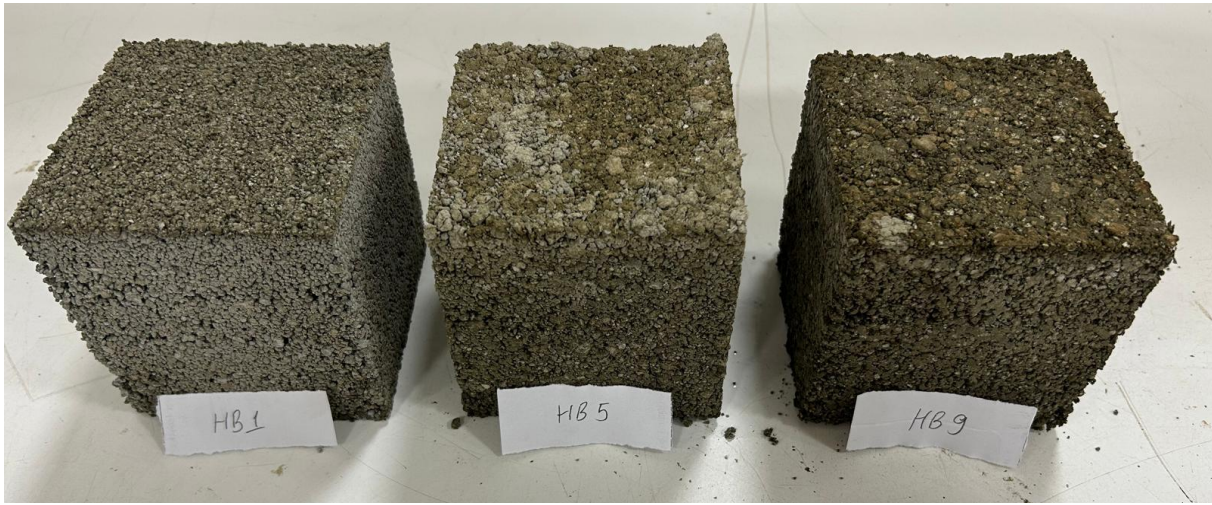
I. seri HAHB karışım tasarımında toplam agreganın ağırlıkça %40'ı FPA ve %60'ı CPA oranlarında harmanlanmıştır. Harmanlanmış pomza agrega kullanılarak, sırasıyla 110, 150, 180 ve 200 kg/m³ çimento dozajlarında kuru karışım beton blok üretimini simüle etmek amacıyla, laboratuvar ortamında vibrasyon-sıkıştırma ünitesine sahip bir döküm makinesi ile 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler ayrı ayrı üretilmiştir. Bu örnekler çalışmada HB1 – BH4 olarak kodlanmıştır. Bu örneklerin analiz bulguları çalışma kapsamında kontrol değerleri olarak irdelenmiştir. II. seri HAHB karışım tasarımında toplam agreganın ağırlıkça %15 FPA, %50 CPA, %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit oranlarında harmanlanmıştır. Benzer şekilde III. seri HAHB karışım tasarımında da toplam agreganın ağırlıkça %15 FPA, %35 CPA, %35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit oranlarında harmanlanmıştır. II. ve III. seri karışımlarından da I. seride hazırlanan örneklere eşdeğer olan, sırasıyla dört farklı 110, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlarında çimento kullanılarak kuru karışım kıvamında küp örneklerin dökümleri yapılmıştır. II. seri tasarımlarına ait örnekler çalışmada HB5 – BH8 ve III. seri tasarımlarına ait örnekler de HB9 – BH12 olarak kodlanmıştır. I., II. ve III. seri tasarımların bileşenleri ve elde edilen harç yoğunluk değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Her bir karışım için 12 adet küp numune dökümü gerçekleştirilmiş ve dört farklı çimento dozajı kullanılarak her seride toplam 48 adet HAHB numunesi üretilmiştir. Bu bağlamda çalışma kapsamında üç ayrı toplamda 144 test örneği hazırlanmıştır.

Çizelge 2. Hibrit agregalı karışım oranları ve HAHB yoğunlukları

Kod	Çiment o	FPA	CPA	Atık Kâğıt	Genleşmi ş Perlit	Agrega/ Çiment o Oranı	Taze Beton Yoğunluğu	Sertleşmi ş Beton Yoğunluk
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(A/Ç)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
HB 1	110	242	320	0	0	5,11	953	908
HB 2	150	231	305	0	0	3,57	982	925
HB 3	180	222	294	0	0	2,87	1003	939
HB 4	200	217	287	0	0	2,52	1016	951
HB 5	110	91	276	49	23	4,00	804	721
HB 6	150	86	262	46	22	2,78	843	747
HB 7	180	83	252	45	21	2,23	871	767
HB 8	200	81	246	43	21	1,96	888	782
HB 9	110	91	193	85	23	3,57	747	661
HB 10	150	86	183	81	22	2,48	790	690
HB 11	180	83	176	78	21	1,99	821	712
HB 12	200	81	171	75	21	1,74	842	727

Çalışma kapsamında tasarlanan BH5 – HB8 karışımlarında atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların harmanlanarak karışımlara ilave edilmesiyle kontrol amaçlı hazırlanan örneklere kıyasla hafif betonun ne ölçekte fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi olduğunu incelemek amaçlanmıştır. Bununla birlikte, BH9 – HB12 karışımlarında ise karışım tasarımında genleşmiş perlit miktarı sabit tutulup, atık kâğıt miktarı ağırlıkça %15 nispetinde artırıldığında hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde ne gibi değişime sebep olduğunu incelemek amaçlanmıştır. Bu bağlamda HB1 – HB4 karışımlarında Agregat/Çimento (A/Ç) oranları 2,52 –5,11, HB5 – HB8 karışımlarında Agregat/Çimento (A/Ç) oranları 1,96 –4,00 ve HB9 – HB12 karışımlarında Agregat/Çimento (A/Ç) oranları 1,74 –3,57 aralıklarında değişim göstermektedir. Bununla birlikte HAHB örneklerinin hazırlanmasında HB1 – HB4 karışımlarında Su/Çimento (S/Ç) oranları 0,24 – 0,30 aralığında, HB5 – HB8 karışımlarında Su/Çimento (S/Ç) oranları 0,28 – 0,34 aralığında ve HB9 – HB12 karışımlarında Su/Çimento (S/Ç) oranları ise 0,31 – 0,35 aralığında değişim göstermiştir.

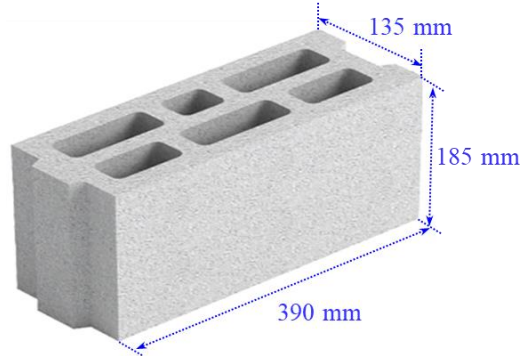
Çalışma kapsamında, üç farklı seri karışım tasarımı için vibrasyon-sıkıştırma özelliğinde olan, manuel kullanımda %45 yerleştirme oranına kadar presleme yükü uygulanabilen bir döküm makinesi kullanılarak 100x100x100 mm boyutlarında HAHB küp numuneler üretilmiştir (Şekil 4). Dökümü yapılan HAHB test numuneleri, dolum, vibrasyon ve yerleştirme işlemlerinin ardından presleme aşaması tamamlanır tamamlanmaz kalıptan çıkarılarak laboratuvar ortamındaki normal hava koşullarında 28 gün süreyle kür işlemine bırakılmıştır. Kuru karışım kıvamında hazırlanan bu küp numuneler, HAKB elemanlarının üretiminde kullanılacak hafif harcın fiziksel ve mekanik özelliklerini ön analizler ile tespit etmek için değerlendirilmiştir. Laboratuvar ortamında prizini almış tüm küp test örnekleri, herhangi bir kurutma ve/veya başlıklama vs. işlemine tabi tutulmaksızın birim hacim kütle değerleri ölçülmüş ve mekanik dayanım testleri yapılmıştır. Elde edilen bulgular, karışımlarda yer alan atık kâğıt ve genleşmiş perlit miktarları açısından kontrol örneklerinin değerleriyle karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.



Şekil 4. Analizlerde kullanılan HAHB tasarımının genel görünümü

Çalışma kapsamında ayrıca atık kâğıt kullanımının yüksek lifsel ve selülozik özellik sergilemesi ve genleşmiş perlit agregaların yüksek su emme kabiliyetlerinin olması düşüncesiyle HAHB test örneklerinin kuruma büzülmesi ve rutubet genleşmesi özelliklerindeki değişim önem kazanabilmektedir. Bu değişimin boyutlarını analiz edebilmek için, HAHB karışımları ayrı bir numune boyutu olarak 10x10x40 cm prizma formunda hazırlanmıştır. Kür işlemi tamamlanan bu boyuttaki HAHB numunelerinin kuruma büzülmesi (rötresi) ve rutubet genleşmesi özellikleri, ASTM C426 standardına uygun olarak test edilerek belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, ön analizlerde belirlenen karışım oranları kullanılarak, tam ölçekli, iki sıra boşluklu ve 6 gözlü boşluk geometrisinde bulunan kâğır blok formu için HAKB modeli üzerinde fiziksel ve mekanik analizler gerçekleştirilmesi planlanmıştır. HAHB test örneklerinin analizlerinden elde edilen bulgular bağlamında, atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların birlikte harmanlanarak kâğır blok üretiminde kullanılabilme potansiyelinin irdelenmesi amacıyla, taşıyıcı olmayan özellikte duvar dolgu blok elemanı olarak değerlendirilebilecek sektörel örgü duvar uygulamalarında kullanılabilen bir geometriye sahip kâğır blok formu için HAKB modeli üzerinde performans analizlerinin yapılması tasarlanarak, her bir seri için ayrı ayrı analizler yapılmıştır. Bu analizlerde HAKB prototip modeli 135 x 390 x 185 mm (genişlik x uzunluk x yükseklik) anma boyutlarında olup, geometrik olarak iki sıra boşluklu, 6 gözlü ve lamba zıvanalı (kenetlenmeli) formundadır. Bu tasarım, projelerde çoğunlukla iç bölme duvarların oluşturulmasında tercihen kullanılan bir blok formu olup, odalar arası yalıtım performansının geliştirilmesinde önem kazanmaktadır. Analizlerde kullanılan HAKB tasarımının genel görünümü sembolik olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Kâğır blok analizlerinde, TS EN 771-3 ve ilgili standartların belirlediği prensipler temel alınmıştır.



Şekil 5. Analizlerde kullanılan HAKB tasarımının sembolik genel görünümü

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışma kapsamında test edilen tüm HAHB küp numunelerinin su emme değerleri, rutubet genleşmesi, kuruma büzülmesi ve basınç dayanımı, her bir seri karışım tasarımı için sırasıyla Çizelge 3'te sunulmuştur. Ayrıca, HAHB karışım bileşimleri için tam ölçekli HAKB elemanlarının birim hacim kütlesi, kuru birim ağırlığı, ısıl iletkenlik değerleri ve basınç dayanımı her bir seri karışım tasarımı için sırasıyla Çizelge 4'te verilmiştir. Çizelgelerde verilen değerler, aşağıdaki alt bölümlerde detaylı karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Çizelge 3. HAHB karışımlarına ait test örneklerinin özellikleri

Kod	Agrega/ Çimento Oranı	Kütlece Su Emme Oranı	Basınç Dayanımı	Kuruma Büzülmes i	Rutubet Genleşmesi
	(A/Ç)	(%)	(MPa)	(%)	(%)
HB 1	5,11	23,20	2,76	0,049	0,053
HB 2	3,57	17,90	2,82	0,050	0,051
HB 3	2,87	14,70	3,22	0,058	0,048
HB 4	2,52	11,08	3,38	0,059	0,044
HB 5	4,00	37,00	1,64	0,042	0,057
HB 6	2,78	31,80	1,97	0,046	0,053
HB 7	2,23	31,42	2,08	0,053	0,051
HB 8	1,96	25,70	2,34	0,054	0,047
HB 9	3,57	42,00	1,43	0,034	0,063
HB 10	2,48	39,84	1,62	0,044	0,058
HB 11	1,99	38,40	1,71	0,050	0,055
HB 12	1,74	37,30	1,88	0,052	0,052

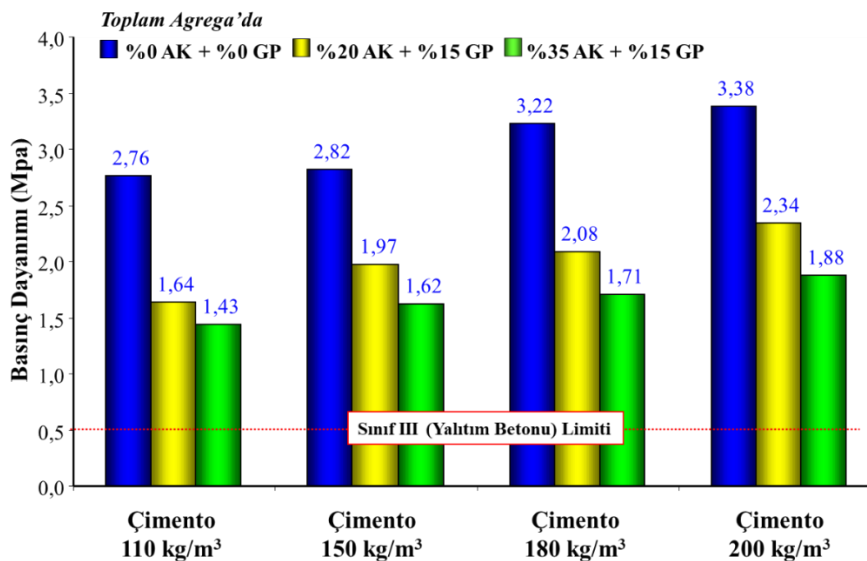
Çizelge 4. HAKB elemanlarına ait tasarımların özellikleri

Karışım	Agrega/ Çimento Oranı (A/C)	Birim Ağırlık (kg)	Brüt Birim Hacim Kütle (kg/m ³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Isıl İletkenlik Değeri (W/mK)
HB 1	5,11	5,68	583	1,77	0,203
HB 2	3,57	5,84	600	1,81	0,207
HB 3	2,87	5,96	612	2,06	0,210
HB 4	2,52	6,05	621	2,17	0,212
HB 5	4,00	4,75	488	1,05	0,176
HB 6	2,78	4,95	508	1,26	0,180
HB 7	2,23	5,11	525	1,33	0,183
HB 8	1,96	5,21	536	1,50	0,186
HB 9	3,57	4,39	451	0,92	0,147
HB 10	2,48	4,61	473	1,04	0,156
HB 11	1,99	4,78	491	1,10	0,161
HB 12	1,74	4,89	502	1,21	0,163

3.1. Küp Örneklerinin Analizi

3.1.1. Basınç Dayanımı ve Yoğunluk

Hafif beton tasarımlarında çimento dozajı arttıkça sertleşmiş beton örneklerinin artan yoğunluk değerlerine bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin de artış eğilimi göstermesi olağan bir beklentidir. HAHB küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri Şekil 6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Çalışmada kontrol örnekleri amacıyla atık kâğıt ve genleşmiş perlit kullanılmadan tasarlanan HAHB küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri 2,76 MPa - 3,38 MPa aralığında belirlenmiştir. Bu değişim çimento dozajına bağlı olarak gelişim göstermekte olup, 110 doz çimentodan 200 doz çimentoya artırıldığında HAHB küp örneklerindeki dayanım artışı yaklaşık %22,5'tir. Literatür ile yapılan çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, yalnızca pomza agrega kullanılarak burada elde edilen değerler, benzer agrega yoğunluklarına sahip farklı pomza agregalarla yapılan hafif beton küp örneklerinin değerleriyle örtüştüğü de görülmektedir [26].

**Şekil 6.** HAHB küp örneklerinin çimento dozajına bağlı basınç dayanım değerleri

Hafif beton bileşiminde atık kâğıdın agrega olarak kullanımı, kâğıt malzemenin selülozik yapısı ve ayrıca lifsel bir form göstermesi sebebiyle beton dayanımının düşmesini etkileyen bir faktör olarak görülebilmektedir. Literatürde de atık kâğıt kullanımının %10-15 oranından fazla kullanımının basınç dayanımlarında düşüşe sebebiyet verdiği gözlemlenmektedir [15,27]. Ayrıca, bu çalışmada, genleşmiş agrega malzemenin de tane mukavemetin pomza agregaya kıyasla daha düşük düzeyde olması da basınç dayanımını düşürücü bir etki sergileyeceği kaçınılmaz olmaktadır. Çalışma kapsamında karışım tasarımında toplam agreganın ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu HB4 – HB8 karışımlarında, basınç dayanım değerleri çimento dozajına bağlı olarak 1,64 MPa – 2,34 MPa aralığında değişim göstermiştir. Artan çimento dozajı, küp örneklerin basınç dayanımını da artırmış olup, daha kompakt bir form kazanmasına olanak sağlamıştır. Ancak, eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine göre daha düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Örneğin; 110 kg/m³ dozajlı HB1 ve HB5 kodlu örneklerin basınç dayanımları arasındaki değişim %40,6'dır. Benzer şekilde 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki dayanım düşüşü sırasıyla HB2 ve HB6 için %30,1, HB3 ve HB7 için %35,4 ve HB4 ve HB8 için ise %30,8'dir.

II. seri karışım tasarımında genleşmiş perlit miktarı sabit tutularak atık kâğıt miktarı %15 artışla ağırlıkça %35 oranında kullanılmıştır. Diğer bir değişle, bu serideki örneklerde atık kâğıt kullanımının daha yüksek oranda olma koşulu irdelenmiştir. Bu serideki test örneklerinde de beklenildiği gibi atık kâğıt oranının artışı belirgin bir düzede basınç dayanım düşüşüne sebep olmuştur. HB9 – HB12 karışımlarında, basınç dayanım değerleri çimento dozajına bağlı olarak 1,43 MPa – 1,88 MPa aralığında değişim göstermiştir. Eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine ve %20 atık kâğıt kullanımlı II. seri örneklerine göre daha da düşük dayanım değerleri elde edilmiştir. Örneğin 110 kg/m³ dozajlı HB1 ve HB9 kodlu örneklerin basınç dayanımları arasındaki değişim %48,2'dir. Benzer şekilde 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki dayanım düşüşü sırasıyla HB2 ve HB10 için %42,6, HB3 ve HB11 için %46,9 ve HB4 ve HB12 için ise %44,4'tür. Bununla birlikte karışımlarda %15'lik atık kâğıt miktarı artışı %7,6 – %13,6 oranında HAHB dayanımlarının azalmasına sebep olmuştur. Basınç dayanım değerlerinin iyileşmesine etken olan karışım tasarım parametreleri arasında karışımın A/Ç oranının önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Çalışma boyunca elde edilen tüm küp örneklerde, A/Ç oranı azaldıkça, HAHB test numunelerinin basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesi arzu edilen kâğıt HAKB elemanlarının üretiminde, A/Ç oranının düşük olması ve homojen agrega tane boyutu dağılımına sahip harmanlanmış hibrit agrega karışımının kullanılması önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

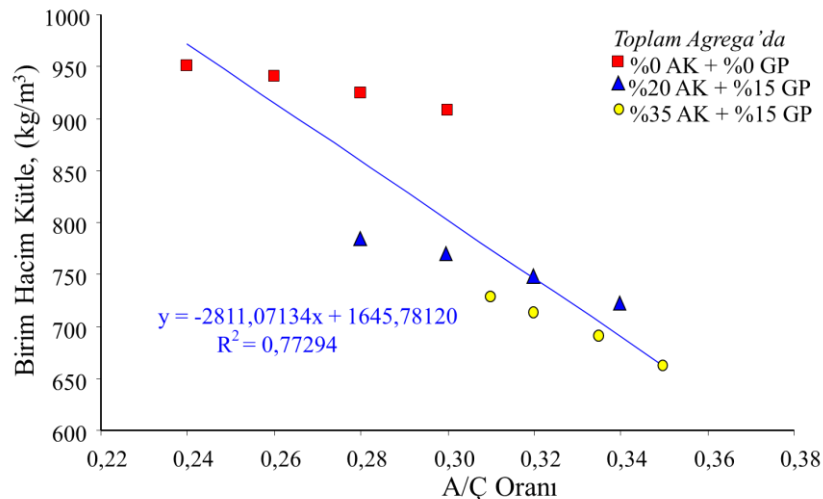
Taşıyıcı olmayan duvar birimlerinde kullanılacak kâğıt elemanlarda yüksek mukavemet değerleri aranmamaktadır. Bu ürünler genellikle yapısal olmayan ve ağırlıklı olarak yalıtım özellikli ve/veya bina yalıtımına katkı sağlamak amacıyla kullanılan kâğıt elemanlar olarak nitelendirilebilmektedir. Bununla ilgili olarak literatürde özellikle RILEM [26,28] tarafından öngörülen hafif beton gereksinimleri ve öngörülen parametrik ölçütleri referans değerler olarak kabul edilebilmektedir. Hafif agregalı betonların dayanım değerleri baz alındığında, RILEM [28] tarafından üç farklı sınıf belirlenmiştir: Sınıf I “Yapısal betonlar”, Sınıf II “Yapısal ve Yalıtım amaçlı betonlar” ve Sınıf III “Dolgu ve amaçlı yalıtım betonları”. Bu gruplar içinde yapısal betonlar, genellikle taşıyıcı görev üstlenen 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 edilmektedir [26,28]. Kabul edilen teknik değer limitleri ise Çizelge 6'da sunulmuştur.

Çizelge 5. Hafif agregalı beton gereksinimleri [28]

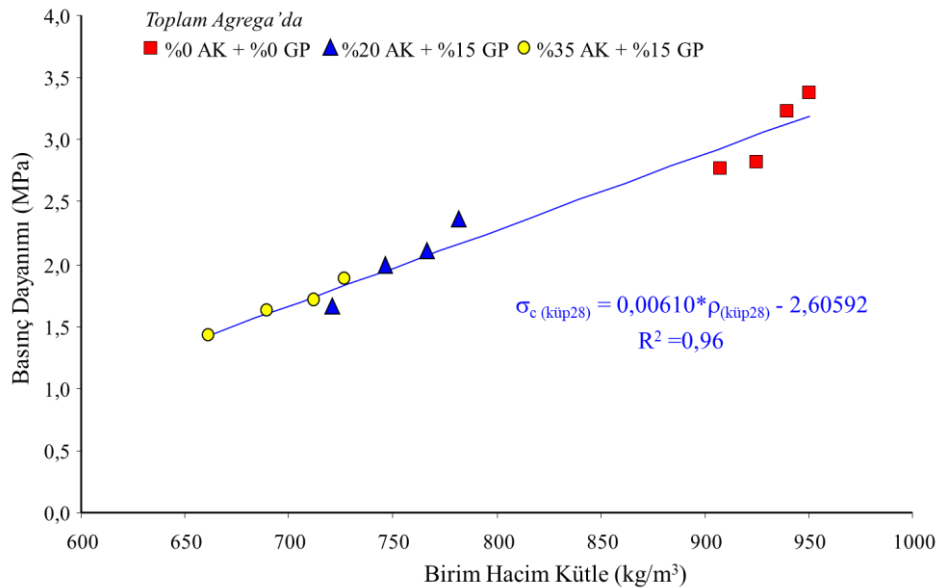
Sınıf	I	II	III
Hafif betonun amacı	Yapısal	Yapısal ve Yalıtım	Yalıtım
Basınç Dayanımı (MPa)	> 15.0	> 3.5	> 0.5
Etüv kuru yoğunluk (kg/m ³)	< 2000	tanımlanmamış	tanımlanmamış
Isıl iletkenlik (W/mK)	-	< 0.75	< 0.30

Çalışma kapsamında, HAHB test örneklerinden Sınıf I “yapısal beton” veya Sınıf II “yapısal ve yalıtım amaçlı beton” mukavemet değerlerini karşılayan olmamıştır. Ancak, tüm HAHB test örnekleri, Sınıf III “dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar” için belirlenen mukavemet sınırlarını rahatlıkla karşılamaktadır. Diğer bir deyişle, %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin ve ayrıca %35 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. ve III. seri karışımların dayanım değerleri, RILEM değerlendirmelerine göre dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için minimum olarak belirlenen 0,5 MPa’lık dayanım değerini sağladığı görülmüştür. HAHB örneklerinde atık kâğıt ve genleşmiş perlitin bir arada harmanlanarak agrega malzeme olarak kullanımı, her ne kadar dayanım azalmasına sebep olsa da yalıtım amaçlı kullanılabilecek hafif beton limitlerini sağlamakta ve bu karışım tasarımına sahip beton tasarıyla kâğıt blok üretiminin mümkün olabileceği öngörülebilmektedir.

Hafif beton uygulamalarında basınç dayanımına etki eden bir diğer faktör ise betonun birim hacim kütlelerinin değişimidir. Beton yoğunluğu düştükçe dayanım değerinin düştüğü de çoğu araştırmalarda belirgin bir özelliktir. Bu bağlamda hafif betonun birim hacim kütlesi, beton tasarımındaki A/Ç oranının bir fonksiyonu olarak da görülebilmektedir. Çalışma kapsamından elde edilen hafif beton örneklerinin priz almış birim hacim kütlesi, atık kâğıt ve genleşmiş perlit kullanılmayan (HB1-HB4) karışımlarda 908 – 951 kg/m³ aralığında değişim göstermiştir. Çimento dozajı arttıkça betonun yoğunluğunun da arttığı belirlenmiştir. Karışımdaki agreganın %20’si atık kâğıt+%15’i genleşmiş perlit olan 2. seri karışımlarda (HB5-HB8) hafif beton örneklerinin priz almış birim hacim kütlesi 721 – 782 kg/m³ aralığında değişim göstermiş olup, çimento dozajı arttıkça betonun yoğunluğunun da arttığı belirlenmiştir. Karışımdaki agreganın %35’i atık kâğıt+%15’i genleşmiş perlit olan 3. seri karışımlarda (HB9-HB12) hafif beton örneklerinin priz almış birim hacim kütlesi ise 661 – 727 kg/m³ aralığında değişim göstermiştir. Karışım tasarımında atık kâğıt kullanım oranı arttıkça, beton yoğunluğunun azaldığı, ancak çimento kullanımı artışının yoğunluğu artırıcı faktör olduğu belirlenmiştir. Genel eğilim A/Ç oranı arttıkça, beton yoğunluğu da azalmakta ve daha hafif bir beton elde edilmektedir. Gözenekli agrega kullanılan beton karışımlarında bu olgu sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Çalışma kapsamında oluşturulan tüm karışım tasarımlarına ait A/Ç oran değişimine karşın elde edilen HAHB yoğunlukları grafiksel analizle Şekil 7’de verilmiştir.

**Şekil 7.** HAHB tasarımlarının A/Ç oranı - birim hacim kütle ilişkisi

Şekil 7 irdelendiğinde görüldüğü üzere, A/Ç oranı arttıkça (daha fazla gözenekli agregaya kullanıldıkça) hafif betonun birim hacim ağırlığı azalmaktadır. Diğer bir değişle daha hafif yoğunlukta bir beton tasarımı elde edilmektedir. Bu da taşıyıcı olmayan kâgir duvar birimlerin üretilmesinde hafif yapı elemanı elde edilmesine olanak sağlamasının yanı sıra bu elemanlarla örülecek duvarların bina ölü yükünü azaltmada önemli bir rol oynayacağı kaçınılmaz olacaktır. Bununla beraber, inşaat projesinin içinde bulunduğu lokasyonda öngörülen sınır ısı yalıtım performans gereklerinin daha kolay sağlanabilmesine de önemli katkı sağlayacaktır. Literatürde hafif kâgir blok üretiminde kullanılmak üzere tasarlanan hafif betonların yoğunluklarının kullanılan agregaya ve karışım tasarımına göre 580-1110 kg/m³ aralığında değişebildiği gözlemlenmektedir [18-19,26]. Bu çalışma kapsamında tasarlanan II. ve III. seri karışımlarda atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların harmanlanarak kullanımı, kontrol betonunun birim ağırlık değerlerine göre önemli ölçüde düşüş eğilimi gösterdiği görülmektedir. Kontrol örneklerinde çimento dozajına bağlı olarak A/Ç oranı 0.30'dan - 0.24'e azalan bir değişim göstermekte olup, sertleşmiş beton örneklerinin yoğunluklarının ise bu değişimde 908 kg/m³'ten 951 kg/m³'e arttığı belirlenmiştir. Benzer eğilim II. ve III. seri karışımlarda görülmüş olup, HB5 - HB8 karışımlarında A/Ç oranı 0,34'ten - 0,28'e azalan bir değişim göstermekte olup, HAHB yoğunluklarının ise bu değişimde 721 kg/m³'ten 782 kg/m³'e arttığı; HB9 - HB12 karışımlarında A/Ç oranı 0,35'ten - 0,31'e azalan bir değişim göstermekte olup, HAHB yoğunluklarının ise bu değişimde 661 kg/m³'ten 727 kg/m³'e arttığı belirlenmiştir. A/Ç oran artışına bağlı HAHB yoğunluklarının düşmesi, yukarıda da değinildiği gibi HAHB dayanım değerlerini de düşürmektedir. Bu olgu çalışma kapsamındaki tüm örnek verileri bağlamında Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. HAHB örnekleri birim hacim kütle - basınç dayanımı ilişkisi

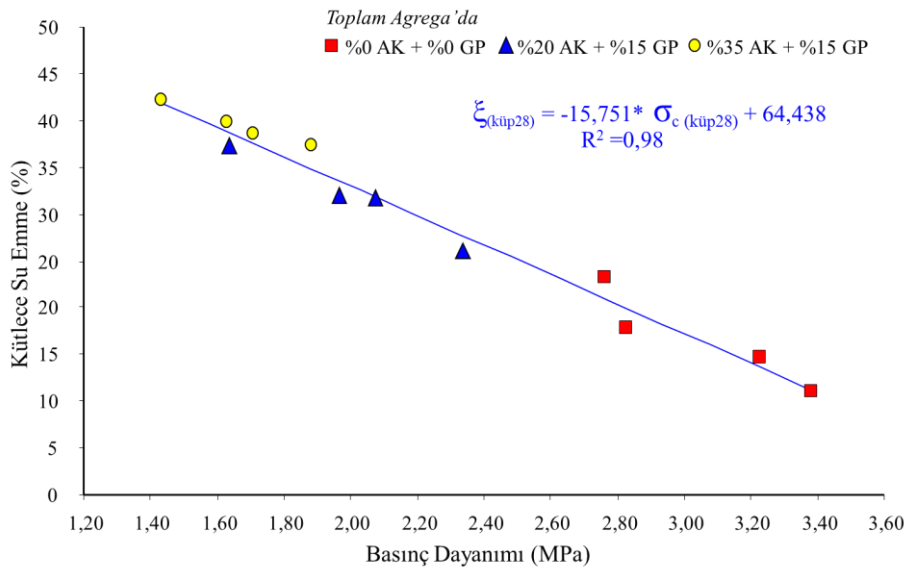
HAHB örneklerinin birim hacim kütlelerine bağlı basınç dayanımı değişimi arasında lineer kabul edilebilecek bir istatistiksel ilişki olduğu görülmektedir.

Toplam agreganın ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu HB4 - HB8 karışımlarında, HAHB yoğunlukları çimento dozajına bağlı olarak 721 - 782 kg/m³ aralığında değişim göstermiştir. Artan çimento dozajı, HAHB yoğunluklarını artırmıştır. Eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine göre daha düşük yoğunluk değerleri elde edilmiştir. Örneğin; 110 kg/m³ dozajlı HB1 ve HB5 kodlu örneklerin yoğunlukları arasındaki değişim %20,6'dır. Benzer şekilde 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki yoğunluk düşüşü sırasıyla HB2 ve HB6 için %19,3, HB3 ve HB7 için %18,3 ve HB4 ve HB8 için ise %17,7'dir. Diğer taraftan, %35 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu HB9 - HB12 karışımlarında, HAHB yoğunlukları çimento dozajına bağlı olarak 661 - 727 kg/m³ aralığında değişim

göstermiştir. Artan çimento dozajı, benzer şekilde HAHB yoğunluklarını artırmıştır. Eşdeğer çimento dozajında hazırlanmış kontrol örneklerine göre daha düşük yoğunluk değerlerindeki değişim; 110 kg/m³ dozajlı HB1 ve HB9 kodlu örneklerin yoğunlukları arasındaki değişim %27,2'dir. 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerindeki yoğunluk düşüşü sırasıyla HB2 - HB10 için %25,4, HB3 - HB11 için %24,2 ve HB4 - HB12 için ise %23,5'tir.

3.1.2. Su Emme

Selülozik karakterli atık kâğıt malzemeler genellikle selülozik yapıları sebebiyle su tutucu malzemeler olarak bilinmektedir. Özellikle lifsel dokuya sahip materyallerin, kullanım yerlerinde suya maruz kalmaları durumunda lif uzanımları ve boylarınca betonun matris yapısında suyun ilerleme yolunun oluşumuna katkı sağladığı görülmektedir. Bu nedenle, yüksek selüloz içeren karışım tasarımlarının su tutucu özellikler sergileyeceği ve yüksek su emme değerleri gösterebileceği düşünülür. Ayrıca, genleşmiş perlit agregalar, maruz kaldıkları ısı işlem sonrası yüksek gözeneklilikleri sebebiyle yüksek su emeci agregalar olarak da bilinmektedir. Bu bağlamda, atık kâğıt ve genleşmiş perlit agregaların harmanlanarak birlikte HAHB karışımlarında ana agrega olarak kullanımları, özel su itici katkıların kullanılmaması durumunda betonun su emme olgusunu artıracak kaçınılmaz olacaktır. Literatür çalışmalarında da belirtildiği üzere, su emme kapasitesinin yüksek olması, hafif betonların dayanımını ve ısı iletkenliğini olumsuz yönde etkileyebilir [26]. Bu çalışma kapsamında uygulanan bütün test sonuçları, karışımdaki A/Ç oranının artması, HAHB örneklerinin kütlece su emme oranlarını da arttırdığını göstermektedir (Çizelge 4). Bunun yanı sıra, çimento dozajı arttıkça, betonun su emme kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece, HAHB örneklerinin dayanımı ile su emme kapasiteleri arasında bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. HAHB örneklerinin dayanım - kütlece su emme değişimi Şekil 9'da ilişkilendirilmiştir.



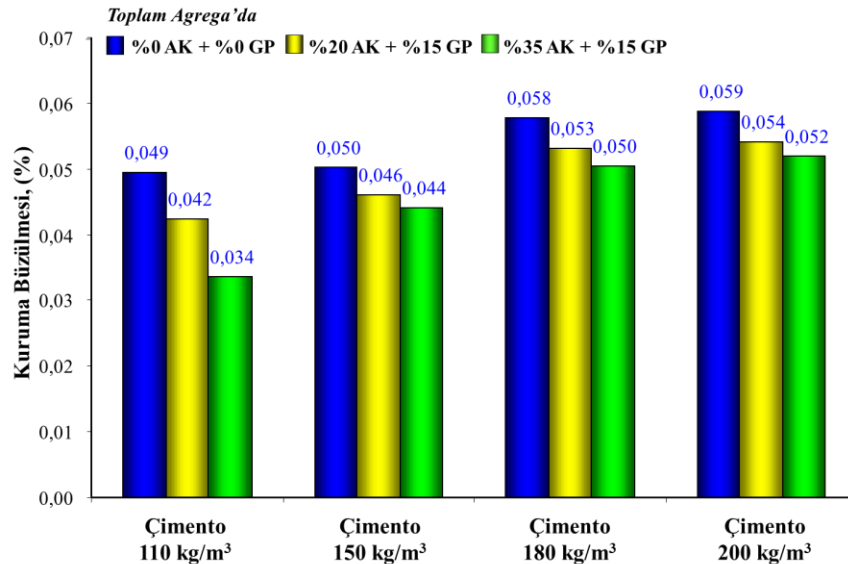
Şekil 9. HAHB örnekleri basınç dayanımı - kütlece su emme oranı ilişkisi

Kontrol örneklerinin kütlece su emme değerleri %11,1 - %23,2 aralığındadır. Çimento dozajı arttıkça, su emme değeri düşmektedir. HAHB örneklerinin matris yapısı daha su geçirimsiz bir form kazanmaktadır. Atık kâğıt ve genleşmiş perlit agrega varlığı, karışım tasarımlarına dahil olduğunda, matris yapının su emme değerlerinde belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Özellikle, ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. seri karışım tasarımlarında 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB5) örneklerinin su emme değeri %37 iken, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı (HB6, HB7 ve HB8) test örneklerinin su emme değerleri sırasıyla %31,8, %31,3 ve %25,7 olarak ölçülmüştür. Buradan görüldüğü üzere, artan çimento dozajı matris yapının su emme kabiliyetini düşürmekte ve ayrıca yukarıda da değinildiği üzere dayanımını da artırmaktadır. Benzer olgu, III. seri karışımda da belirlenmiş

olup, artan atık kâğıt kullanım miktarı, matris yapının su emme değerini de artırmıştır. Karışım tasarımı değişken bir parametre olarak atık kâğıt kullanım miktarının değişimini irdelemek amacıyla, eşdeğer çimento dozajlardaki su emme değerleri dikkate alınacak olur ise; HB5 - HB9 örneklerinde %15'lik atık kâğıt miktarı artışı beton örneğinin su emme değerinin (%5 artışla) %37'den %42'ye çıkmasına sebep olmuştur. HB6 - HB10 örneklerinde %15'lik atık kâğıt miktarı artışı beton örneğinin su emme değerinin (%8 artışla) %31,8'den %39,8'e çıkmasına sebep olmuştur. Benzer şekilde HB8 - HB12 örneklerinde ise (%11,6 artışla) %25,7'den %37,3'e yükselmiştir. Bu çalışmada bariz görülen bir durum, çimento dozajı artmasına rağmen atık kâğıt miktarındaki sabit artış oranı, kütlece su emme oranının beklenilenden daha yüksek değerde artmasına neden olduğudur. Literatürde hafif böklerin üretiminde kullanılması amaçlanan hafif betonların su emme miktarları %20 ile %40 aralığında değer alabilmektedir [18-19,26].

3.1.3. Kuruma Büzülmesi ve Rutubet Genleşmesi

Kuruma büzülmesi, sertleşmiş betondan çevreye nem kaybının bir sonucudur. Kurutma büzülmesi, dış nem iç nemden düşük olduğunda suyun içten buharlaşması sonucu çimento esaslı malzemelerde oluşan hacim azalması olarak da tanımlanmaktadır [29]. Betondaki ince gözeneklerin yapısı içinde oluşan kılcal gerilimin gelişmesiyle sonuçlanan kılcal nem kaybı nedeniyle, sertleşmiş betonun hacminin azalması veya büzülmesidir [21-23,30-31]. Beton ilk yaşlarda suyunu daha hızlı kaybeder. Buharlaşma hızını etkileyen faktörler devam ettikçe toplam su kaybı zamanla artar ve buna bağlı olarak da büzülme miktarında artış görülebilmektedir. Kuru karışım kıvamında hafif betondan mamul kâğıt yapı elemanlarında, karışım tasarımlarında karma suyu oranı genellikle düşük değerlerde olduğu için, bünyesinde su tutmayan beton birimlerinde kuruma büzülmesi oranları genellikle düşü düzeylerde görülebilmektedir. Ancak, bünyesinde su tutan ve/veya tuttuğu suyu bünyesinden uzun sürede atabilen beton birimlerinde kuruma büzülmesi değerleri daha yüksek değerlerde görülebilmektedir. Çalışma kapsamında hazırlanan tüm karışımlara ait örneklerin kuruma büzülme değerleri belirlenmiş olup, çimento dozajındaki değişimlere göre parametrik bulgular Şekil 10'da grafiksel olarak gösterilmiştir.

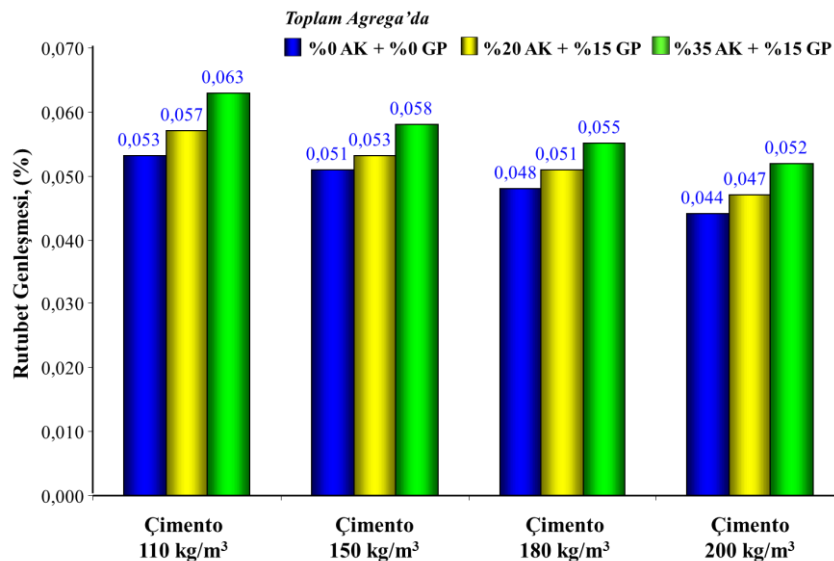


Şekil 10. HAHB örnekleri için çimento dozajına bağlı kuruma büzülmesi değişimi

Çalışmada elde edilen bulgularda, çimento dozajı arttıkça tüm serilerde 28 gün kür sonrası kuruma büzülmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Kontrol amaçlı hazırlanan BH1-BH4 karışımlarında kuruma büzülmesi %0,049 - %0,059 aralığında artarak değişmektedir. Literatür çalışmalarına göre, betonun yoğunluk değeri arttıkça kuruma büzülmesinin arttığını göstermektedir [26]. BS 6073 standardı Bölüm 1'de, duvar elemanları için, kuruma büzülmesinin ortalama %0,06 veya daha az olması gerektiği belirtilmektedir. Bu değerlendirme referans olarak kabul edilecek olur ise, çalışmada elde edilen tüm

serilerin kuruma büzülmesi değerleri, bu referans sınır değer kapsamında kalmaktadır. Bununla birlikte, ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. seri karışım tasarımlarında 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB5) örneklerinin kuruma büzülmesi değeri %0,042 iken, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı (HB6, HB7 ve HB8) test örneklerinin kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla %0,046, %0,053 ve %0,054 olarak ölçülmüştür. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit agrega ilavesi, HAHB beton örneklerinin kuruma büzülmesi değerlerini %0,005 - %0,007'lik bir farkla azalmasına sebep olmuştur. Bunda etken olan husus, atık kâğıt ve genleşmiş perlitin su tutma özellikleri sebebiyle HAHB matris yapısındaki ince gözeneklerin içinde saklı kalan nem kaybının düşük oluşu, sertleşmiş betonun hacminin daha düşük düzeylerde azalmasına ve dolayısıyla daha az büzülmesine olanak sağladığı şekliyle yorumlanmıştır. Benzer olgu, atık kâğıt kullanım oranının artırıldığı III. seri HAHB beton örneklerinde biraz daha belirginleştiği gözlenmiştir. Bu serideki örneklerde; 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB9) örneklerinin kuruma büzülmesi değeri %0,034 iken, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı (HB10, HB11 ve HB12) test örneklerinin kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla %0,044, %0,050 ve %0,052 olarak ölçülmüştür. Bu bağlamda, %350 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit agrega ilavesi, HAHB beton örneklerinin kuruma büzülmesi değerlerini kontrol örneklerinininkine göre %0,007 - %0,016'lık bir farkla azalmasına sebep olmuştur.

Sertleşmiş beton nemli bir ortama veya suya maruz kaldığında nemi emer ve genleşme özelliği gösterir. Ortamdaki nemin artmasıyla oluşan hacim genleşme deformasyonuna rutubet genleşmesi veya ıslak genleşme deformasyonu denilmektedir. [30-31]. Betonun gözeneklerine su sızmasıyla betonun nem içeriği arttığında ıslak genleşme deformasyonu gösterir. Islak genleşme deformasyonunun çimento koloidinin nemi emmesi nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir. Su molekülleri çimento koloidine nüfuz ettiğinde, jel parçacıklarının yüzey gerilimi su moleküllerinin nüfuz etmesiyle azalır ve jel parçacıklarının kohezyonu su molekülleri tarafından aşılır. Bunun sonucunda da beton genleşme olgusu gösterir [32-33]. Bina inşaat projelerinde ara bölme duvarlar, pozisyonları itibarıyla suya ve neme maruz kalma olasılığı en düşük birimler olarak değerlendirilebilmektedir. Ayrıca, duvar birimlerin örüm işlemi sonrası yüzeylerinin sıva ve/veya bir kaplama malzemesi ile kaplanması sonucu, olası nem varlıklarına karşı daha korunaklı birimler şekline gelmektedir. Bu nedenle, özellikle iç bölme duvar birimlerinde kâğıt elemanların rutubet genleşme olguları çoğu projede önemsenmeyebilmektedir. Ancak, çalışma kapsamında tasarlanan karışımlarda yüksek su emici ve su tutucu bileşenlerin yer alması sebebiyle, hazırlanan tüm karışım serilerinin rutubet genleşme değerleri analiz edilmesi ve atık kâğıt - genleşmiş perlit agrega kullanımının beton matrisinde olası rutubet genleşme olgusuna ne denli etkiyen bir rol oynadığı irdelenmeye çalışılmıştır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında çimento dozajındaki değişimlere göre parametrik bulgular Şekil 11'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

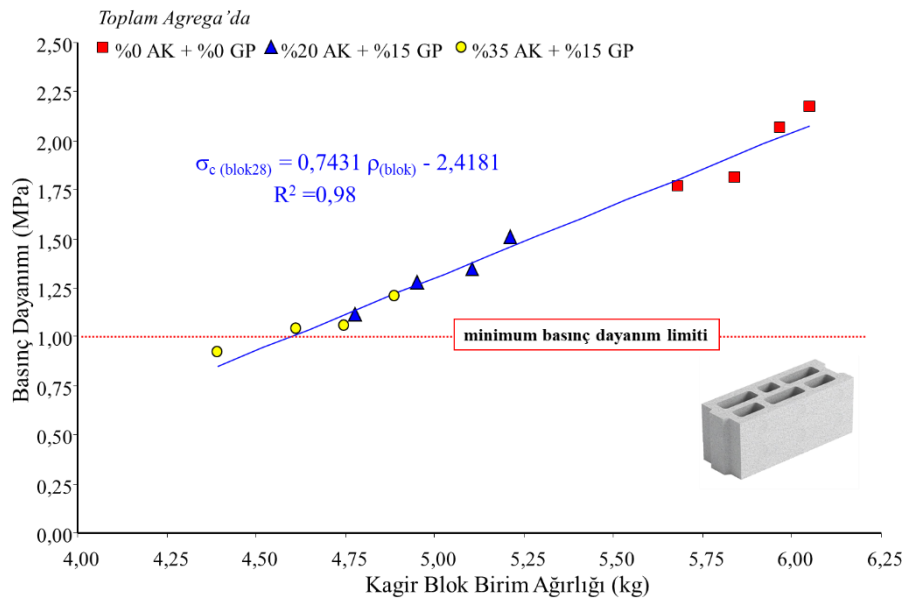


Şekil 11. HAHB örnekleri için çimento dozajına bağlı rutubet genleşmesi değişimi

3.2. Kâğır Blok Analizi

3.2.1. Basınç Dayanımı ve Birim Ağırlık

Hafif agregalı çimento esaslı betondan mamul kâğır duvar bloğu elemanlarının üretim ve teknik özelliklerinin irdelenmesi TS EN 771-3 standardında öngörülen parametrelere göre yapılabilmektedir. Birebir boyutta tasarlanan kâğır blok elemanın bu standarda göre irdelenmesinde, birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri için herhangi bir limit değer öngörülmemiş olup, kâğır blok üreticinin beyanlarının esas alınması vurgulanmıştır. Ancak, her ne kadar bu özellikler için standartta limit değerler tanımlanmamış olsa da pratik uygulamalarda blok elemanları arasında mukayesenin yapılabilmesi amacıyla birim ağırlık ve basınç dayanım değerleri önem arz etmektedir. Birim ağırlığı düşük olan blok elemanları gerek duvar ölü yükünü azaltma yönünde, gerekse ısı yalıtım performansı açısından daha yalıtımlı bir karakteristik sergilemesi bakımından önemlidir. Bununla birlikte, basınç dayanım değerinin yüksek olması, blok elemanın gerek nakliye ve gerekse şantiye içerisinde taşınması süreçlerinde daha az zayıt oluşturmaya bağlamında da önemli olmaktadır. Özellikle taşıyıcı olmayan duvarlarda dolgu ve ısı yalıtım amacıyla uygulanacak kâğır blok elemanlarının duvar örgüsünde örgü harcı tabakalarında bağ kuvvetini artırıcı özel tasarım aksesuarların donatı amaçlı kullanımı koşuluyla, saha tecrübelerinde elde edilen bulgular ışığında basınç dayanım değerinin ≥ 1.00 MPa olması öngörülebilmektedir. Çalışma kapsamında tüm karışım serilerine ait HAHB karışımlarını temsilen HAKB tasarımlarının kâğır blok birim ağırlığı ve blok elemanların basınç dayanım değerleri arasındaki ilişki Şekil 12’de verilmiştir.



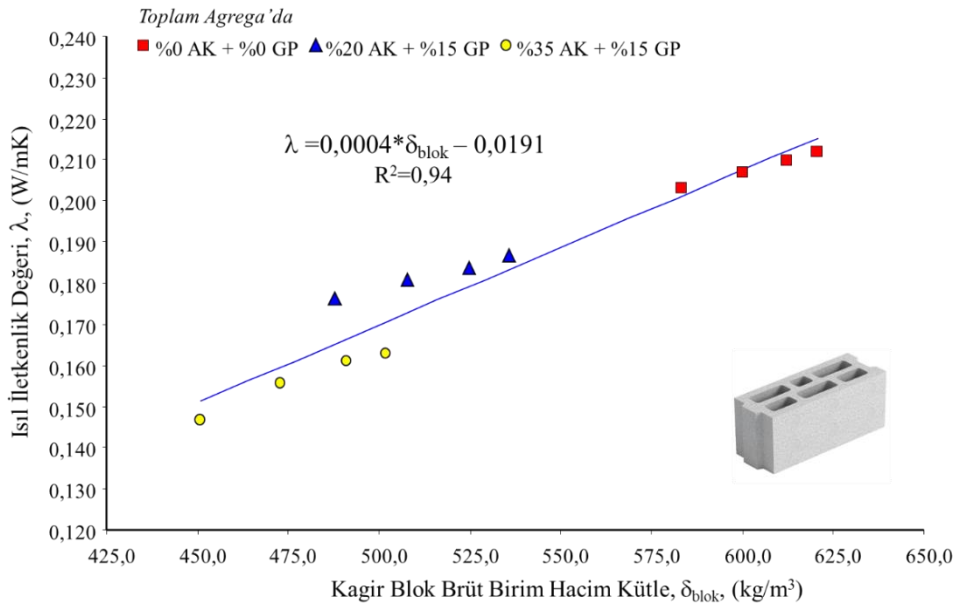
Şekil 12. HAKB tasarımlarının blok birim ağırlığı – basınç dayanım ilişkisi

Kâğır blok birim ağırlığı harç tasarımındaki kullanılan çimento dozajına bağlı olarak değişim göstermektedir. Çimento dozajı arttıkça bloğun kuru birim ağırlığı da artmaktadır. Kontrol HAHB tasarımlarındaki HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların birim ağırlıkları 5,68 kg – 6,05 kg arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların birim ağırlıkları ise 4,75 kg – 5,21 kg arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kâğır bloğun birim ağırlıklarında 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %16,4, %15,2, %14,4 ve %13,8’lik hafiflemesine olanak sağlamıştır. Benzer olgu %35 atık kâğıt kullanımlı III. seri karışım tasarımlarında da belirlenmiş olup, 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok birim ağırlıkları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %22,7, %21, %19,9 ve %19,2 oranlarında hafiflemesine olanak sağlamıştır. Blok elemanın birim ağırlığındaki bu hafifleme olgusu aynı zamanda, bu blok elemanlarının ısı yalıtım performanslarının da daha iyileşeceğinin bir göstergesi olabilmektedir.

HAKB elemanların her üç ayrı seri karışım tasarımları için basınç dayanım değerleri irdelendiğinde, blok birim ağırlığı artışına bağlı olarak dayanım değerlerinin de arttığı görülmektedir. Kontrol HAHB tasarımlarındaki HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları 1,77 – 2,17 MPa arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları ise 1,05 – 1,50 MPa arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kâğır bloğun basınç dayanımları 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında kontrol blok tasarımlarının değerlerine kıyasla sırasıyla %40,6, %30,1, %35,4 ve %30,8 oranlarında azalmıştır. Benzer olgu %35 atık kâğıt kullanımlı III. seri karışım tasarımlarında da belirlenmiş olup, 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok dayanımları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %48,2, %42,6, %46,9 ve %44,4 oranlarında azalmıştır. Çalışma kapsamında HB9 karışımı hariç, diğer tüm karışım tasarımlarıyla elde edilen HAKB elemanların basınç dayanımları ≥ 1.00 MPa değerinden daha büyüktür. Bu bağlamda, bu blok elemanlarının taşıyıcı olmayan duvarlarda dolgu ve ısı yalıtım amacıyla uygulanacak kâğır blok elemanları için öngörülebilir mukavemet gereksinimini karşılamaktadır (Şekil 12).

3.2.2. Isıl İletkenlik

Birim ağırlığı düşük ve gözenekli agregalarla imal edilmiş boşluklu geometrik tasarımlara sahip kâğır blok elemanları, taşıyıcı olmayan dolgu duvarlarda bina ısı yalıtım performansına yardımcına olan önemli yapı bileşenleri olarak görülmektedir [26,34-37]. Bir kâğır duvarın ısı geçişine karşı göstermiş olduğu direncin yüksek olması için, duvarı oluşturan kâğır blok elemanının ısı iletkenlik değerinin küçük oluşuna bağlıdır. Diğer bir değişle, kâğır elemanın ısı iletkenlik değeri ne kadar küçük ise o ölçüde ısı yalıtım performansı yüksek olacaktır. HAKB elemanlarının ısı iletkenlik değerleri, laboratuvar koşullarında oluşturulmuş korumalı sıcak kutu düzeneği yöntemiyle belirlenmiştir. Çalışma kapsamında tüm karışım serilerine ait HAHB karışımlarını temsilen HAKB tasarımlarının kâğır blokların brüt birim kütle değeri - blok elemanların ısı iletkenlik değeri arasındaki ilişki Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 13. HAKB tasarımlarının blok brüt birim hacim kütle – ısı iletkenlik değeri ilişkisi

Kâğır bloğun brüt birim hacim kütle değeri düştükçe, ısı iletkenlik değeri de düşmektedir. Karışım tasarımında çimento dozajının artışı, blok elemanın ısı iletkenlik değeri artırmaktadır. Kontrol HAHB tasarımlarındaki HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların 0,203 – 0,212 W/mK arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların ısı iletkenlik değeri de ise 0,176 – 0,186 W/mK arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %20 atık kâğıt ve

%15 genleşmiş perlit kullanımının kâgir bloğun ısı iletkenlik değerinde 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %13,5, %12,8, %12,7 ve %12,2 oranlarında artış sağlamıştır.

Çalışma kapsamında dikkat çekici bir bulgu, karışım kombinasyonunda atık kâğıt miktarı arttıkça, ısı iletkenlik değerlerinin düşme eğilimi göstermesidir. Örneğin ağırlıkça %20 oranında atık kâğıt ve %15 oranında genleşmiş perlitin harmanlanarak kullanılmış olduğu II. seri karışım tasarımlarında 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB5) örneğin ısı iletkenlik değeri 0,176 W/mK iken, eşdeğer dozajdaki %35 oranında atık kâğıt kullanımlı HB9 örneğin ısı iletkenlik değeri 0,147 W/mK olarak belirlenmiştir. Bu olgu, eşdeğer oranda çimento kullanımlı kontrol blok örneğine göre %25 ve %35 atık kâğıt kullanımlı karışımlar için sırasıyla %13,5 ve %27,8 oranında ısı iletkenlik değeri düşmüştür. Benzer olgunun 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı test örneklerinin değerlerinde de olduğu açıkça görülmektedir.

%35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB9 – HB12 karışımlarına ait HAKB elemanların ısı iletkenlik değeri ise 0,147 – 0,163 W/mK arasındadır. Bu değişim, eşdeğer çimento dozajında %35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kâgir bloğun ısı iletkenlik değerleri, kontrol blok örneklerine kıyasla 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %27,8, %24,8, %23,3 ve %23,2 oranlarında azalma sağlamıştır.

RILEM [28] dokümanında, yalıtım amaçlı kullanılacak olan kâgir blok elemanlarının ısı iletkenlik limiti $\lambda < 0,30$ W/mK olarak belirlenmiştir. Ayrıca literatürde, hafif agregalı betondan yapılmış kâgir blokların yoğunluğunun 1450 kg/m³'ten daha düşük olması gerektiği vurgulanmaktadır [25]. Her üç seri karışım tasarımıyla üretilen HAKB örneklerinin tamamı, RILEM'in belirlediği teknik sınırları karşılamakta ve bu elemanların taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında dolgu ve aynı zamanda yalıtım amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, atık kâğıt, pomza ve genleşmiş perlitin etkili ve kaliteli bir hafif kâgir blok elemanı üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Hafif beton karışımında atık kâğıdın betonun dayanımına etkisinin incelenmesi ve atık kâğıt içeren beton için karışım oranlarının değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre;

1. HAHB küp örneklerinin 28 gün kür sonrası basınç dayanım değerleri 2,76 MPa – 3,38 MPa aralığında belirlenmiştir. Atık kâğıt kullanımının artışı ile basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiş, HB9 – HB12 karışımlarında, basınç dayanım değerleri çimento dozajına bağlı olarak 1,43 MPa – 1,88 MPa aralığında değişim göstermiştir. Bununla birlikte, RILEM sınır değerlerine baz alındığında dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için minimum öngörülen 0,5 MPa'lık basınç dayanım değerlerinin bütün seriler için sağlandığı gözlemlenmiştir.
2. HAHB küp örnekleri üzerinde yapılan çalışmalardan elde edilen bir diğer bulgu ise A/Ç oranı arttıkça örneklerin yoğunluklarının ve buna bağlı olarak basınç dayanım değerlerinin düşüşüdür.
3. Kontrol örneklerinin kütlece su emme değerleri %11,1 - %23,2 aralığında tespit edilmiştir. HB8 – HB12 örneklerinde ise (%11,6 artışla) %25,7'den %37,3'e yükselmiştir. Bu çalışmada bariz görülen bir durum, çimento dozajı artmasına rağmen atık kâğıt miktarındaki sabit artış oranı, kütlece su emme oranının beklenilenden daha yüksek değerde artmasına neden olduğudur.
4. Çalışmada elde edilen bulgularda, çimento dozajı arttıkça tüm serilerde 28 gün kür sonrası kuruma büzülmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Kontrol amaçlı hazırlanan BH1-BH4 karışımlarında kuruma büzülmesi %0,049 - %0,059 aralığında artarak değişmektedir. Bununla birlikte, atık kâğıt ve genleşmiş perlitin su tutma özellikleri sebebiyle HAHB matris yapısındaki ince gözeneklerin içinde saklı kalan nem kaybının düşük oluşu, sertleşmiş betonun hacminin daha düşük düzeylerde azalmasına ve dolayısıyla daha az büzülmesine olanak sağladığı gözlemlenmiştir. 110 kg/m³ çimento dozajlı (HB9) örneklerinin kuruma büzülmesi değeri %0,034 iken, 150, 180 ve 200 kg/m³ dozajlı (HB10, HB11 ve HB12) test örneklerinin kuruma büzülmesi değerleri sırasıyla %0,044, %0,050 ve %0,052 olarak ölçülmüştür.

5. Bu çalışmada üretilen HAKB elemanların birim ağırlıkları 5,68 kg – 6,05 kg arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların birim ağırlıkları ise 4,75 kg – 5,21 kg arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımının kâğıt bloğun birim ağırlıklarında 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında sırasıyla %16,4, %15,2, %14,4 ve %13,8’lik hafiflemesine, III. seri karışım tasarımlarında da 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok birim ağırlıkları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %22,7, %21, %19,9 ve %19,2 oranlarında hafiflemesine olanak sağlamıştır.
6. HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları 1,77 – 2,17 MPa arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların basınç dayanımları ise 1,05 – 1,50 MPa arasındadır. III. seri karışım tasarımlarında da 110, 150, 180 ve 200 doz bağlayıcı kullanımlarında blok dayanımları sırasıyla kontrol bloğunun değerlerine göre %48,2, %42,6, %46,9 ve %44,4 oranlarında azalmıştır.
7. Çalışma kapsamında HB9 karışımı hariç, diğer tüm karışım tasarımlarıyla elde edilen HAKB elemanların basınç dayanımları ≥ 1.00 MPa değerinden daha büyüktür. Bu bağlamda, bu blok elemanlarının taşıyıcı olmayan duvarlarda dolgu ve ısı yalıtım amacıyla uygulanacak kâğıt blok elemanları için öngörülebilir mukavemet gereksinimini karşılamaktadır.
8. HB1-HB4 karışımlarına ait HAKB elemanların 0,203 – 0,212 W/mK arasındadır. %20 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB5 – HB8 karışımlarına ait HAKB elemanların ısı iletkenlik değeri de ise 0,176 – 0,186 W/mK arasındadır. %35 atık kâğıt ve %15 genleşmiş perlit kullanımlı HB9 – HB12 karışımlarına ait HAKB elemanların ısı iletkenlik değeri ise 0,147 – 0,163 W/mK arasındadır.

Çalışma sonuçlarına göre, kâğıt blok elemanlarının yalıtım amaçlı kullanımında öngörülen ısı iletkenlik limiti $\lambda < 0,30$ W/mK olarak belirlenmiştir. Ayrıca, hafif agregalı betondan yapılmış kâğıt blokların yoğunluğunun 1450 kg/m³’ten daha düşük olması gerektiği vurgulanmaktadır. RILEM değerlendirmelerine göre, dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için en düşük 0,5 MPa’lık basınç dayanım değeri de vurgulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında, her üç seri karışım tasarımıyla üretilen HAKB örneklerinin tamamı, öngörülen teknik limitleri karşılamakta olup, taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında dolgu ve aynı zamanda yalıtıma katkı sağlayan kâğıt blok elemanları olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Katkı Beyanı

Lütfullah GÜNDÜZ: Araştırma tasarımı, literatür taraması ve değerlendirilmesi, verilerin ve analizlerin doğrulanması, bulguların yorumlanması, makalenin yazılması.

Şevket Onur KALKAN: Veri toplama, veri analizi, verilerin ve analizlerin doğrulanması, makalenin yazılması.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile kişisel ve finansal çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedirler.

Kaynaklar

- [1] MdNaeem QM, Khan UA, Diliprao PO, Chandrakant SA, Augad VA. Effective Utilization of Waste Paper Into Bricks / Papercrete Wall Panels. IARJSET International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology 2021; 8(4): 2393-8021.
- [2] Al Shibani TMS, Patil SG, Edin AMNS. Study on Masonry Blocks Fabricated from Waste Paper and Industrial Waste Spent Catalyst. International Journal of Environmental Engineering– IJEE 2016; 3(3): 28-32.

- [3] Ekong SA, Oyegoke DA, Edema AA, Robert UW. Density And Water Absorption Coefficient of Sandcrete Blocks Produced With Waste Paper Ash As Partial Replacement of Cement. *Advances In Materials Science* 2022; 22(4): 85-97.
- [4] Mohammed BS. Papercrete as infill Material for Composite Wall System. *European Journal of Scientific Research* 2009; 34(4): 455-462.
- [5] Robert UW, Etuk SE, Agbasi OE, Okorie US, Lashin A. Hygrothermal properties of sandcrete blocks produced with raw and hydrothermally-treated sawdust as partial substitution materials for sand. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences* 2021. (In Press). <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.10.005>
- [6] Azar JP, Najarchi M, Sanaati B, Najafizadeh MM, Mirhosseini SM. The experimental assessment of the effect of paper waste ash and silica fume on improvement of concrete behavior. *KSCE Journal of Civil Engineering* 2019; 23: 4503 – 4515.
- [7] Robert UW, Etuk SE, Iboh UA, Umoren GP, Agbasi OE, Abdulrazzaq ZT. Thermal and mechanical properties of fabricated plaster of paris filled with groundnut seed coat and waste newspaper materials for structural application. *Építőanyag-Journal of Silicate Based and Composite Materials* 2020; 72(2): 72 – 78.
- [8] Ochoa de Alda JAG. Feasibility of Recycling Pulp and Paper Mill Sludge in the Paper and Board Industries. *Resources, Conservation and Recycling* 2008; 52(7): 965-972.
- [9] Delcassee MM, Rahul V, Abhilash C, Pavan MK. Papercrete Bricks - An Alternative Sustainable Building Material. *Int. Journal of Engineering Research and Application* 2017; 7(3): 9-14.
- [10] Manisha NG. Constructing structures using ecobricks. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research* 2016; 2(4): 159-164.
- [11] Matthew W. Developing a Low cost, Sustainable Housing Prototype using Recycled Waste Materials in Tijuana, Mexico. In: 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, İrlanda; 2008.
- [12] Karthik A, Mohammed NR, Vetrivel S, Atharsh KR, Vijay M. Study On Hollow Block Using Waste Paper And Plastics. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)* 2024;11(3): 277-291.
- [13] Yusoff, TMAT, Jeni, MLA, Kosnin HB. Mechanical Properties of Concrete Block Containing Recycled Paper Sludge (RPS) as Replacement Material. *Progress in Engineering Application and Technology* 2023; 4(2): 772-779.
- [14] Akinwumi II, Olatunbosun OM, Olofinnade OM, Awoyera PO. Structural evaluation of lightweight concrete produced using waste newspaper and office paper. *Civil and Environmental research* 2014; 6(7): 160-167.
- [15] Solahuddin BA, Yahaya FM. Properties of concrete and structural behaviour of reinforced concrete beam containing shredded waste paper as an additive. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 2023; 17(1): 26.
- [16] Maroliya MK. Load Carrying Capacity of Hollow Concrete Block Masonry Wall. *International Journal of Engineering Research and Applications* 2012; 2(6): 382-385.
- [17] Gündüz L, Kalkan ŞO. Yükleme Hızının Hafif Agregalı Farklı Tasarımlarda İmal Edilmiş Kâgir Blok Elemanların Basınç Dayanımına Etkisi. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2024; 17(2); 1-18.
- [18] Kalkan ŞO, Gündüz L. The influence of anhydrite III as cement replacement material in production of lightweight masonry blocks for unreinforced non-load bearing walls. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies* 2022; 7(4): 322-338.
- [19] Gündüz L, Kalkan ŞO. Lightweight Cellular Hollow Concrete Blocks Containing Volcanic Tuff Powder, Expanded Clay and Diatomite for Non-Load Bearing Walls. *Teknik Dergi* 2020; 31(6); 10291-10313.
- [20] Gündüz L, Kalkan ŞO. Sürdürülebilir Yapılarda Geotekstil Keçe Katmanlı Hafif Betondan Mamul Kâgir Blok Elemanların Termal Yalıtım Verimliliğinin Geliştirilmesi Üzerine Bir Yaklaşım. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 2023; 10(21); 182-197.
- [21] Ásgeirsson H. Létsteypur ur vikri, (Lightweight pumice concrete), IBRI, 1984.

- [22] Gündüz L, Kalkan ŞO. Perlit Genleştirmede Sıcaklık Değişiminin Agrega Karakteristiğine Etkileri Üzerine Bir İnceleme-Yeni Bir Yaklaşım. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi 2023; 11(1), 21-40.
- [23] Al-Jabri KS, Hago AW, Al-Nuaimi AS, Al-Saidy AH. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. Cement and Concrete Research 2005; 35: 1472-1479.
- [24] Gündüz L. (Ed.) 1998, Pomza Teknolojisi (Pomza Karakterizasyonu), Cilt I, Temmuz 1998, Isparta, s285.
- [25] Berge O. Lätt isolerande konstruktionsbeton med isländsk pimpsten som ballast, Västra Frölunda, 1983.
- [26] Gündüz L, Kalkan ŞO. Kâğıt Blok Üretiminde Farklı Orijinli İki Pomzanın Performansları Üzerine Karşılaştırmalı Bir Analiz: Tomarza ve Tatvan Örneği. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2022; 25(4): 537-555.
- [27] Ilakkiya R, Dhanalakshmi G. Experimental investigation on concrete using waste paper. Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET) 2018; 5(2); 1995-1999.
- [28] Functional Classification of Lightweight Concretes, Recommendation, RILEM LC2, second edition, 1978.
- [29] Ma J, Wang T, Wang H, Yu Z, Shen X. A state-of-the-art review on the utilization of calcareous fillers in the alkali activated cement. Construction and Building Materials 2022; 357: 129348.
- [30] Huang G, Hui R, Wang X. The Creep and Shrinkage of Concrete. China Electric Power Press, 2012; 95-104.
- [31] Asamoto S, Ohtsuka A, Kuwahara Y, Miura C. Study on effects of solar radiation and rain on shrinkage, shrinkage cracking and creep of concrete. Cem. Concr. Res. 2011; 41(6): 590-601.
- [32] Neville AM, Properties of the Concrete, (4th Edition), Pitman Publishing Limited, London, 2000.
- [33] McCarter WJ, Watson DW, Chrisp TM. Surface zone concrete: drying, absorption, and moisture distribution. ASCE J. Mater. Civil Eng 2001; 13(1): 49-57.
- [34] Gündüz L. A technical report on lightweight aggregate masonry block manufacturing in Turkey. Suleyman Demirel University, Isparta, Turkey 2005; 1-110.
- [35] ESCSI, A Technical report on Rotary Kiln Produced Structural Lightweight Aggregate, Expanded Shale, Clay and Slate, England, pp.1-19, 1997.
- [36] Brown NJ, Skinner M. 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, 1990.
- [37] Bomhard H. Lightweight concrete structures, potentialities, limits and realities. The Concrete Society, The Construction Press, Lancaster, London, New York, UK, 1980, pp.227-290.