



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Alaçatı-Alapietra Taşının Otoklavsız Gazbeton Üretiminde Değerlendirilebilirliği Üzerine Bir Analiz

Lütfullah GÜNDÜZ, Şevket Onur KALKAN*

İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35620, İzmir, Türkiye

Lütfullah GÜNDÜZ, ORCID No:0000-0003-2487-467X, Şevket Onur KALKAN, ORCID No:0000-0003-0250-8134

*Sorumlu yazar e-posta: sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr

Makale Bilgileri

Geliş: 29.03.2022
Kabul: 21.06.2022
Online Aralık 2022
DOI: 10.53433/yyufbed.1095319

Anahtar Kelimeler

Alaçatı taşı,
Analiz,
Gazbeton,
Hafif beton,
Kagir blok,
Otoklavsız

Öz: Küresel ısınma, inşaat sektörü de dahil olmak üzere dünya çapında her sektörü yakından ilgilendiren hayati bir konudur. Bu sebeple, düşük enerji tüketilerek üretilen malzemeler geliştirmek için birçok girişimde bulunulmaktadır. Gazbeton üretiminde yüksek basınç ve sıcaklıkta otoklav kürlenmesi nedeniyle prosesin enerji tüketimi yüksektir. Bu çalışmada, ocak kesim artığı olarak depolanan, nispeten ince boyutlu Alaçatı-Alapietra taşının gazbetonda hafif agrega olarak geliştirilmesi ve daha düşük enerji tüketimi ile “otoklavsız gazbeton” üretimi araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, beklendiği gibi karışımlarda alüminyum tozu oranı arttıkça, gazbetonların gözenek oranı ve gözenek çapı artmış ve sertleşmiş birim hacim ağırlıkları azalmıştır. Test örneklerinin basınç dayanımları 0.73-1.77 N/mm² aralığında gözlemlenmiştir. Örneklerin, RILEM’e göre Sınıf III dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar için öngörülen dayanım limitleri sağladığı görülmektedir. Örneklerinin ısı iletkenlik değerleri 0.086-0.189 W/mK aralığında değişmiştir. Çalışma bulgularına göre TS EN 771-4 standardında öngörülen minimum 1.5 N/mm² basınç dayanım limitini sağlayabilen karışım tasarımları oluşturabildiği belirlenmiştir. Ayrıca, RILEM limitlerine göre enerji verimliliği bağlamında ısı performansını yüksek olabilecek karışım kombinasyonları oluşturulabileceği de gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, otoklav kullanılmadan gazbeton üretilmiş ve Alaçatı taşının otoklavsız gazbetonlarda kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

An Analysis on the Evaluation of Alaçatı-Alapietra Stone in Non-Autoclaved Aerated Concrete Production

Article Info

Received: 29.03.2022
Accepted: 21.06.2022
Online December 2022
DOI: 10.53433/yyufbed.1095319

Keywords

Aerated concrete,
Alaçatı stone,
Analysis,
Lightweight concrete,
Masonry block,

Abstract: Global warming is a vital issue that closely concerns every industry around the world, including the construction industry. Thus, many attempts have been made to develop materials that are produced with lower energy consumption. Autoclaved aerated concrete is a popular thermal insulation material in the construction industry. However, due to the autoclave curing at high pressure and temperature, the energy consumption of the process is high. In this study, the production of “non-autoclaved aerated concrete” with was investigated. In addition, the development of relatively fine size Alaçatı-Alapietra stone as lightweight aggregate in aerated concrete was examined. According to the results, the compressive strengths of the test samples were determined in the range of 0.73-1.77 N/mm². All of the samples meet the strength limits stipulated for Class III concretes for filling and insulation purposes

Non-autoclaved

according to RILEM. The thermal conductivity values of the test samples varied in the range of 0.086-0.189 W/mK. According to the research findings, it has been determined that it could create mixture designs providing the minimum 1.5 N/mm² compressive strength limit stipulated in the TS EN 771-4 standard. It has also been observed that mixture combinations with high thermal performance can be created in terms of energy efficiency according to RILEM limits. In the experimental study, it was determined that aerated concrete was produced without using an autoclave, and Alaçatı stone could be used in non-autoclaved aerated concrete.

1. Giriş

İnşaat sektöründe sürdürülebilir ve enerji tasarruflu binaların inşası, verimli yapı malzemelerinin seçimi ve projelerde uygulanmasıyla sağlanabilir. Teknolojik olarak gelişmiş ülkelerde modern bina teknolojilerinin geliştirilmesi, enerji maliyetlerini ve hammadde tüketimini azaltabilecek uygun maliyetli, verimli malzemelerin gelişimini amaçlamaktadır. Gazbeton, geniş bir yoğunluk ve dayanıklılık aralığına sahip olması sebebiyle konut inşaatları ve pratik kullanımlar için en uygun malzemelerden biridir (Melnyk ve ark., 2013). Düşük yoğunluğu, duvar birimlerinde sağladığı mukavemeti, uygulama kolaylığı gibi sebeplerle hafif beton olarak sınıflandırılan modern, enerji verimli bir yapı malzemesidir (Melnyk ve ark., 2013; Poznyak & Melnyk, 2014; Koutný & Opravil, 2016). Dünyada birçok ülkede artan konut inşaatı talebi sebebiyle gazbeton üretimlerinde de artış görülmektedir. İnşaat sektöründe, enerji ve hammadde tüketimini azaltmayı, inşaat kalitesini ve güvenilirliğini artırmayı amaçlayan yeni düzenlemeler ve uygulama prensipleri de sürekli geliştirilmektedir (Awang ve ark., 2010; Melnyk ve ark., 2013).

Hava boşluklarının uygun bir hava sürükleyici madde vasıtasıyla harç matrisine hapsedildiği gazbeton, çimento, kireç, silis kumu ve bazen de puzolanik malzemelerden üretilir (Koutný & Opravil, 2016). Gözenek oluşturma yöntemine göre hava sürükleyici yöntem (gazbeton), köpürtme yöntemi (köpük beton) ve kombine yöntem olmak üzere üç gruba ayrılır. Köpük beton genellikle organik veya sentetik bir köpürtücü madde ve normal bir sertleştirme yöntemi kullanılarak üretilen beton türüdür (Awang ve ark., 2010). Ancak, gazbeton ise alüminyum (Al) tozu gibi bir genleşme maddesi kullanılarak geliştirilmiş çimento esaslı bir harç hamurunun basınç ve sıcaklık altında otoklavda kürlenmesiyle üretilen hafif beton türüdür (Qu ve ark., 2020; Soutana & Galetakis, 2020). Üretim ve uygulanan kür yöntemine göre iki tür gazbeton vardır: otoklav kürlenmeli gazbeton ve otoklavlanmamış gazbeton. Her iki gazbeton türünün matris yapıları benzerlik gösterir. Ancak, her iki yöntem arasındaki temel farklılık, üretimin uygulanması için gereken teknolojik yöntem ve ekipmandan kaynaklanmaktadır. Basınç dayanımı, kuruma büzülmesi, su emme vb. gibi özellikleri doğrudan kürlenme yöntemine ve süresine bağlıdır. Yeterince sertleştiğinde genleşmiş çimentolu kek malzeme kalıbından çıkarılır, gerekli büyüklüklerde dilimleme işlemine tabi tutularak kâgir blok veya plaka formlu yapı malzemeleri formuna getirir (Poznyak & Melnyk, 2014; Koutný ve ark., 2015; Walczak ve ark., 2015; Koutný & Opravil, 2016; Ulykbanov ve ark., 2019).

Otoklav kürlenmeli gazbetonlar düşük ısı iletkenlik katsayı “ λ ” değerlerine sahip olup, kâgir duvar uygulamalarında yaygın olarak kullanılan blok elemanıdır. Gazbetonun düşük ısı iletkenlik değeri, çimentolu karışımlarda alüminyum tozu ve alkaliler arasındaki kimyasal reaksiyonun neden olduğu ve hidrojen gazı üreten milyonlarca eşit dağılmış, düzgün boyutlu ve hapsedilmiş hava boşluğuna bağlıdır (Walczak ve ark., 2015; Hlaváček ve ark., 2015). Isı yalıtım performansı açısından önemli bir parametre olan λ 'nın değeri, malzemenin yoğunluğuna, kürlenme yöntemine, nem içeriğine, karışım oranlarına ve bileşenlere bağlı olarak 0.085-0.30 W/mK aralığı gibi düşük bir ısı iletkenlik değerine sahiptir (Ropelewski & Neufeld, 1999; Jones & McCarthy, 2005; Walczak ve ark., 2015). Örneğin, Walczak ve ark. (2015) yaptıkları araştırmada kum bazlı otoklav kürlenmeli gazbeton örneklerinin λ değerinin yaklaşık 0.15 W/mK olduğunu, eşdeğer bir yoğunlukta uçucu kül bazlı otoklav kürlenmeli gazbeton örneklerinin λ değeri ise, 400 kg/m³ yoğunluk değerinde, 0.085 W/mK olduğunu bildirmiştir.

Yukarıda da değinildiği gibi, Al tozu gibi bir genleşme maddesi kullanılarak üretilen gazbetonun prosesinde tipik olarak otoklavlanmamış bir kürlenme yöntemi kullanır (Teng ve ark., 2012; Chen ve ark., 2013). Gazbeton için kullanılan otoklav kürlenmenin güncel koşullarda potansiyel riskleri söz konusu

olup, yüksek basınç ve sıcaklıkta çalışması nedeniyle prosesin enerji tüketimi yüksektir. Üretim sürecinde otoklav kürlemesi için gerekli enerji tüketimini düşürmek veya minimize etmek amacıyla, otoklav kürleme mekanizmasını kullanılmadığı ayrı bir üretim yöntemi önem kazanmaktadır (Melnik ve ark., 2013; Koutný & Opravil, 2016; Ulykbanov ve ark., 2019). Bu amaçla, son yıllarda havada veya nemli bir odada %100 bağıl nem ortamında kürlenmiş otoklavlanmamış gazbeton üretimlerinin gelişim gösterdiği görülmektedir. Enerji maliyetlerinin yüksek olduğu periyotlarda, daha ekonomik koşullarda üretim yapılabilmesini mümkün kılan otoklavsız gazbetonun karışım bileşenleri yapılacak Ar-Ge çalışmalarıyla optimize edilmelidir. Otoklavsız gazbeton uygulamasının avantajlarından bazıları sırasıyla şu şekilde özetlenebilir: Otoklav işlemi gerektirmediği için yüksek sıcaklıklarda buharlı fırınlarda gazbeton blokların ısı işleme tabi tutulmasına gerek yoktur. Otoklav prosesine ihtiyaç olmadığı için modüler portatif tesisler kurularak kısa sürede üretim prosesleri aktif hale getirilebilir, üretim sürecinde uygulanacak proses birimleri için geniş üretim alanları gerektirmez. Küçük alanlarda üretim yapabilmek mümkündür. Üretim için otoklavda geçen süre olmadığından, konvansiyonel otoklavlanmış gazbeton üretim sürecine göre daha kısa sürelerde üretim yapılabilir. Otoklavsız gazbeton ürünleri, A1 Sınıfı yangına dayanıklı yapı ürünleri olarak derecelendirilebilmektedir. Geleneksel otoklavlanmış gazbeton ürünlere kıyasla üretim sürecinde %80'e varan enerji tasarrufu sağlar. Yüksek ısı yalıtım değerlerine sahiptir. Karışım tasarımı ve agrega + kimyasal katkı kullanım oranı optimize edildiğinde konvansiyonel otoklavlanmış gazbeton ile eşdeğer basınç dayanımı değerlerine sahip olabilmektedir (Özcan & Gündüz, 2021a; Özcan & Gündüz, 2021b).

Otoklav kullanılmaksızın üretimi tasarlanmış gazbeton örneklerinin elde edilmesinde genellikle çimento, kum, sönmemiş kireç ve alüminyum tozu başlıca bileşenlerdendir. Burada kum, çok ince boyutlarda öğütülerek ana agrega malzeme olarak kullanılmakta ve çimentolu kek hamurunda düzgün ve homojen dağılım özelliği sergileyebilmektedir. Birim hacim kütlesi nispeten düşük ve gözenekli bir kayaç olan Alaçatı-Alapetra taşının alçı bağlayıcılı harçlarda (Kalkan & Gündüz, 2018), çimentolu hafif yalıtım harçlarında (Gündüz ve ark., 2017) ve hafif betonlarda (Gündüz ve ark., 2016) kullanılabilirliği belirlenmiştir. Ancak, gazbeton üretiminde, çimentolu kek hamurunda ana agrega malzemenin birim hacim kütlesi düşük, gözenekliliği yüksek olan bir malzeme kullanımında, birim tane yoğunluğunun düşük olmasına bağlı olarak tanelerin oluşturulan şlam kıvamındaki harcın yüzeyinde birikerek yüzme eğiliminde olduğu ve homojen bir karışımın elde edilemediği durumlar, bu çalışmanın bir seri ön araştırmalarında tespit edilmiştir. Bununla birlikte, gözenekli agrega malzemenin açık ve kapalı gözeneklerine hızla emilen çimento şerbeti sebebiyle de taneler arasında yoğunluk farkı oluşabilmekte ve buna bağlı tane ayrışmaları şlam harcında görülebilmektedir. Bu da doğal olarak gözenekli agrega malzemelerin gazbeton üretiminde kullanımında dezavantaj olarak algılanmasına sebep olabilmektedir. Ancak, gözenekli yapıya sahip bir malzemenin bu bağlamda şlam harcında olası yoğunluk farkını gidermeye yardımcı olacak katkı maddeleriyle kombine edilmesi veya desteklenmesi durumunda, bu olumsuzluklar büyük ölçüde teknik olarak aşılabildiği yine bu ön çalışma serilerinde tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında doğal gözenekli, hafif ve volkanik orijinli inorganik agregaların gazbeton üretimlerinde kullanımı üzerine yapılan bir dizi deneysel analizlerin bulguları irdelenmiştir. Bu amaçla, İzmir ili Alaçatı bölgesinde volkanik orijinli inorganik bir kayaç oluşumu bulunan yöresel ismiyle "Alapetra" taşının, otoklavsız gazbeton üretiminde ana agrega malzeme olarak değerlendirilebilirliği üzerine laboratuvar ortamında bir seri çalışma yapılmıştır. Alapetra taşının gazbeton üretiminde şlam harcında herhangi bir ayrışma ve karışım yüzeyinde birikim yapmaksızın (yüzme olgusu olmaksızın) ana agrega karışım bileşeni olarak kullanılabilirlik performansı ve hazırlanan test örneklerinin teknik özellikleri etüt edilmiştir. Bu kapsamda özellikle yüksek selülozik lif katkısını bünyesinde barındıran lif çimento plaka tozlarının gazbeton karışımlarına ilave edilmesiyle, gözenekli formdaki volkanik agreganın oluşturabileceği olumsuzluklar baskılanmış ve matris yapıda daha homojen ve yoğunlukları değişken karışım tasarımları geliştirilmiştir. Araştırma bulguları karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Test örneklerinde kullanılan malzemeler

Alapetra taşı agregalı otoklavsız gazbeton (ATAOG) örneklerinin hazırlanmasında ana agrega, dolgu materyali, bağlayıcı malzeme ve katkı malzemeleri olarak 9 ayrı adet malzeme türü kullanılmıştır. Bu malzemelere ilişkin özet bilgi aşağıdaki alt bölümlerde verilmiştir.

2.1.1. Çimento

Gazbeton test örneklerinin hazırlanmasında bağlayıcı malzeme olarak EN 197-1 CEM 1 42.5R (42.5 N/mm²) standardına uygun Portland çimentosu kullanılmıştır.

2.1.2. Sönmemiş kireç (CaO)

Otoklavsız gazbeton örneklerinin karışımlarında iri agrega ve doğal kayaç formunda piyasa koşullarından tedarik edilmiş sönmemiş kireç kullanılmıştır. Sönmemiş kirecin CaO miktarı ortalama %86'dır. Uysal ve ark. (2012) gazbeton üretimlerinde kullanılacak kirecin CaO miktarının %80'den fazla olması gerektiğini belirlemişlerdir. Bu bağlamda araştırmada kullanılan kirecin CaO miktarı bu değeri sağlamaktadır. İri taneli sönmemiş kireç, laboratuvarında bir kırıcıda kırıldıktan sonra havanda öğütme işlemine tabi tutularak mikron boyutuna indirgenmiştir. Sonrasında 125 mikronluk kare açıklıklı bir elekten elenerek tüm karışımlarda 125 mikron boyut altı sönmemiş kireç kullanılmıştır. Otoklavsız gazbeton örneklerinde sönmemiş kirecin başlıca iki işlevi söz konusudur: Bunlarda ilki, karışımda karma suyunun varlığı ile reaksiyona girerek kirecin sönme süreci başlar. Bu süreçte sönen kirecin açığa çıkardığı ısıyla karışımda yer alan alüminyum tozları reaksiyona girerek hidrojen açığa çıkmasına sebep olur. Oluşan hidrojen miktarına bağlı olarak da karışımda gaz boşlukları meydana gelmektedir. Kirecin sönmesi sırasında açığa çıkan bu ısı, gaz boşluklu matris yapının sertleşmesini de hızlandırmaktadır. İkinci işlev ise, sönen kireç gazbetonun kür sürecinde karışım suyu ile ekzotermik reaksiyonu sonucu matris yapıda Ca(OH)₂'i oluşturur. Oluşan Ca(OH)₂, karışımdaki malzemelerin kimyasal yapısında bulunan SiO₂ ile reaksiyona girerek, gazbeton matris yapısında hidrate silikat bileşiklerinin oluşmasını sağlar (Uysal ve ark., 2012).

2.1.3. Alaçatı-Alapetra taşı

Otoklavsız gazbeton örneklerinin hazırlanmasında volkanik kökenli inorganik Alaçatı-Alapetra taşı İzmir-Alaçatı bölgesinde Aydoğdu Ticaret A.Ş.'ne ait üretim ocaklarında üretim artışı şeklinde ocak alanındaki malzemelerden örnekler temin edilmiştir (Şekil 1 – Şekil 2).



Şekil 1. Alaçatı-Alapetra taşı üretim ocağı yer bulduru (lokasyon) haritası.

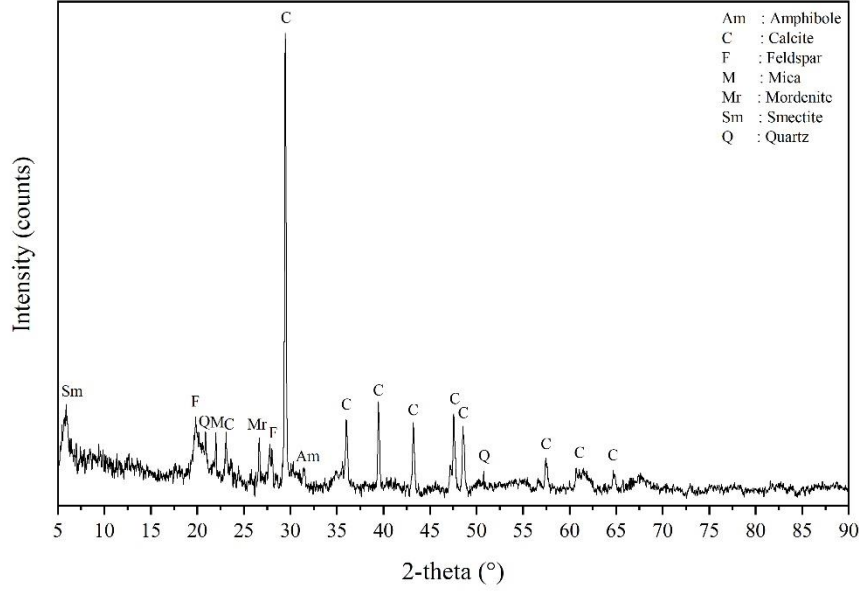


Şekil 2. Alaçatı-Alapetra taşı üretim ocağı ve üretim artığı malzemelerin genel görünümü.

Alapetra taşı, İzmir Alaçatı bölgesinde yer alan volkanik kayaç orijinli, bileşiminde pomza partikülleri bulunan, yapı sektöründe kaplama ve/veya yapı taşı olarak da uzun yıllardır kullanılan enerji verimliliği yüksek inorganik doğal bir kayaçtır. Bünyesinde silisyum içeriğinin yüksek oluşu sebebiyle, atmosfer ortam koşullarına son derece dayanıklı ve estetik görünümlü, albenisi yüksek bir doğallığa sahiptir. Alapetra taşı, kirli beyazımsı renkte, bileşiminde bazalt çakılları bulunan gözenekli inorganik bir kayaçtır. Bölgeye özgü özelliklerinden dolayı “Alaçatı Taşı” veya “Alapetra Taşı” olarak da isimlendirilmiş kayaç, yumuşak karakterde olması sebebiyle yontularak doğal kesme taş şekliyle geçmişten günümüze taş evlerin yapımında dolu kâgir blok olarak kullanımı yaygındır. Kayaç yapısının mikroskopik analizlerine göre “pomza bileşenli volkanik tüf agrega” olarak nitelendirilebilmektedir. Doğal matris yapısında %55’ten fazla pomza tanelerinin yer aldığı görülmüştür. Alapetra taşına ait özellikler Çizelge 1’de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 3 mevcut ocaktan Alaçatı taşı örneklerinin XRD profilini göstermektedir.

Çizelge 1. Alaçatı-Alapetra taşına ait bazı özellikler

Özellik	
0-4 mm Birim Hacim Ağırlık :	900 ± 50 kg/m ³
Toplam Gözeneklilik :	%41-%45
Matriste (İnce kül-cam oranı) :	%12-23
Özgül Ağırlık :	2.36 g/cm ³
Pomza tanelerinin oranı :	>%57
Bazalt tanelerinin oranı :	%3-15
Riyolitik lav ve volkan camı partikül oranı :	%10-13



Şekil 3. Alaçatı-Alapetra taşı XRD profili.

Ocak kesim artığı Alapetra taşı örnekleri laboratuvar ortamına getirilerek, öncelikle bir kırıcıda kırılarak, daha sonra laboratuvar tipi bilyalı bir değirmen yardımıyla düşük devirli öğütme işlemiyle boyutu küçültülmüştür. Öğütülmüş Alapetra taşı 45 µm boyut altı (0/45 µm) (İnce Boyut Alapetra Taşı – “FA”) ve 45/1000 µm (İri Boyut Alapetra Taşı – “CA”) boyut aralığı olmak üzere iki ayrı boyutta sınıflandırılmıştır. Bu iki farklı boyut, çalışma kapsamında tasarlanmış oranlarda harmanlanarak tüm karışımlarda ana agrega malzeme olarak kullanılmıştır.

2.1.4. Lif çimento plaka tozu

Gazbeton üretimlerinde genellikle temel karışım bileşeni ana agrega olarak kuvars, kuvarsit veya kuvars kumu kullanılmaktadır. Gazbeton üretiminde gözenekli yapıya sahip ve düşük birim ağırlıklı malzeme kullanımı üzerine yapılan bir seri ön çalışmada hafif agregaların gazbeton harcında yoğunluk farkı sebebiyle yüzdüğü ve dolayısıyla arzu edilen düzeylerde homojen karışımların elde edilemediği tespit edilmiştir. Gazbeton bileşiminde hafif agrega kullanımını mümkün kılabilmek ve agreganın olası bu dezavantajını bertaraf edebilmek amacıyla bu çalışma kapsamında karışımlarda yüksek selüloz lif içeriğine sahip lif çimento plaka tozu dolgu materyali olarak kullanılmıştır. Ortala yoğunluğu 1400 kg/m³ olan lif çimento plaka örnekleri piyasadan temin edilerek, öncelikle havalandırılmalı bir etüvde 70±5 °C sıcaklıkta kurutma işlemine tabii tutulmuştur. Sonrasında laboratuvar ortamında öğütülmüş ve 1 mm boyut altında sınıflandırılarak lif çimento plaka tozu “LÇPT” dolgu malzemesi olarak tüm karışımlarda kullanılmıştır.

2.1.5. Mikro silika

Çalışmada kullanılan mikro silika malzeme, Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde elde edilen bir yan üründür. Ferrosilisyum, silikoferrokrom baca tozları olarak endüstriyel atık formunda kazanımı olan mikro silika temin edilerek tüm karışımlarda sabit oranda mineral katkı olarak kullanılmıştır. Mikro silika çok yüksek puzolanik özelliği sebebiyle ATAOG test örneklerinin hazırlanmasında dayanım artırıcı, matris yapıyı güçlendirici mineral katkı olarak değerlendirilmiştir.

2.1.6. Alüminyum tozu

Test örneklerinin hazırlanmasında hava sürükleyici ve genleştirici ajan olarak %99.6 saflık derecesinde nano partikül boyutunda alüminyum tozu piyasadan temin edilerek kullanılmıştır.

Hazırlanan karışımda kirecin sönme işlevi sürecinde açığa çıkan ısı etkisiyle alüminyum tozları reaksiyon vererek aktif duruma gelmektedir (Teng ve ark., 2012; Chen ve ark., 2013). Ayrıca, bu çalışma kapsamında karma suyu olarak ısıtılmış su kullanımı sebebiyle, karışımların ısı değeri daha yüksek olması sağlanarak alüminyum tozunun aktifliği artırılmıştır. Alüminyum tozu hava sürükleyici ve oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu hidrojen gazı açığa çıkararak gaz boşluklarını oluşturuca ajan olarak kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen ATAOG örnekleri yoğunluk değerlerinin farklılaşmasında en önemli karışım bileşeni olarak 4 ayrı oranda alüminyum tozu kullanılmıştır.

2.1.7. Diğer kimyasal katkılar

Test örneklerinin hazırlanmasında tüm karışımlarda sabit oranlarda üç ayrı kimyasal katkı piyasadan temin edilerek kullanılmıştır. Kimyasal katkıları: Sodyum sülfat, sodyum hidroksit ve kalsiyum klorürdür. Bu katkıları toz forma olup, herhangi bir işleme tabi tutulmaksızın karışımlara ilave edilmiştir.

Sodyum sülfat birçok endüstriyel ürünün üretiminde nötr bir tuz olarak kullanılır. Kimyasal formülü Na_2SO_4 olan katı, beyaz renkli ve kristalize formda toz şeklinde bir malzemedir. ATAOG test örneklerinin hazırlanmasında sodyum sülfat köpürtücü ve gözenek artırıcı katkı materyali olarak karışımlara ilave edilmiştir. Diğer katkı materyali sodyum hidroksit olup, NaOH kimyasal formüle sahip inorganik bileşiktir. NaOH kostik ve/veya kostik soda olarak da bilinmekte olup, yüksek pH değeri sebebiyle ATAOG test örneklerinin hazırlanmasında pH dengeleyici ve karma suyu varlığıyla birlikte tepkime vererek kısa bir sürede karışımın mevcut sıcaklığının artmasına ve sıcaklığın en az 20 dakika süreyle stabil kalmasına neden olabilmektedir. Bu sıcaklık etkisiyle oluşan kimyasal reaksiyonların hızlandırılması amacıyla karışımlara ilave edilmiştir.

ATAOG test örneklerinin priz süresini kısaltmak ve erken mukavemet sağlamak amacıyla priz hızlandırıcı amacıyla toz formda kalsiyum klorür ($CaCl_2$) tüm karışımlarda sabit oranda ilave edilmiştir. Yüksek oranlarda kalsiyum klorür kullanımı genellikle gazbeton ürünlerde basınç dayanımını olumsuz etkileyen bir katkı olarak bilinmektedir. Bununla birlikte organik bileşikler ile beraber otoklav kürelemesi yapılan gazbeton ürünlerinde aşınmalara neden olabilmesi sebebiyle karışım bileşenlerinde klor çok arzu edilmemektedir. Ancak, bu çalışmada kalsiyum klorür katkı oranı basınç dayanımını olumsuz etkilemeyecek düşük bir düzeyde kullanılmıştır. Diğer taraftan, ATAOG test örneklerinin priz süreci normal ortam koşullarında küreleme yapıldığı ve otoklav kürelemesi yapılmadığı için, küreleme aşamasındaki olası aşınma gibi dezavantaj da oluşmamıştır.

2.1.8. Su

Karışımlarda gerekli kimyasal reaksiyonların hızlı bir şekilde gerçekleşebilmesi amacıyla ortalama 75 ± 5 °C sıcaklığa ısıtılmış çeşme suyu kullanılmıştır. Tüm karışımlarda sıcak karma suyu sabit sıcaklık ve sabit oranda kullanılmıştır.

2.2. Karışım tasarımı ve örneklerin hazırlanması

Dört farklı alüminyum kullanım oranında gruplandırılarak hazırlanmış otoklavsız gazbeton örneklerinde Alaçatı-Alapetra taşının karışım bileşenleri ile uyumu, örneklerin teknik özelliklerini incelemek amacıyla her bir grupta üçer seri ATAOG test örnekleri hazırlanmıştır. Karışımlar ağırlıkça sırasıyla %0.13, %0.11, %0.08 ve %0.06 oranlarında alüminyum tozu kullanılarak gruplandırılmıştır. Bu gruplar AT1-AT3, AT4-AT6, AT7-AT9 ve AT10-AT12 olarak kodlanmıştır. Her bir grup karışımında Alaçatı-Alapetra taşı volkanik gözenekli agrega olarak üç ayrı seride ağırlıkça sırasıyla %30 FA + %70 CA, %50 FA + %50 CA ve %70 FA + %30 CA oranlarında kullanılarak karşılaştırmalı analizlerin yapılabileceği örnekler elde edilmiştir. Bu her üç seride ince boyut ve iri boyut olarak çalışmada tanımlanan Alapetra taşının boyut etkisi ve test örneklerinin performansına olan etkilerinin analizi amaçlanmıştır. ATAOG test örnekleri için tasarımılandırılan karışım kombinasyonları Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. ATAOG test örnekleri karışım oranları (ağırlıkça %)

Numune	Çimento	0/45 µm Alapetra (FA)	45/1000 µm Alapetra (CA)	CaO	LÇPT	Mikro Silika	Al	Na ₂ SO ₄ +NaOH +CaCl ₂	Su/Katı
AT1	28	16.4	38.2	10	3	2.5	0.13	1.74	0.60
AT2	28	27.3	27.3	10	3	2.5	0.13	1.74	0.60
AT3	28	38.2	16.4	10	3	2.5	0.13	1.74	0.60
AT4	28	15.2	35.5	11	6	2.5	0.10	1.74	0.60
AT5	28	25.3	25.3	11	6	2.5	0.10	1.74	0.60
AT6	28	35.5	15.2	11	6	2.5	0.10	1.74	0.60
AT7	28	14.0	32.7	12	9	2.5	0.08	1.74	0.60
AT8	28	23.3	23.3	12	9	2.5	0.08	1.74	0.60
AT9	28	32.7	14.0	12	9	2.5	0.08	1.74	0.60
AT10	28	12.8	29.9	13	12	2.5	0.06	1.74	0.60
AT11	28	21.4	21.4	13	12	2.5	0.06	1.74	0.60
AT12	28	29.9	12.8	13	12	2.5	0.06	1.74	0.60

Çizelge 2’den görüldüğü gibi tüm karışımlarda ağırlıkça %28 çimento, %2.5 mikro silika, toplamı %1.74 Na₂SO₄+NaOH+CaCl₂ sabit oranlarda kullanılmıştır. Karışımların kıvamı ve uygulanabilirlik durumu üzerine yapılan ön deneysel çalışmalar ışığında tüm karışımlarda 0.60 su/katı oranının kullanımı en ideal bulgu olduğu belirlenmiş ve tüm karışımlarda bu sabit oranda karma suyu miktarı belirlenmiştir. Karışım tasarımında farklı yoğunluk değerlerinde ATAOG örnekleri elde edilmesi de hedeflendiği için ilk grup karışımlarında (AT1-AT3) ağırlıkça %10 sönmemiş kireç CaO ve %3 oranında da LÇPT sabit değerlerde kullanılmıştır. Diğer karışım gruplarında ise CaO ve LÇPT oranları artırılarak uygulanmıştır. İkinci grup karışımlarında (AT4-AT6) CaO ve LÇPT sırasıyla ağırlıkça %11 ve %6, üçüncü grup karışımlarında (AT7-AT9) ağırlıkça %12 ve %9 ve dördüncü grup karışımlarında ise (AT10-AT12) ağırlıkça %13 ve %12 olarak uygulanmıştır. CaO ve LÇPT oranlarındaki bu artış miktarları, ATAOG örneklerinin elde edilmesinde oluşan kimyasal reaksiyon sonucunda gerçekleşen gözeneklilik oranı ve karışımın dökümü sonrasında oluşan genleşme oranlarını dengelemek amacıyla önceden laboratuvar ön tetkik örnek çalışmalarında edinilen teknik tecrübeye dayanılarak tasarımılandırılmıştır.

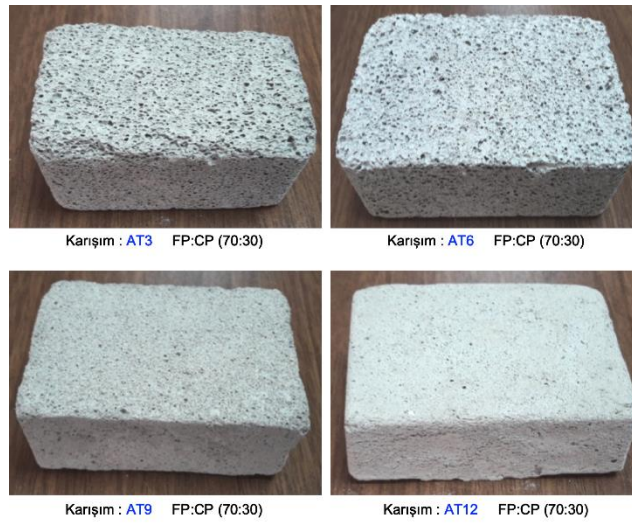
ATAOG örneklerinin hazırlanması için karışım kombinasyonundaki katı maddeler üç ana partide harmanlanarak karışımlara dahil edilmiştir. İlk önce Alapetra taşının iki ayrı boyutu belirlenen oranlarda kuru toz formunda harmanlanmış ve sonrasında bu harmandaki agrega malzemelerin yüzey gerilimlerinin değişimi amacıyla ıslatılarak ön nemlendirme işlemine tabi tutulmuştur. İkinci parti malzeme olarak çimento, kireç, LÇPT ve mikro silika belirlenmiş oranlarda tartılarak homojen bir toz karışım elde edilecek şekilde harmanlanmıştır. Üçüncü parti malzeme harmanı olarak ise alüminyum tozu ve Na₂SO₄ + NaOH + CaCl₂ katkıları ayrı bir kap içinde karıştırılarak homojen toz karışım elde edilmiştir. Daha sonra Alapetra agrega karışımı ve çimento + diğer ana malzeme harmanı aynı bir kap içerisine konularak düşük devirli bir karıştırıcı ile 3 dakika süreyle karıştırılmıştır. Sıcaklık değeri ortalama 75±5 °C’ye ısıtılmış su, bu karışıma ilave edilmiş ve karıştırma işlemi devam ederken, vakit kaybı olmaksızın üçüncü parti karışım olarak hazırlanmış alüminyum + katkı maddelerinden oluşan karışım, eş zamanlı olarak karıştırıcıdaki harca eklenerek ortalama 4 dakika süreyle karıştırılmıştır. Karıştırma sürecinde, kullanılan alüminyum miktarına da bağlı olmak koşuluyla yer yer kimyasal reaksiyonun daha karıştırma aşamasında başladığı gözlenmiştir. Homojen bir karıştırma işlevi sonrası 100 x 100 x 120 mm boyutlu çelik kalıplara ve ayrıca serbest boyutta plastik dikdörtgen şekilli kalıplara, kalıp yüksekliğinin ortalama 2/3 nispetinde dolumu yapılarak herhangi bir vibrasyon ve sıkılama işlemi yapılmaksızın numune dökümleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım kombinasyonundan 12 adet örnek dökümü yapılmıştır. Ayrıca kalınlığı en az 50 mm olacak şekilde 3’er adette levha formu kalıplara örnek dökümleri yapılmıştır. Dökümü yapılan kalıplar daha sonra, ortalama sıcaklığı 60±10 °C’lik hava sirkülasyonlu bir etüvde en az 4 saat süreyle ön kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Ön kürleme işlemi sonrası numuneler etüvden alınarak 18 saat ortalama +22 °C sıcaklıktaki bir ortamda kür işlemi yapılmıştır. Bu süreçte, numunelerde kimyasal reaksiyon sonucu gelişen genleşme miktarları da ayrıntılı olarak kaydedilmiştir. Kür işlemi tamamlanmış her bir örnek kalıplardan çıkarılmış ve nihai boyutları

hassas bir boyut ölçer ile belirlenerek kaydedilmiştir. Boyut ölçüm değerleri kullanılarak numunelerin priz sonrası genişleme yüzde değerleri hesaplanmıştır. Bununla birlikte, her bir numune 1, 3, 5, 7, 14, 21, 28 ve 48. günlerde birim ağırlıkları tartılarak, bünyesinden nem atma ve kuruma miktarları saptanmıştır. 28 ve 48. günlerde her bir ATAOG test örneğinin birim ağırlık, gözeneklilik, su emme, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayısı gibi değerleri belirlenmiştir. ATAOG test örneklerinin birim hacim ağırlıkları TS EN 1015-10 “Kâgir harcı – Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini” standardına (TS, 2007) uygun olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan diğer tüm analizlerde ise TS EN 771-4 “Kâgir birimler – Özellikler – Bölüm 4: Gazbeton kâgir birimler” standardı (TS, 2015) ve ilgili standartların öngördüğü prensipler uygulanmıştır. Dökümler sonucu elde edilen ATAOG test örneklerinin sembolik görünümü Şekil 4’te verilmiştir. Test örneklerinin ısı iletkenlik değeri ölçümleri için laboratuvar ölçekli Sıcak Kutu (Hot Box) yöntemi kullanılmıştır. Sıcak Kutu yönteminde test örneği, opsiyonel olarak 0°C ile +55°C arasında değişen sıcaklık ortamları için ısı iletkenlik ölçümü yapılabilmektedir. Ölçüm sırasında, örneğin her bir yüzeyindeki ısı değeri, yüzeyde bir karelaç oluşturacak şekilde en az 9’ar noktadan ölçülmüştür. Isı iletkenlik ünitesi, ısı kutusu (sıcak oda) olarak adlandırılan bölümde, bir elektrikli ısıtıcı, numunenin yerleştirildiği bölüm ve soğuk odadan oluşmaktadır. Soğuk ve sıcak odanın her ikisinde de yer alan ısı sensörleri, zarar görmeden örnek yüzeyine tam olarak temas ettirilerek örnek yüzey sıcaklık değerleri 0.1°C hassasiyetle ölçülmüştür. Verilen ısının kontrolü, sürekli değişebilen (20-400 watt) akım ile sağlanabilmekte ve test cihazı, ısı geçişinin üç boyutlu olması nedeniyle, hatalar minimize edilerek tasarımılandırılmıştır. Sıcaklık verilerini kaydetmeden önce, numunenin kararlı duruma gelmesi sağlanmış olup, kararlı duruma ulaştıktan sonra veri kaydına başlanmıştır. Düzenek içine yerleştirilmiş test numunesinin her iki yüzeyinde istenen sıcaklık farkı ısıtıcıya uygulanan elektriksel güç (Q_T , Watt) vasıtasıyla sağlanmış ve yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı ölçüm değerlerinden ortalama değer olarak (ΔT , °C) belirlenmiştir. Test örneğinin ısı iletkenlik değeri yalnız bir şekilde (λ , W/mK), aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\lambda = \frac{Q_T \times d}{A \times \Delta T} \quad (1)$$

Burada;

- λ = Test örneğinin ısı iletkenlik değeri, (W/mK),
- Q_T = Isıtıcıya uygulanan elektriksel güç, (Watt),
- d = Numune kalınlığı, (m),
- A = Isıtma bölümünde ısıtılan alan, (m²),
- ΔT = Yüzeyler arasındaki sıcaklık farkı, (°C),



Şekil 4. ATAOG test örneklerinin sembolik görünümü.

3. Bulgular ve Tartışma

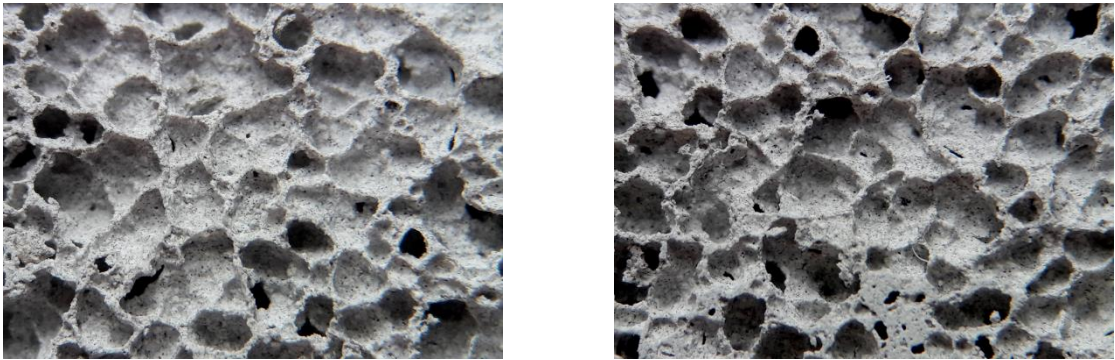
Tüm ATAOG test numunelerinin 28 gün kür sonrası birim hacim kütle, gözeneklilik, genişleme oranı, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik değerleri, her bir karışımda bulunan iki ayrı boyut Alapietra taşının toplamı (ΣAT) ve agregaların toplamına (ΣA) olan oranı (Toplam Alapietra taşı/ Agregaların toplamı) değişiminde sırasıyla Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. ATAOG test örneklerinin analiz bulguları

Numune	$\Sigma AT / \Sigma A$	Birim Hacim Kütle (kg/m^3)	Gözeneklilik Oranı (%)	Genişleme Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)
AT1	0.76	331	56.20	22.26	0.73	0.086
AT2	0.76	349	54.40	19.15	0.87	0.095
AT3	0.76	383	51.49	17.68	0.96	0.105
AT4	0.70	415	49.70	15.53	0.99	0.107
AT5	0.70	445	49.54	14.63	1.06	0.108
AT6	0.70	488	45.10	13.00	1.14	0.129
AT7	0.65	515	47.34	13.34	1.23	0.136
AT8	0.65	554	43.50	10.75	1.51	0.132
AT9	0.65	593	40.10	11.77	1.47	0.151
AT10	0.59	620	37.50	11.69	1.43	0.157
AT11	0.59	665	39.60	9.78	1.73	0.163
AT12	0.59	717	35.30	8.00	1.77	0.189

3.1. Mikroskopik analiz

ATAOG test numunelerinin 28 gün kür sonrası oluşan matris yapılarının genel formu, mikro yapısı, gözeneklilik olgusunun karakteristiği, gözenek büyüklükleri ve dağılımın homojenliği, karışım kombinasyonlarında yer alan inorganik kökenli ana materyallerin matris yapıda görünüşleri ve özellikle Alapietra taşının gazbeton örneklerinin yapısal gelişimindeki etkisini analiz edebilmek amacıyla bir dizi mikroskopik analizler yapılmıştır. Otoklavsız gazbeton üretiminde Alapietra taşı kullanımını temsilen hazırlanan test örneklerinden farklı karışım kombinasyonlarının etkileşimlerini ve oluşan matris yapılarındaki farklılıkları irdelemek amacıyla burada 7 farklı test örneğinin sırasıyla AT2, AT3, AT4, AT6, AT7, AT8 ve AT12 kodlu karışımlara ait mikroskopik görselleri sembolik olarak Şekil 5 – Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 5. AT2 örneği matris yapısı genel görünümü. Şekil 6. AT3 örneği matris yapısı genel görünümü.

Şekil 5 ve Şekil 6 irdelendiğinde görüldüğü üzere, karışım kombinasyonunda %0.13 alüminyum tozu oranının gazbeton örneğinin genişmesinde oldukça etken olduğu ve matris yapıda gözeneklerin büyük çaplı oluşumlar şeklinde geliştiği görülmektedir. AT2 karışımında %50 FA+ %50 CA oranlarında Alapietra taşı yer alıp, AT3 karışımında ise bu oranlar %70 FA+ %30 CA'dır. Eş değer Alüminyum oranlı ancak yüksek oranda ince boyut Alapietra taşı kullanımlı karışımda (AT3) gözenek çapı

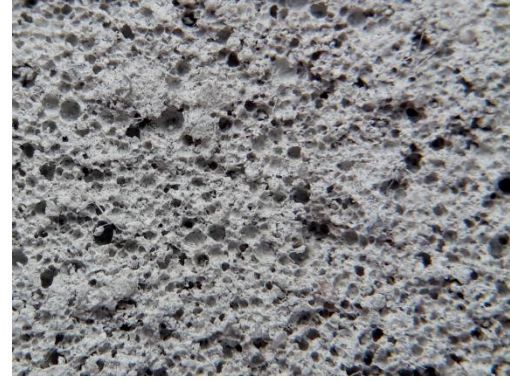
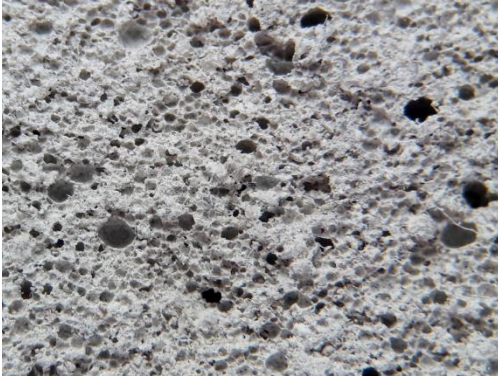
oluşumlarının AT2'ye göre daha düşük düzeyde olduğu gözlenmiştir. Matris yapıyı görüntülemek üzere mikroskop ortamında çekimi yapılan tüm fotoğraflar dijital bir formatta ayrı ayrı dijital görüntüleme ve piksel renk analizlerinin yapılabildiği bir paket program yazılımı ile analiz edilmiştir. Bu amaçla entegre bir coğrafi bilgi sistemi olan ArcGIS™ yazılımı (Töreyen ve ark., 2010) kullanılmıştır. Dijital fotoğraflaması yapılan tüm numunelerin fotoğrafları ArcGIS™ programında açılmış ve bir görüntüde bir noktanın (grid code) yüzdesel dağılımının hesaplanması amacıyla ilk olarak fotoğraf piksellerine ayrılmıştır. Sonrasında analizi yapılacak fotoğraf bölümünde, farklı piksel renkleri söz konusu ise bu bölge en az 7 ayrı piksel ile tanımlatılarak, taraması yapılan dijital fotoğrafın toplam yüzeyindeki bu piksellerin yüzdesel dağılımları programda hesaplatılmıştır. Elde edilen bu yüzdesel dağılımın toplam değeri, analizi yapılan piksel renklerinin temsil ettiği koşul/durum için matris yapıdaki ağırlıklı yer alma oranı olarak değerlendirilmiştir. Özetle tanımlanan bu dijital görüntüleme tekniğiyle matris yapıdaki gözeneklilik oranları (dijital fotoğraf üzerinde gözeneklerin gözlemlendiği bölümler, bu bölümde yer alan en az 7 adet ayrı piksel rengin fotoğraf üzerinde tanımlanması) analiz edildiğinde, program çıktısında elde edilen piksel renklerin toplam yüzdesel değeri AT3 karışımı için %54.9, AT2 karışımı için ise %51.9 olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda AT3 karışımının AT2 karışımına göre yaklaşık %3 oranında daha az gözenek oluşturduğu belirlenmiştir. Bu da doğal olarak matrisin birim kütlelerinin daha yüksek değerinde olmasını sağlayacaktır. Bu karışımlarda LÇPT'nin katkı miktarı düşük olduğu için, malzemenin genleşme olgusunu bastırıcı veya önleyici bir davranış sergilemediği ve ayrıca büyük çaplı gözeneklerin oluşmasına da engel teşkil etmediği görülmüştür. Kullanılan LÇPT miktarının, karışımda Alapetra taşının çimentolu kekin oluşumunda yüzeyde birikimini ve ayrışmasını önleyerek, matris yapıda ana agrega rolü üstlenmesini sağlamıştır. Bununla birlikte bu matris yapıda oluşan gözeneklerin heterojen bir dağılım sergilediği ve yer yer gözenekler arası geçişlerin oluşabildiği, diğer bir deyişle bağlantılı boşluklu bir matris formu olduğu görülmüştür. Bu davranış, malzemenin mukavemet değerinin de göreceli olarak zayıflayacağını temsil etmektedir.



Şekil 7. AT4 örneği matris yapısı genel görünümü. Şekil 8. AT6 örneği matris yapısı genel görünümü.

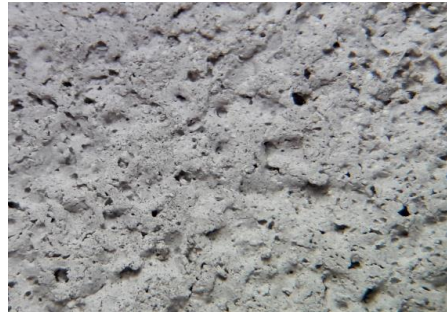
Şekil 7 ve Şekil 8, AT4 ve AT6 karışım tasarımlı test örneklerine aittir. Bu her iki karışımda ağırlıkça %0.10 alüminyum tozu kullanılmış olup, genleştirici ajan miktarı karışımda düşmüştür. Ayrıca, AT4 karışımında %30 FA+%70 CA oranlarında Alapetra taşı kullanılmış olup, AT6 karışımında ise bu oranlar %70 FA+%30 CA'dır. Otoklavsız gazbeton örneklerinin genleşmesinde alüminyum tozunun %0.13'lük oranına kıyasla bu karışımlarda daha az etkin olduğu görülmektedir. Matris yapıda oluşan gözeneklerin, genleştirici ajan alüminyum miktarı azaldıkça hem oranı hem de gözenek büyüklüklerinin azaldığı görülmektedir. Ancak, gözeneklerin matris yapıda, bir önceki seri karışımlara kıyasla daha düzenli bir form kazanmaya başladıkları görülmüştür. Bu davranışta, alüminyum tozu miktarının etkinliği önemli olduğu kadar, karışımda yer alan Alapetra taşı boyut oran dağılımı ve ayrıca LÇPT'nin katkı miktarı da önem arz etmektedir. Matris yapı mikroskopik görsellerinin ön analiz değerlendirmelerine göre Alapetra taşı tane boyutu incelidikçe ve eş zamanlı bu boyuttaki malzemenin kullanım oranı arttıkça, karışımda artan LÇPT miktarıyla birlikte daha düzenli ve daha küçük çaplarda gözenek oluşumları meydana gelmiştir. ArcGIS™ yazılımı kullanılarak dijital görüntüleme tekniğiyle gözenekleri temsil eden piksel renklerinin program üzerinde tanımlatılarak taranması sonucu program çıktısında elde edilen piksel renklerin toplam yüzdesel değeri AT4 karışımı için %50.2, AT6 karışımı için ise %45.7 olarak belirlenmiş olup, AT6 karışımının AT4 karışımına göre yaklaşık %4.5 oranında daha az gözenekli yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, oluşan

gözeneklerin bir önceki serideki gözenek olgusunda gözlemlenen bağlantılı boşluklu formun kısmen bu karışım tasarımlarında minimize olmaya başladığı da ayrı bir bulgu olarak kaydedilmiştir. Bu da malzeme yapısını daha kompakt bir form kazanmasına ve mukavemet değerinin iyileşmesine de katkı sağlamaktadır.



Şekil 9. AT7 örneği matris yapısı genel görünümü. Şekil 10. AT8 örneği matris yapısı genel görünümü.

Şekil 9 ve Şekil 10, AT7 ve AT8 karışım tasarımlı test örneklerine aittir. Bu her iki karışım da genleştirici ajan miktarı ağırlıkça %0.02 oranında düşürülerek %0.08 oranında kullanılmıştır. Matris yapıda mikroskobik olarak çok sayıda küçük gözenek oluşumlarının varlığı genleştirici ajanın oranının düşüşü açıkça fark edilmektedir. AT7 karışımında %30 FA+%70 CA oranlarında Alapetra taşı kullanılmış olup, AT7 karışımında ise bu oranlar %50 FA+%50 CA'dır. Bu her iki karışım da eşdeğer oranda alüminyum toz oranı kullanılmış olmasına rağmen, AT7 örneğinde görüldüğü üzere AT8'e kıyasla CA agrega miktarının daha yüksek oluşu, matris yapıda yer yer daha büyük gözenek oluşumu meydana getirmiştir. Bu gözeneklerin toplam matris içerisinde daha düzensiz bir saçılımda yer aldığı da dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, bu karışım grubunda LÇPT katkı miktarının da önceki diğer karışım gruplarına oranla %3 birimlik artışla, Alapetra tanelerinin yoğunluk ayrışması oluşturmaksızın daha düzenli bir dağılım sergilemesini mümkün kılmıştır. Bu çalışma kapsamında LÇPT katkı oranının optimum kullanımının tespiti ile Alapetra tanelerinin yoğunluklarının düşük ve doğal gözenekliliğine rağmen, çimentolu kek malzemenin oluşumunda yüzeyde birikme oluşturmada ve taneler arası ayrışması olmaksızın homojen özellikli bir karışım elde edilebildiği tecrübe edinilmiştir. Yukarıda da özetle tanımlandığı üzere, ArcGIS™ yazılımı kullanılarak dijital görüntüleme tekniğiyle gözenekleri temsil eden piksel renklerinin program üzerinde tanımlatılarak taranması sonucu program çıktısında elde edilen piksel renklerin toplam yüzdesel değeri AT7 karışımı için %48.4, AT8 karışımı için ise %44.6 olarak belirlenmiş olup, AT7 karışımının AT8 karışımına göre yaklaşık %3.8 oranında daha az gözenekli yapıya sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, genleşme oranları arasında da %2.6'lık bir fark oluşmuştur. Fotoğraf analizlerinde yüzdesel piksel yoğunluk oranı analiziyle elde edilen veriler irdelendiğinde alüminyumun tozunun, LÇPT katkı oranının bu karışımlardaki kullanım düzeyleri, matris yapıdaki gözeneklerin yaklaşık %85'e yakınının bağlantısız boşluklu form oluşmasına ve daha homojen bir karakteristik sergilemesine sebep olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Gözenek çaplarının düşüşü ve gözeneklilik oranının da azalması, matris yapının kısmen yoğunluğunun artmasına ve dayanım değerinin iyileşmesini sağlamıştır.

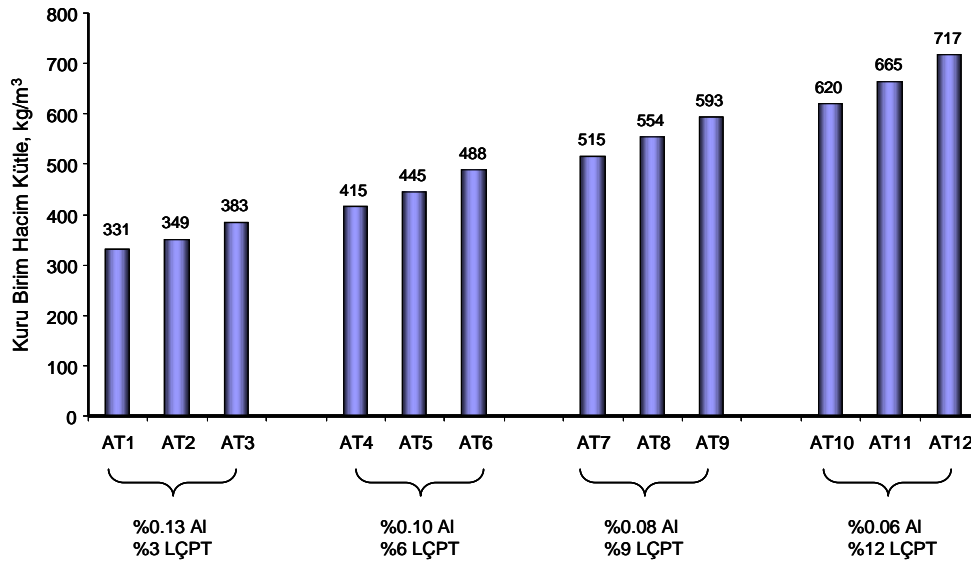


Şekil 11. AT12 örneği matris yapısı genel görünümü.

Şekil 11 AT12 kodlu karışım tasarımını temsil etmektedir. Bu karışımında geliştirici ajan miktarı çalışma kapsamında uygulanan en düşük oran olup ağırlıkça %0.06'dır. Ayrıca LÇPT katkı oranının %12 gibi en yüksek oranda kullanımı, matris yapının görselinde de görüldüğü üzere genişlemenin çok çok daha düşük düzeylerde gerçekleştiği görülmektedir. Bu karışım tasarımında LÇPT'nin yüksek kullanım oranı, karışımında katkı bünyesinde yer alan selüloz lif oranının varlığının artmasına paralel olarak, Alapetra taşının yaş taze harçtaki davranışını daha baskın hale getirerek, oluşan kimyasal reaksiyonlar etkisinde ATAOG örneğinin yeterince genişmesini baskılamıştır. Bu sebeple, çok daha düşük gözenek çaplı ve düşük gözeneklilik oranında bir matris oluşmakta ve hemen hemen daha dolu forma yakın bir yapısal özellik sergilemektedir. Bu durum, ATAOG test numunesinin birim ağırlığının artırmış ve daha mukavemetli bir yapısal özellik kazandırmıştır.

3.2. Yoğunluk, gözeneklilik ve genişleme oranı

Tüm ATAOG test numunelerinin karışım bileşenlerine bağlı 28 gün sonrası etüv kurusu birim hacim kütle değerleri analiz edilmiş olup, bulgular Şekil 12'de verilmiştir.

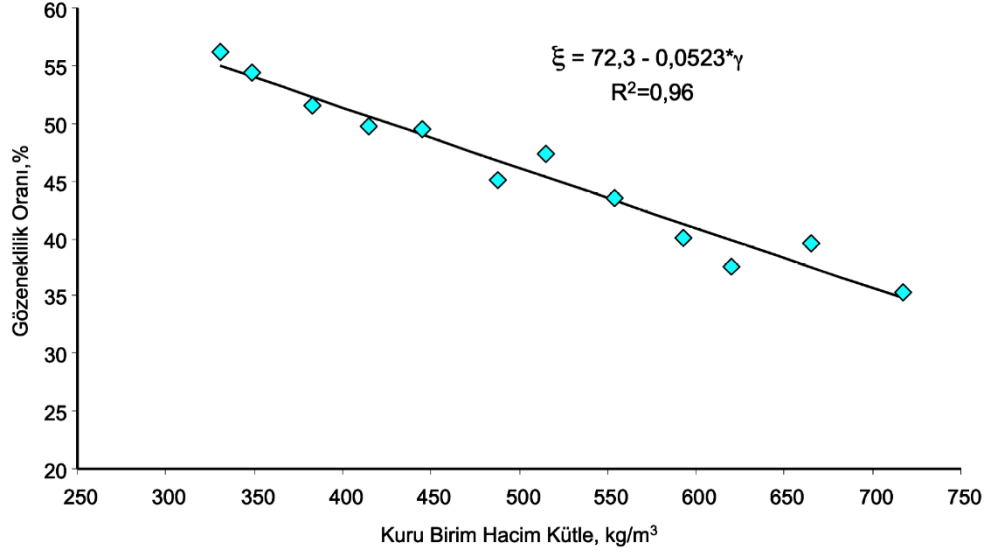


Şekil 12. ATAOG test numunelerinin birim hacim kütle analizi.

Karışımında alüminyum oranı düştükçe, kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan matris yapının yoğunluk değeri artmaktadır. Alüminyum tozunun (Al) geliştirici katkı ajanı olarak kullanımı, gözenek oluşumuna etken en önemli parametre olarak görülmektedir. Al oranı arttıkça, matris yapı daha fazla oranda genişmekte, daha gözenekli bir form kazanmakta ve buna bağlı olarak yoğunluk düşüşüyle birlikte malzeme hafiflemektedir. AT1 – AT3 karışım grubunda kuru birim hacim kütle “ γ ” değerleri 331-383 kg/m³ aralığında değişmiştir. Bu grupta karışım tasarımında ince boyut Alapetra taşı oranı AT1’den AT3’e doğru sırasıyla ağırlıkça %30, %50 ve %70 oranında volkanik agrega harmanında değişmiştir. İnce boyut agrega oranı arttıkça, tasarımında kullanılan LÇPT ve CaO oranlarının da etkisiyle kısmen daha düşük genişmeler oluşmuş ve matris yoğunluğu göreceli olarak artmıştır. Bu grup içerisinde ince boyut Alapetra taşı kullanım oranının %40 artışı, malzeme yoğunluğunu yaklaşık %15.7 artırmıştır. Diğer üç karışım grubunda da benzer etkileşim gözlenmiş olup, sırasıyla, AT4 – AT6 örneklerinde yoğunluk değişimi 415-488 kg/m³, AT7 – AT9 örneklerinde yoğunluk değişimi 515-593 kg/m³ ve AT10 – AT12 örneklerinde ise yoğunluk değişimi 620-717 kg/m³ aralığındadır. Buradan görüldüğü üzere, karışımındaki Al tozu, CaO ve LÇPT oranları optimize edildiğinde 4 ayrı yoğunluk sınıfında gazbeton örnekleri elde edilebilmektedir. Sektörel uygulamalarda kâgir birim olarak kullanılacak malzemelerin özellikle yoğunluk değerleri gerek teknik özelliklerinin değişiminde gerekse uygulama alanının tanımlanmasında ayrı bir önem arz eder. Bu bağlamda, genel bir eğilim olarak kâgir birimler için yoğunluk sınıfları 350±50 kg/m³ (I.grup); 450±50 kg/m³ (II.grup); 550±50 kg/m³ (III.grup)

ve $650 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ (IV.grup) olarak öngörülebilmektedir. Çalışma kapsamında ATAOG test örneklerinin bu dört ayrı grupta yer alabilecek malzeme yoğunlukları elde edilebildiği görülmüştür.

Atmosfer basıncı altında 96 saat su emme sonucu ATAOG test örneklerinin suya doygun hale gelerek değişmez kütleyle ulaştığı belirlenmiş ve bu süre sonunda su emme oranı değerleri, bu çalışma programında test örneklerinin gözeneklilik oranları “ ξ ” olarak kabul edilmiştir. Buna göre, test örneklerinin karışımındaki Al, CaO ve LÇPT kullanım oranına bağlı olarak %35.3 - %56.2 aralığında değişmiştir. Al oranı arttıkça gözeneklilik oranı da artış eğilimindedir. Diğer bir yaklaşımla, dijital görüntüleme ve analiz tekniğiyle gözenekleri temsil bölgeler için piksel yoğunluğu olarak tanımlanmış sayısal değerlerin de çok düşük bir sapma değeriyle deneysel olarak tespit edilen bu gözeneklilik oran değerlerine yakınsak sonuçlar oluşturduğu da gözlemlenmiştir. Tüm test numunelerinin gözeneklilik değişimi ve matris yapının birim hacim kütlesi “ γ ” ilişkisi Şekil 13’te analiz edilmiştir.

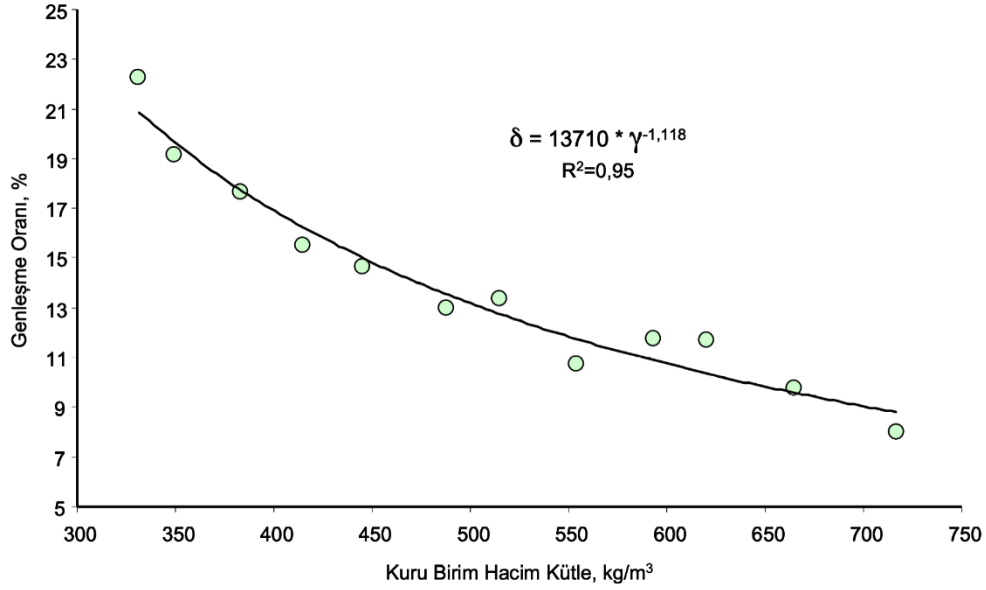


Şekil 13. Birim hacim kütle – gözeneklilik ilişkisi.

Test örneklerinin birim hacim kütlesi arttıkça, gözeneklilik oranı düşmektedir. Birim ağırlık değişimi ile gözeneklilik oranı arasında lineer kabul edilebilecek bir ilişkinin varlığı burada dikkat çekmektedir. Düşük yoğunlukta bir otoklavsız gazbeton malzeme kullanımı ihtiyaç duyulduğunda, gözenekliliği yüksek bir matris yapı ve karışım bileşiminde de daha yüksek oranda Al genleştirici katkı ajanı kullanımının gerek duyulduğu görülmektedir. Alapetra taşı tane boyut aralığı ve kullanım oranı ile LÇPT katkı oranı optimize edildiğinde gerek gözeneklilik gerekse yoğunluk değeri dengelenebilir bir özellik oluşturmaktadır. Gazbeton örneklerinin üretim sürecinde matris yapılarının gözenekliliğine etken olan bir diğer durum ise döküm işlemi sonrası oluşan genleşme miktarıdır. Genleşme oranı yüksek olan karışım tasarımları, gözenek çapları görece daha büyük ve daha yüksek gözeneklilik oranına sahip malzeme matrislerinin oluşumunu mümkün kılmaktadır. Çalışmada tasarımı analiz edilen dört ayrı karışım grubundaki ATAOG test örneklerinin genleşme oranları “ δ ” sırasıyla, %22.26-%17.68, %15.33-%13.00, %13.34-%11.77 ve %11.69-%8.00 aralığında azalarak değişmektedir. Al oranı azaldıkça genleşmede azalmıştır. Ancak eşdeğer Al kullanım oranlı karışımlarda ince boyut Alapetra taşı oranı arttıkça, genleşme oranı düşmüştür. İnce boyut agreganın birim yoğunluğunun iri boyutlu formuna göre daha yüksek olması, kimyasal reaksiyon sürecinde genleşmesini azaltıcı yönde etkilemektedir. Yüksek genleşme olgusu beklenen karışımlar için agreganın birim yoğunluk değerinin düşük olması önem kazanmaktadır. Bu bağlamda, çalışmada elde edilen tüm örneklerin belirlenen genleşme oranları “ δ ” ile malzeme yoğunlukları “ γ ” arasındaki ilişki Şekil 14’de grafiksel olarak verilmiştir.

Şekil 14 irdelendiğinde görüldüğü üzere, örneklerin γ değeri arttıkça genleşme oranları lineer olarak azalmıştır. Ancak, malzeme yoğunluğu özellikle 650 kg/m^3 ve üzeri değerlere ulaştığında genleşme oranındaki azalış eğilimi de daha istikrarlı hale gelmektedir. Genleşme davranışı düşük olan test örneklerinin gözeneklilik oranının da beklenildiği üzere düştüğü tespit edilmiştir. Bununla birlikte, düşük genleşme olgularına sahip matris yapılarında daha homojen gözenek dağılımları oluşmakta ve

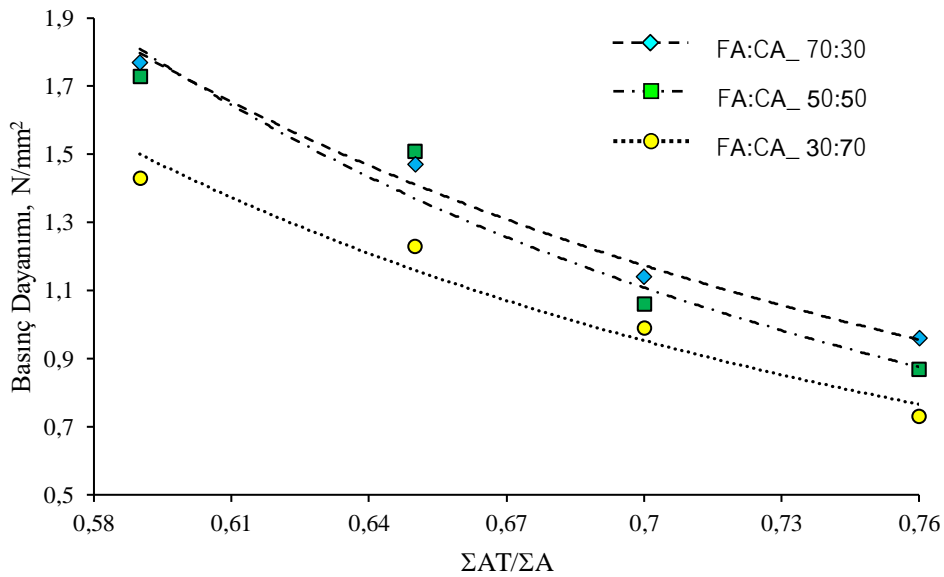
kapalı gözenek olgusunun artmasına paralel olarak gözenekler arası geçişin de önemli ölçülerde azaldığı belirlenmiştir. Bu olgu, malzeme yapısına aynı zamanda mukavemet kazandırmakta olup, taşıyıcılık özelliğini artırmaktadır.



Şekil 14. Birim hacim kütle – genleşme oranı ilişkisi.

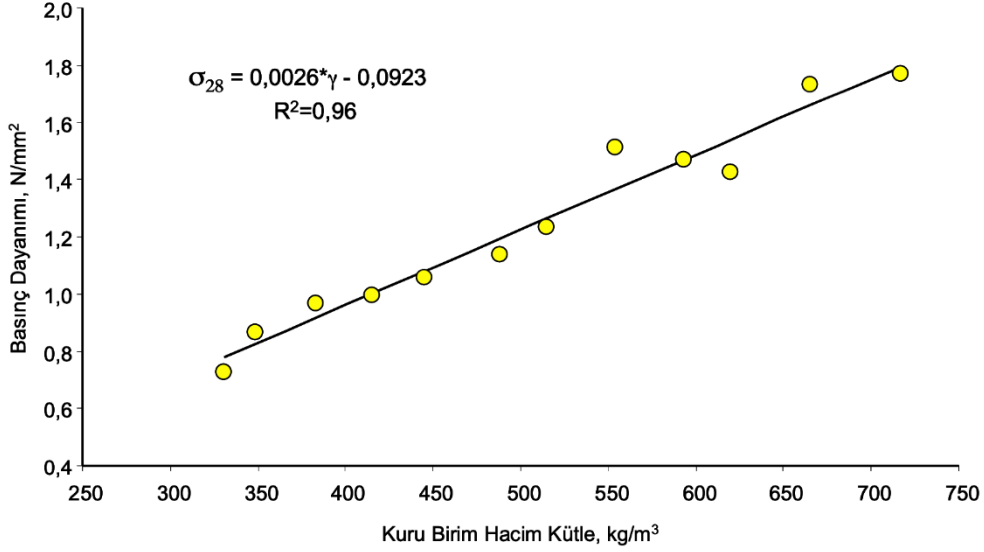
3.3. Basınç dayanımı

Kâgir duvar elemanı olarak kullanılacak yapı elemanlarında basınç dayanım özelliği, taşıyıcılık karakteristiğini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerdendir. Tüm ATAOG test örneklerinin elde edilen basınç dayanım değerleri irdelendiğinde dayanıma etkileyen ana parametreler olarak karışımda bulunan Alapetra Taşı (ΣAT) ve agregaların toplamına (ΣA) oranı " $\Sigma AT/\Sigma A$ ", birim hacim kütle, oluşan gözeneklilik ve genleşme oranı değişimdir. ATAOG test örneklerinin dayanım değerleri karışımdaki Al, CaO ve LÇPT kullanım oranına bağlı olarak $0.73 \text{ N/mm}^2 - 1.77 \text{ N/mm}^2$ aralığında değişmiştir. Yapılan analizlerde $\Sigma AT/\Sigma A$ oranı değişimine bağlı basınç dayanım ilişkisi Şekil 15'de verilmiştir.



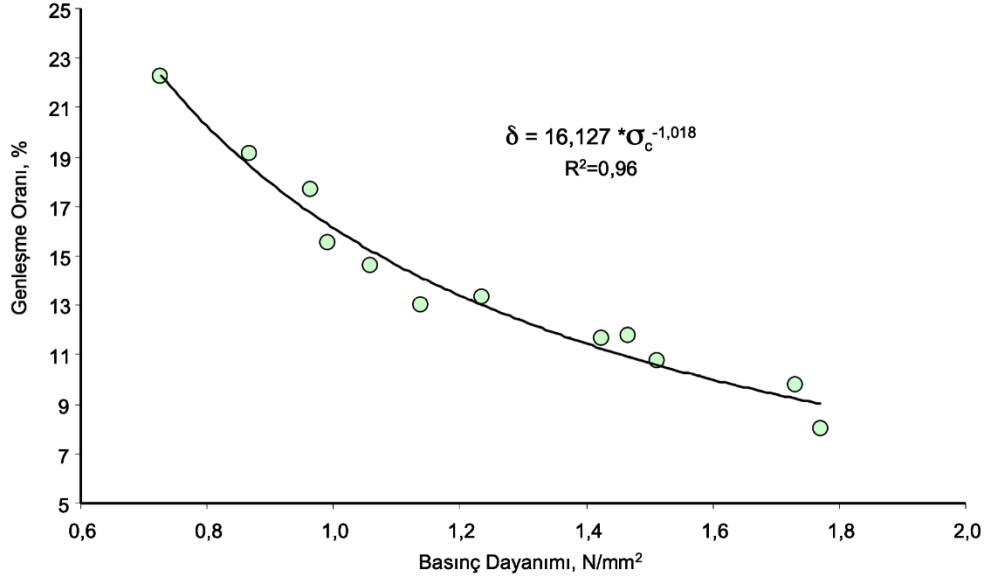
Şekil 15. $\Sigma AT/\Sigma A$ oranı – basınç dayanımı ilişkisi.

$\Sigma AT/\Sigma A$ oranı arttıkça genel eğilim olarak basınç dayanımı düşmektedir. Ancak, karışımdaki FA:CA oranlarındaki değişim, test örneğinin dayanımını etkilemektedir. Karışımda CA oranı arttıkça dayanım değeri düşmektedir. Örneğin, eşdeğer Al, CaO ve LÇPT kullanım oranı AT1-AT3 karışım grubunda, %70 CA oranlı test örneğinin dayanımı 0.73 N/mm^2 iken %30 CA oranlı test örneğinin dayanımı 0.96 N/mm^2 'dir. CA kullanım oranının artışı buradaki test örneklerinin dayanımı yaklaşık %31.5 oranında düşürmüştür. Benzer karakteristik davranış, diğer karışım gruplarında da görülmüştür. Basınç dayanımındaki bu zayıflamanın sebebi, CA agreganın tane iriliği sebebiyle matris yapıda daha yüksek çaplarda gözenek oluşması ve malzemenin daha kırılğan bir davranış kazanmasıdır. Bununla birlikte test örneğinin birim hacim kütle " γ " değişimi de dayanımını doğal olarak etkileyen bir diğer faktör olarak görülmektedir. Tüm test örneklerinin 28 gün sonrası basınç dayanımı " σ_{28} " ile yoğunluk değerleri arasındaki değişim Şekil 16'de verilmiştir.



Şekil 16. Birim hacim kütle – basınç dayanımı ilişkisi.

Birim hacim kütle arttıkça, test örneklerinin basınç dayanımı da artmaktadır. Malzeme matrisi daha mukavemet kazanmaktadır. Bu analizde elde edilen istatistiksel yaklaşımla, Alapetra taşı kullanımlı gazbeton örneklerinin uygulama yerine uygunluk durumunu etüt etmek amacıyla yoğunluk – dayanım değeri arasındaki etkileşimlerin kestirimi yapılabilir. Diğer bir analiz irdelemesinde ise matris yapının basınç dayanım değeri arttıkça, bu matris yapının üretimi sırasında genleşme davranışının daha düşük düzeylerde olduğu tespit edilmiştir. Bu karakteristik davranış ise Şekil 17'de irdelenmiştir.



Şekil 17. Basınç dayanımı – genleşme davranışı etkileşimi.

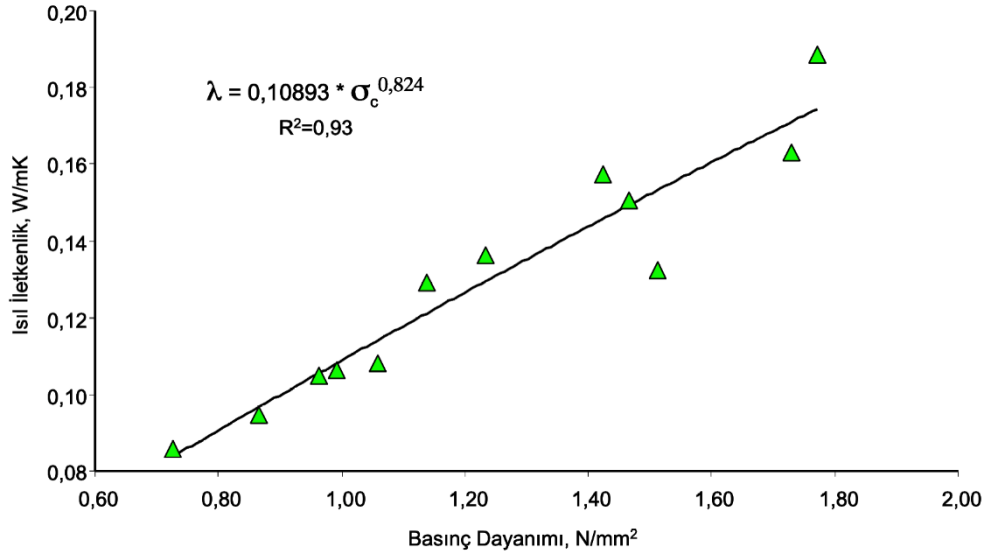
Şekil 17 irdelendiğinde görüldüğü gibi, Alapietra taşı kullanımlı gazbeton örneklerinin genleşme davranışında genleşme oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü ve daha zayıf karakteristikte bir matris yapı kazandığı görülmüştür. TS EN 771-4 “Kâgir birimler - özellikler - Bölüm 4: Gazbeton kâgir birimler” standardı ve ilgili standartları irdelendiğinde, gazbetonun kâgir duvar elemanı olarak basınç dayanım değerinin $1,5 \text{ N/mm}^2$ ’den daha az olmaması (TS EN 771-4 Madde 5.5) öngörülmüştür. Diğer taraftan, uygulama ve kullanım amacı dikkate alındığında gazbeton blok elemanlarını inşaat endüstrisinde hafif agregalı betondan mamul hafif yapı elemanı kâgir duvar bloklarına benzer ürünler olarak da düşünmek mümkündür. Bu bağlamda, hafif agregalar kullanılarak üretilmiş betonların dayanım değerleri esas alınarak RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures - Uluslararası İnşaat Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği*) (RILEM, 1978) tarafından oluşturulan teknik dokümantasyonlarda üç farklı beton uygulama alanı sınıflandırılmıştır. Bunlar: Sınıf I “Yapısal betonlar-Taşıyıcı özellikteki betonlar”, Sınıf II “Yapısal ve Yalıtım amaçlı betonlar” ve Sınıf III “Dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar”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 öngörülmüştür (RILEM, 1978). Bu teknik değer limitleri Çizelge 4’de verilmiştir. Çalışmada ATAOG test örnekleri için elde edilen basınç dayanım değerlerinin hiçbiri Sınıf I yapısal beton ve Sınıf II yapısal ve yalıtım amaçlı beton dayanım gereksinimlerini karşılamamıştır. ATAOG test örneklerinin bu çalışmada basınç dayanımları $0,73 \text{ N/mm}^2 - 1,77 \text{ N/mm}^2$ aralığında olduğu için örneklerin tamamı ancak Sınıf III dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar için öngörülen dayanım limitlerini sağladığı görülmektedir. TS EN 771-4 Madde 5.5’de gazbeton elemanlar için öngörülen minimum $1,5 \text{ N/mm}^2$ ’lik basınç dayanım değerinin AT8, AT11 ve AT12 karışım tasarımlarında elde edildiği görülmüştür. Diğer taraftan, RILEM limitlerine göre dolgu ve yalıtım amaçlı hafif betonlar için minimum öngörülen dayanım değerinin $> 0,5 \text{ N/mm}^2$ ’lik değeri esas alındığında, ATAOG test örneklerinin hazırlanmasında kullanılan karışım tasarımları ve karışım bileşenlerinin kullanımıyla elde edilen otoklavsız gazbeton birimlerin dolu formda duvar örgüsünde dolgu ve/veya yalıtım amaçlı kâgir blok elemanların uygulanmasında kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışma kapsamında irdelenen karışım tasarımları ile ancak taşıyıcı olmayan özellikte otoklavsız gazbeton elemanları üretilebileceği öngörülebilmektedir. Çalışma kapsamında tasarımılanan karışımlara, otoklavsız koşullarda kürlenme sürecinde gazbeton harcının mukavemetini artırıcı farklı özelliklerdeki katkı maddeleri ilave edildiğinde, burada elde edilen mukavemet değerlerinden görece daha yüksek değerlerin elde edilebileceği de öngörülebilmektedir.

Çizelge 4. 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

3.4. Isı iletkenlik

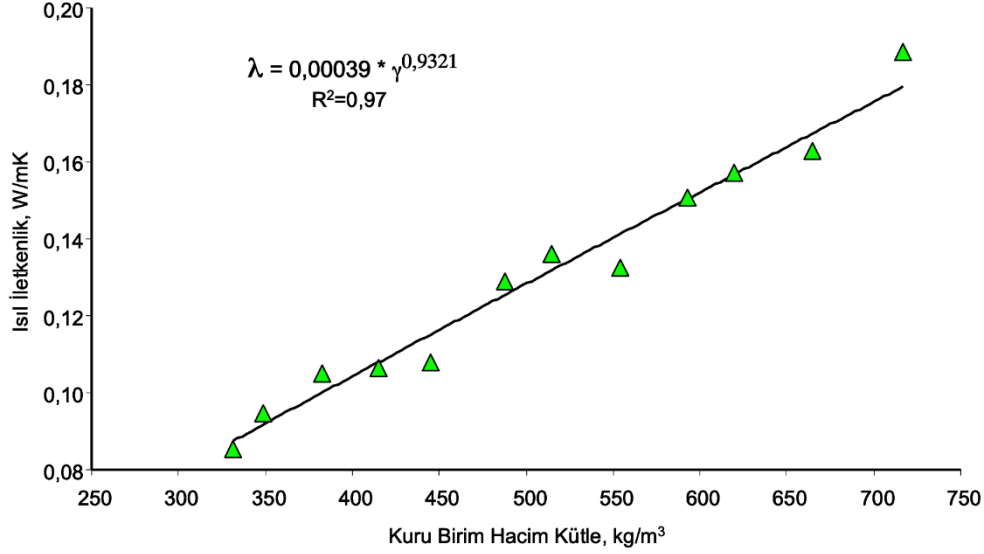
Alternatif karışım bileşenleri ve üretim yöntemleri ile üretilmiş gazbeton kagir elemanların binalarda taşıyıcı olmayan dolgu duvar ve yalıtım amaçlı uygulamalarında ürün olarak kullanımları dünyada yaygın bir uygulamadır (Ropelewski & Neufeld, 1999; Melnyk ve ark., 2013; Poznyak & Melnyk, 2014; Walczak ve ark., 2015; Koutný & Opravil, 2016). Plaka normlu olarak dökümleri yapılmış ATAOG test örneklerinin ısı iletkenlik değerleri analizlerle belirlenmiş olup, Al, CaO ve LÇPT kullanım oranına bağlı olarak 0.086 W/mK – 0.189 W/mK aralığında değişmiştir. Çalışmada tasarımı analiz edilen dört ayrı karışım grubundaki ATAOG test örneklerinin ısı iletkenlik değerleri sırasıyla 0.086 W/mK – 0.105 W/mK (AT1-AT3:1. grup), 0.107 W/mK–0.129 W/mK (AT4-AT6: 2. grup), 0.136 W/mK – 0.151 W/mK (AT7-AT9: 3. grup) ve 0.157 W/mK–0.189 W/mK (AT10-AT12: 4. grup) elde edilmiştir. Karışımındaki Al oranı arttıkça, artan gözeneklilik, azalan birim hacim kütle değerine bağlı olarak ısı iletkenlik değerinin de azaldığı görülmektedir. Test örneğinin ısı iletkenlik değerinin düşük olması, o malzemenin alternatiflerine göre daha yüksek ısı yalıtım özelliği sergileyebileceğini temsil eder. Örneğin betonun ısı iletkenlik değeri yoğunluğuna ve iç bileşenlerine bağlı olmak şartıyla, 0.58 W/mK’den 3.85 W/mK’e kadar yükselebilir (Asadi ve ark., 2018). Isı yalıtım amacıyla kullanımı olan köpük betonun ısı iletkenlik değerleri, 1100 kg/m³ birim ağırlığa kadar 0.40 W/mK’e kadar düşebilmektedir (Asadi ve ark., 2018). Bu bağlamda, kagir elemanlar ile oluşturulan duvarların ısı yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesi, duvar örgüsünde kullanılan elemanın ısı iletkenlik değerinin mümkün olduğunca düşük değerlerde olması avantaj sağlar. Bu nedenle, ATAOG test örneklerinden düşük ısı iletkenlik değeri sağlayan karışımlar, daha yalıtımlı karışım tasarımları olarak düşünülebilir. Ancak, bu ürünlerin dayanım değerleri dikkate alındığında ise tersine bir karakteristik sergileyebilmektedir. Diğer bir deyişle, genel bir eğilim olarak ısı iletkenlik değeri iyileşen bir malzemenin, gözeneklilik oranının da artışına paralel olarak dayanımı düşmektedir. Bu olgu ATAOG test örnekleri için analiz edilmiş olup, bulgular Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. Basınç dayanımı – ısı iletkenlik davranışı etkileşimi.

Şekil 18 irdelendiğinde basınç dayanımı arttıkça, ısı iletkenlik değeri de artmaktadır. Bu grafiksel analizde tecrübe edinilen yaklaşım, Alapetra taşı ve benzeri kayaların agrega olarak kullanıldığı otoklavsız gazbeton karışımlarının belirlenmiş dayanım değerlerine bağlı ısı iletkenlik

değeri kestirimi yapılabilecektir. Gazbeton örneklerinin ısı iletkenlik değeri basınç dayanım değeri bir fonksiyonu olarak ilişkilendirildiği kadar, benzer bir olgu kuru birim hacim kütle değeri ile de ilişkilendirilebilmektedir. Bu yaklaşımın grafiksel gösterimi ise Şekil 19’da verilmiştir. Çalışma bulgularına göre TS EN 771-4 standardında öngörülen minimum 1.5 N/mm² basınç dayanım limiti dikkate alındığında AT8 karışımı 1.51 N/mm²’lik basınç dayanımı ve 0.132 W/mK’lik ısı iletkenlik değeri ile en iyi karışım olarak öngörülebilir. Kâgir blok elemanların ısı iletkenlik değeri düşük olması, eşdeğer bir genişlikteki daha yüksek ısı iletkenlik değerine sahip başka bir blok elemana göre daha yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır. Kâgir blok elemanlarıyla örülmüş duvar birimlerin enerji verimliliği dikkate alındığında, RILEM limitlerine göre AT5 karışımının sağladığı basınç dayanımı >1 Nmm²’lik değeri ile diğer karışımlar arasında daha avantajlı bir karışım tasarımı oluşturduğu düşünülebilir.



Şekil 19. Kuru birim hacim kütle – ısı iletkenlik davranışı etkileşimi.

ATAOG test örneklerinin birim hacim kütle değeri arttıkça ısı iletkenlik değeri de lineer bir eğilimle artmaktadır. Diğer bir deyişle ısı yalıtım değeri kötüleşmektedir. Diğer bir eğilim ise karışımdaki $\Sigma AT/\Sigma A$ oranı arttıkça (daha fazla volkanik esaslı ve gözenekli agrega kullanıldıkça) gazbeton örneklerinin ısı iletkenlik değeri düşmektedir. RILEM (1978) dokümantasyonunda duvar örgüsünde dolgu veya yalıtım amaçlı kullanılacak kâgir blok elemanları için öngörülen ısı iletkenlik limiti <0.30 W/mK’dir (Çizelge 4). ATAOG test örneklerinin tamamı RILEM’in öngördüğü bu teknik limiti karşılamaktadır. Ancak, yalıtım performansının daha yüksek düzeylerde olduğu duvar birimi elde edebilmek için birim ağırlığı düşük, gözeneklilik oranı yüksek ve homojen bir matris karakteristiğine sahip gazbeton kâgir birimin kullanımı önem kazanmaktadır. 18 Aralık 2013 tarihli TS 825 (2013) standardının revizyonunda farklı derece gün bölgeleri bağlamında Türkiye 5 ayrı ısı bölgesi olarak tanımlanmıştır. Bu bölgelere göre en fazla değer olarak kabul edilmesi tavsiye edilen ısı geçirgenlik U değerleri 1. Bölge için $U \leq 0.66$ W/m²K, 2. Bölge için $U \leq 0.57$ W/m²K, 3. Bölge için $U \leq 0.48$ W/m²K, 4. Bölge için $U \leq 0.38$ W/m²K ve 5. Bölge için $U \leq 0.36$ W/m²K olarak öngörülmüştür. Bu limit değerlere göre, ATAOG karışım tasarımlarıyla 20 cm genişlikte kâgir blok üretimi düşünüldüğünde elde edilen ısı iletkenlik değerleri bağlamında AT1 – AT9 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilecek kâgir blok elemanların 1. Bölge için gerekli olan U limit değerlerini sağladığı görülmektedir. Bununla birlikte, AT1 – AT6 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilecek kâgir blok elemanların ise 2. Bölge için, AT1 – AT3 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilecek kâgir blok elemanların ise 3. Bölge için gerekli olan U limit değerlerini sağladığı görülmektedir. 20 cm genişliğindeki ATAOG karışım tasarımlarıyla üretilecek kâgir blok elemanlarının 4. ve 5. Bölge için öngörülen U değerlerini sağlayamadıkları belirlenmiştir. Ancak, 20 cm genişlik yerine kâgir blok elemanları 25 cm genişlikte üretildiğinde artan ısı direnç sebebiyle AT1 – AT3 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilecek kâgir blok elemanların 4. Bölge için, ayrıca AT1 – AT2 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilecek kâgir blok elemanların ise 5. Bölge için

gerekli olan U limit değerlerini sağlayabileceği öngörülmektedir. Buradaki ısı geçirgenlik U değerleri hesabı, kâgir blok elemanların yalın ve sıvasız formda kullanılmaları durumu için değerlendirilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Alaçatı taşı ocak kesim artığı olarak nitelendirilen malzemenin otoklavsız gazbeton üretiminde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre;

1. Gazbeton harcında hafif agrega kullanıldığında, bu agregaların yoğunluğu sebebiyle yaş harç içerisinde yüzeye çıktığı ve yaş harcın genellikle heterojen bir yapıya büründüğü tecrübe edilmiştir. Bu sorunu bertaraf etmek için karışım dizaynında LÇPT kullanılmıştır. Bununla birlikte LÇPT'nin malzemenin genleşme olgusunu bastırıcı veya önleyici bir davranış sergilemediği ve ayrıca büyük çaplı gözeneklerin oluşmasına da engel teşkil etmediği görülmüştür.
2. Karışımlarda alüminyum tozu kullanım oranının artması beklendiği gibi gözenek oranını ve gözenek boyutunu artırmıştır.
3. Sektörel uygulamalarda kâgir birim olarak kullanılacak malzemelerin özellikle yoğunluk değerleri gerek teknik özelliklerinin değişiminde ve gerekse uygulama alanının tanımlanmasında ayrı bir önem arz eder. Bu bağlamda, genel bir eğilim olarak kâgir birimler için yoğunluk sınıfları $350 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ (I. grup); $450 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ (II. grup); $550 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ (III. grup) ve $650 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ (IV. grup) olarak öngörülebilmektedir. Çalışma kapsamında ATAOG test örneklerinin bu dört ayrı grupta yer alabilecek malzeme yoğunlukları elde edilebildiği görülmüştür.
4. Çalışmada tasarımı analiz edilen dört ayrı karışım grubundaki ATAOG test örneklerinin genleşme oranları “δ” sırasıyla, %22.26-%17.68, %15.33-%13.00, %13.34-%11.77 ve %11.69-%8.00 aralığında azalarak değişmektedir. Al oranı azaldıkça genleşmede azalmıştır. Ancak eşdeğer Al kullanım oranlı karışımlarda ince boyut Alapetra taşı oranı arttıkça, genleşme oranı düşmüştür. İnce boyut agreganın birim yoğunluğunun iri boyutlu formuna göre daha yüksek olması, kimyasal reaksiyon sürecinde genleşmesini azaltıcı yönde etkilemektedir. Yüksek genleşme olgusu beklenen karışımlar için agreganın birim yoğunluk değerinin düşük olması önem kazanmaktadır.
5. $\Sigma AT/\Sigma A$ oranı arttıkça genel eğilim olarak basınç dayanımı düşmektedir. Ancak, çalışmada ATAOG test örnekleri için elde edilen basınç dayanım değerlerinin hiçbiri Sınıf I yapısal beton ve Sınıf II yapısal ve yalıtım amaçlı beton dayanım gereksinimlerini karşılamamıştır. ATAOG test örneklerinin bu çalışmada basınç dayanımları $0.73 \text{ N/mm}^2 - 1.77 \text{ N/mm}^2$ aralığında olduğu için örneklerin tamamı ancak Sınıf III dolgu ve yalıtım amaçlı betonlar için öngörülen dayanım limitlerini sağladığı görülmektedir.
6. Çalışmada tasarımı analiz edilen dört ayrı karışım grubundaki ATAOG test örneklerinin ısı iletkenlik değerleri sırasıyla $0.086 \text{ W/mK} - 0.105 \text{ W/mK}$ (AT1-AT3: 1. grup), $0.107 \text{ W/mK} - 0.129 \text{ W/mK}$ (AT4-AT6: 2. grup), $0.136 \text{ W/mK} - 0.151 \text{ W/mK}$ (AT7-AT9: 3. grup) ve $0.157 \text{ W/mK} - 0.189 \text{ W/mK}$ (AT10-AT12: 4. grup) elde edilmiştir. Literatürdeki bazı değerlerle karşılaştırıldığında ($0.085-0.60 \text{ W/mK}$) (Straube & Walther, 2011; Jin ve ark., 2016; Qu ve ark., 2020), çalışma kapsamında üretilen otoklavsız gazbeton örneklerini ısı iletkenlik değerlerinin beklentiyi karşılayacak düzeyde olduğu söylenebilir.
7. Çalışma bulgularına göre TS EN 771-4 standardında öngörülen minimum 1.5 N/mm^2 basınç dayanım limiti dikkate alındığında AT8 karışımı 1.51 N/mm^2 'lik basınç dayanımı ve 0.132 W/mK 'lik ısı iletkenlik değeri ile en iyi karışım olarak öngörülebilir. Ancak, ısı iletkenlik değerinin daha düşük değerlerde olması, kâgir blok elemanının daha yüksek enerji verimli bir uygulamayı gündeme getirmesi sebebiyle, RILEM limitlerine göre AT5 karışımının sağladığı basınç dayanımı $>1 \text{ Nmm}^2$ 'lik değeri ile diğer karışımlar arasında daha avantajlı bir karışım tasarımı oluşturduğu düşünülebilir.
8. TS 825 (2013) standardında Türkiye için öngörülen 5 farklı bölgeye ait ısı geçirgenlik limitleri dikkate alındığında, AT1-AT9 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilen kâgir blok elemanların 1. Bölge için AT1 – AT6 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilen kâgir blok elemanların ise 2. Bölge için, AT1 – AT3 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilen kâgir blok elemanların ise 3. Bölge için gerekli olan U limit değerlerini sağladığı görülmektedir.

20 cm genişliğindeki ATAOG karışım tasarımlarıyla üretilecek kâgir blok elemanlarının 4. ve 5. Bölge için öngörülen U değerlerini sağlayamadıkları belirlenmiştir. Ancak, 20 cm genişlik yerine kâgir blok elemanları 25 cm genişlikte üretildiğinde artan ısı direnç sebebiyle AT1 – AT3 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilecek kâgir blok elemanların 4. Bölge için, ayrıca AT1 – AT2 aralığındaki tüm karışımlar ile üretilecek kâgir blok elemanların ise 5. Bölge için gerekli olan U limit değerlerini sağlayabileceği öngörülmektedir.

Kaynakça

- Asadi, I., Shafiqh, P., Hassan, Z. F. B. A., & Mahyuddin, N. B. (2018). Thermal conductivity of concrete—A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81-93. doi: 10.1016/j.jobe.2018.07.002
- Awang, H., Noordin, M. N., Ismail, M. R., & Hussein Al-Haidary, M. H. M. (2010, Aralık). *Properties of hardened foam concrete*. Proceeding of 4th. International Conference on Built Environment in Developing Countries, Penang, Malezya.
- Chen, X., Zhao, Z., Hao, M., & Wang, D. (2013). Research of hydrogen generation by the reaction of Al-based materials with water. *Journal of Power Sources*, 222, 188-195. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.08.078
- Gündüz, L., Kalkan, Ş. O., & Aydoğdu, N. K. (2016, Ekim). *İzmir-Alaçatı taşının kuru karışım hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği üzerine teknik bir analiz*. 8th International Aggregates Symposium, Kütahya, Türkiye.
- Gündüz, L., Kalkan, Ş. O., & Ertan, F. (2017). Mikronize edilmiş İzmir-Alaçatı Alapetra taşının yalıtımlı kompozit dolgu harci üretiminde kullanımı üzerine bir inceleme. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2), 503-514. doi: 10.18466/cbayarfbe.319931
- Hlaváček, P., Šmilauer, V., Škvára, F., Kopecký, L., & Šulc, R. (2015). Inorganic foams made from alkali-activated fly ash: Mechanical, chemical and physical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 35, 703–709. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2014.08.024
- Jin, H. Q., Yao, X. L., Fan, L. W., Xu, X., & Yu, Z. T. (2016). Experimental determination and fractal modeling of the effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete: Effects of moisture content. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 589-602. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.08.103
- Jones, M., & McCarthy, A. (2005). Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete. *Fuel*, 84, 1398–1409. doi: 10.1016/j.fuel.2004.09.030
- Kalkan, Ş. O., & Gündüz L. (2018). Effect of Porous Aggregate Size on the Techno-Mechanical Properties of Cementless Lightweight Mortars. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, 5(1), 168-175. doi: 10.31202/ecjse.354569
- Koutný, O., Opravil T., & Pořízka J. (2015). Application of metakaolin in autoclaved aerated concrete technology. *Advanced Materials Research*, 1000, 174-177. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1000.174
- Koutný, O., & Opravil T. (2016). The basics of low volume weight aerated autoclaved concrete preparation. *Materials Science Forum*, 851, 69-74. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.851.69
- Melnyk, A. Y., Poznyak O. R., & Soltysik R. A. (2013). Non-Autoclaved aerated concrete produced using industrial wastes. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4469/28-melnyk-161-166.pdf> Erişim tarihi: 29.03.2022.
- Özcan, Ş. P., & Gündüz, L. (2021a). Otoklavsız gazbeton kâgir blok elemanlarının üretiminde endüstriyel atık liflerin kullanımı üzerine teknik bir analiz. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24, 202-212. doi: 10.31590/ejosat.900083
- Özcan, Ş. P., & Gündüz, L. (2021b). Pamuk-sentetik bileşenli lif katkısı ve genleştirme ajanı miktarlarının otoklavsız gazbetonun teknik özelliklerine etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(6), 1404-1423. doi: 10.35414/akufemubid.933359
- Poznyak, O., & Melnyk, A. (2014). Non-autoclaved aerated concrete made of modified binding composition containing supplementary cementitious materials. *Budownictwo i Architektura*, 13(2), 127-134. doi: 10.35784/bud-arch.1887

- Qu, M. L., Tian, S. Q., Fan, L. W., Yu, Z. T., & Ge, J. (2020). An experimental investigation and fractal modeling on the effective thermal conductivity of novel autoclaved aerated concrete (AAC)-based composites with silica aerogels (SA). *Applied Thermal Engineering*, 179, 115770. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115770
- RILEM, L. C. (1978). Functional Classification of Lightweight Concrete., 11(4), 281-282. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02551774.pdf> Erişim Tarihi: 28/03/2022.
- Ropelewski, L., & Neufeld, R. (1999). Thermal inertia properties of autoclaved aerated concrete. *Journal of Energy Engineering*, 125, 59–75. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9402(1999)125:2(59)
- Soultana, A., & Galetakis, M. (2020). Utilization of quarry dust and calcareous fly ash for the production of lightweight cellular micro-concrete—synthesis and characterization. *Buildings*, 10, 214. doi: 10.3390/buildings10120214
- Straube, B., & Walther, H. (2011). AAC with low thermal conductivity. Xella Technologie, Kloster Lehnin. http://gazobeton.org/sites/default/files/sites/all/uploads/acc_with_low_thermal_conductivity.pdf Erişim Tarihi: 28/03/2022.
- Teng, H., Lee, T., Chen, Y., Wang, H. & Cao, G. (2012). Effect of Al(OH)₃ on the hydrogen generation of aluminum–water system. *Journal of Power Sources*, 219, 16-21. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.06.077
- Töreay, G., Özdemir, İ., & Kurt, T. (2010). *ArcGIS™ 10 Desktop Uygulama Dokümanı*. Ankara, Türkiye: Esri Türkiye, İşlem Şirketler Grubu Eğitim Dokümanları.
- TS EN 1015-10. (2007). *Kâgir harcı-Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini*. Ankara, Türkiye: TSE.
- TS 825. (2013). *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*. Ankara, Türkiye: TSE.
- TS EN 771-4 (2015). *Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 4: Gazbeton kâgir birimler*. Ankara, Türkiye: TSE.
- Ulykbanov, A., Sharafutdinov, E., Chung, C. W., Zhang, D., & Shon, C. S. (2019). Performance-based model to predict thermal conductivity of non-autoclaved aerated concrete through linearization approach. *Construction and Building Materials*, 196, 555–563. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.147
- Uysal, M., Gündoğdu B. C., & Sümer, M. (2012). Gazbetonun kuruma rötresine bağlayıcı malzeme miktarı değişiminin etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(4), 303-308.
- Walczak, P., Szymański, P., & Różycka, A. (2015). Autoclaved aerated concrete based on fly ash in density 350kg/m³ as an environmentally friendly material for energy-efficient constructions. *Procedia Engineering*, 122, 39-46. doi: 10.1016/j.proeng.2015.10.005