T.C.
KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ

SERAMİK VE MERMER ATIKLARININ BİRLİKTE KULLANIMINA DAYALI ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ HAFİF KÖPÜK MALZEMELERİN TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Proje No: FBA-2026-5074

Acil Araştırma Destek Projesi

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Kübra Ekiz BARIŞ
Mimarlık ve Tasarım Fakültesi/Mimarlık Bölümü

Ağustos 2026
KOCAELİ

ÖNSÖZ

Bu proje kapsamında, çatı kiremidi atığı ve mermer atığının alkali aktive bağlayıcı üretiminde değerlendirilmesi ve alüminyum tozu kullanılarak hafif, gözenekli ve ısıl yalıtım performansı geliştirilmiş alkali aktive köpük malzemelerin üretilmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, atık esaslı bağlayıcı bileşimi optimize edilmiş ve farklı oranlarda alüminyum tozu kullanımının malzemenin fiziksel, mekanik, ısıl ve gözenek yapısı özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, hafif ve taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında kullanılma potansiyeline sahip optimum atık esaslı alkali aktive köpük bileşimi geliştirilmiştir.

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından **FBA-2026-5074** numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Projenin gerçekleştirilmesine sağladığı destekten dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖZET	7
ABSTRACT	7
1. GİRİŞ	8
2.GEREÇ VE YÖNTEM	10
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	14
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	34
5.PROJEDEN ÜRETİLEN AKADEMİK ÇIKTILAR	36
KAYNAKLAR	36

TABLOLAR LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 1. Hammaddelerin temel kimyasal bileşimi	10
Tablo 2. Numunelerin deneysel aşamaları ve karışım oranları	12
Tablo 3. MIP testi ile elde edilen AAF'lerin gözenek hacimleri	26
Tablo 4. Farklı köpürtme stratejileri kullanılarak üretilen AAF'lerin fiziksel performansının ve gözenek gelişim mekanizmalarının karşılaştırılması	29
Tablo 5. Geleneksel taşıyıcı olmayan duvar malzemeleri ile AAF'lerin birim hacim ağırlık, ısıl iletkenlik ve basınç dayanımı açısından karşılaştırmalı değerlendirnesi	30
Tablo 6. 70RWT:30MW:0.15Al numunesi için nicel atık kullanım göstergeleri	31
Tablo 7. Tanımlanan sistem sınırı kapsamında optimize edilmiş 70RWT:30MW:0.15Al karışımının malzeme bazlı gömülü karbon hesabı	32
Tablo 8. Optimize edilmiş 70RWT:30MW:0.15Al numunesinin malzeme bazlı çevresel ve işlevsel sürdürülebilirlik göstergelerinin özeti	34

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1. (a) RTW ve (b) MW'nin XRD desenleri	10
Şekil 2. RTW ve MW'nin tane boyutu dağılımları	11
Şekil 3. AAF numunelerinin üretim sürecine ait akış şeması	13
Şekil 4. MW içeriğine bağlı olarak AAB'lerin özelliklerindeki değişimler: (a) Fiziksel özellikler. (b) Mekanik özellikler	15
Şekil 5. RTW-MW esaslı AAB'lerde basınç dayanımına bağlı olarak ultrases geçiş hızı ve birim hacim ağırlıktaki değişim	16
Şekil 6. Seçilen numunelerin FTIR spektrumları: (a) Referans numune (100RTW:0MW:0Al). (b) 90RTW:10MW:0Al. (c) 70RTW:30MW:0Al	18
Şekil 7. Seçilen numunelerin XRD sonuçları: (a) Referans numune (100RTW:0MW:0Al). (b) 90RTW:10MW:0Al. (c) 70RTW:30MW:0Al	19
Şekil 8. Farklı Al içeriklerine sahip AAF'lerin zamana bağlı genleşme davranışı	20
Şekil 9. Farklı miktarlarda Al tozu içeren AAF'lerde köpürme öncesi genleşme yüksekliği ile nihai porozite arasındaki ilişki	22
Şekil 10. Al içeriğine bağlı olarak AAF'lerin özelliklerindeki değişimler: (a) Fiziksel özellikler. (b) Mekanik özellikler	22
Şekil 11. Farklı Al tozu içeriklerine sahip AAF'lerin optik mikroyapısı: (a) Al içermeyen referans numune. (b) %0,05 Al. (c) %0,20 Al. Artan gaz oluşumu ve gözenek birleşmesiyle birlikte nispeten homojen ve küresel gözeneklerden daha büyük, düzensiz ve birbiriyle bağlantılı gözenek yapılarına geçiş gösterilmektedir	24
Şekil 12. Al içeriğinin AAF'lerin gözenek boyutu dağılımı üzerindeki etkisi	25
Şekil 13. Al içeriğinin AAF'lerin gözenek hacim fraksiyonları üzerindeki etkisi	26
Şekil 14. Al içeriğine bağlı olarak AAF'lerin kuru durumdaki ısıl iletkenliğindeki değişimler	27
Şekil 15. Isıl iletkenlik ile AAF'lerin (a) birim hacim ağırlığı, (b) porozitesi	28

ve (c) basınç dayanımı arasındaki ilişkiler

ÖZET

Bu proje kapsamında, yapı ve yıkım atıklarının katma değerli yapı malzemelerine dönüştürülmesi amacıyla çatı kiremidi atığı (RTW) ve mermer atığı (MW) kullanılarak hafif alkali aktive köpük (AAF) malzemelerin geliştirilmesi ve alüminyum (Al) tozu ile oluşturulan gözenek yapısının malzeme performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma iki aşamalı deneysel bir yaklaşımla yürütülmüştür. İlk aşamada, RTW farklı oranlarda MW ile ikame edilerek alkali aktive bağlayıcı bileşimi optimize edilmiştir. İkinci aşamada ise optimum bağlayıcı bileşimine %0–0,20 oranlarında Al tozu ilave edilerek AAF numuneleri üretilmiş; numunelerin fiziksel, mekanik, ısıl ve gözenek yapısı özellikleri incelenmiştir. İlk aşamada %30 MW kullanımı, basınç dayanımını 5,57 MPa'dan 15,50 MPa'ya yükseltmiştir. Köpük üretiminde Al oranının artması gözenekliliği artırarak birim ağırlık ve ısıl iletkenliği azaltmış; ancak aşırı Al kullanımı gözenek birleşmesine ve mekanik dayanım kaybına neden olmuştur. Performans özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda 70RTW:30MW:0.15Al bileşimi optimum karışım olarak belirlenmiştir. Bu karışım 0,56 g/cm³ birim ağırlık, 0,15 W/m·K kuru durum ısıl iletkenliği ve 3,12 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Ayrıca toplam %79,9 atık kullanımı sağlanmış ve malzeme bazlı gömülü karbon, Portland çimentosu esaslı referans bağlayıcıya kıyasla %65,9 azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen AAF'nin hafif ve taşıyıcı olmayan duvar uygulamaları için potansiyel bir malzeme olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: alkali aktive köpük, çatı kiremidi atığı, mermer atığı, alüminyum tozu, gözenek yapısı, ısıl iletkenlik

ABSTRACT

This project aimed to develop lightweight alkali-activated foams (AAFs) using roof tile waste (RTW) and marble waste (MW) to convert construction and demolition wastes into value-added construction materials and to determine the effects of aluminum (Al)-induced pore formation on material performance. The study was conducted using a two-stage experimental approach. In the first stage, RTW was partially replaced with MW at different ratios to optimize the alkali-activated binder composition. In the second stage, AAF specimens were produced by incorporating Al powder at contents ranging from 0 to 0.20 wt.% into the optimized binder, and their physical, mechanical, thermal, and pore structure characteristics were investigated. In the first stage, the incorporation of 30% MW increased the compressive strength from 5.57 to 15.50 MPa. During foam production, increasing Al content increased porosity and reduced unit weight and thermal conductivity; however, excessive Al addition caused pore coalescence and loss of mechanical strength. Considering the overall performance, the 70RTW:30MW:0.15Al composition was identified as the optimum mixture. This mixture exhibited a unit weight of 0.56 g/cm³, a dry-state thermal conductivity of 0.15 W/m·K, and a compressive strength of 3.12 MPa. Furthermore, a total waste incorporation ratio of 79.9% was achieved, while material-based embodied carbon was reduced by 65.9% compared with an ordinary Portland cement-based reference binder. The results demonstrate the potential of the developed AAF for lightweight non-loadbearing wall applications.

Keywords: alkali-activated foam, roof tile waste, marble waste, aluminum powder, pore structure, thermal conductivity

1. GİRİŞ

Çimento üretimi, yüksek enerji gereksinimi ve üretim sürecinde ortaya çıkan karbondioksit emisyonları nedeniyle küresel sera gazı salımlarına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Portland çimentosu (OPC) üretiminde kireçtaşı ve kilin yaklaşık 1450 °C sıcaklıkta klinkere dönüştürülmesi sırasında hem kireçtaşının kalsinasyonundan hem de kullanılan yakıtlardan kaynaklanan önemli miktarda CO_2 açığa çıkmaktadır [1]. Bu nedenle, iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar kapsamında daha düşük karbon ayak izine sahip alternatif bağlayıcıların geliştirilmesine olan ilgi artmıştır [2]. Bu alternatifler arasında, endüstriyel ve tarımsal yan ürünlerin alkali çözeltiler ile aktive edilmesiyle üretilen alkali aktive bağlayıcılar (AAB'ler) önemli bir potansiyele sahiptir. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü gibi alüminosilikat bakımından zengin atıklar AAB üretiminde öncül malzeme olarak kullanılabilmekte; böylece doğal kaynaklara olan bağımlılık azaltılırken atıkların daha etkin biçimde değerlendirilmesi mümkün olmaktadır [3–5]. Literatürde AAB'lerin, kullanılan öncül malzeme, aktivatör bileşimi ve değerlendirmede kabul edilen sınırlara bağlı olarak, OPC'ye kıyasla CO_2 emisyonlarında önemli azalmalar sağlayabileceği belirtilmektedir [3–7].

Yapı ve yıkım atıkları, dünya genelinde en büyük katı atık akışlarından birini oluşturmaktadır. Yıllık üretiminin yaklaşık 2,24 milyar ton olduğu bildirilen bu atıkların önemli bir bölümü hâlen yol alt temel dolgusu ve genel dolgu gibi düşük katma değerli uygulamalarda kullanılmakta veya düzenli depolama alanlarına gönderilmektedir [8]. Bu nedenle yapı ve yıkım atıklarının yalnızca düşük nitelikli agrega olarak değerlendirilmesi yerine, katma değeri yüksek yapı malzemelerine dönüştürülmesi sürdürülebilir yapı üretimi ve döngüsel ekonomi açısından önem taşımaktadır. Türkiye'de ise kentsel dönüşüm faaliyetleri ve Kahramanmaraş depremleri sonrasında ortaya çıkan yüksek miktardaki çatı kiremidi atığı (RTW), bu atıkların daha etkin ve yüksek katma değerli geri dönüşüm yöntemleriyle değerlendirilmesi gerekliliğini daha belirgin hâle getirmiştir [9].

Seramik esaslı yapı ve yıkım atıkları içerisinde RTW, yüksek silis ve alümina içeriği nedeniyle alkali aktivasyon sonrasında geopolimerizasyon reaksiyonlarına katılabilme potansiyeline sahiptir. Geleneksel geri dönüşüm uygulamalarında seramik atıkları çoğunlukla inert agrega olarak kullanılmaktadır. Buna karşılık RTW'nin AAB üretiminde öncül malzeme olarak kullanılması, atığın doğrudan alüminosilikat bağlayıcı jel oluşumuna katkıda bulunmasını sağlayarak daha yüksek katma değerli yapı malzemelerinin üretimine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, RTW'nin depolama alanlarına gönderilmesini azaltmanın yanı sıra bağlayıcı üretiminde kullanılan doğal alüminosilikat kaynakların kısmen ikame edilmesine de katkı sağlamaktadır.

Çalışmada değerlendirilen bir diğer atık malzeme olan mermer atığı (MW), hem yıkım faaliyetleri hem de doğal taş işleme süreçleri sonucunda ortaya çıkmaktadır. Yüksek kalsiyum içeriği, ince tane yapısı ve yüksek özgül yüzey alanı nedeniyle MW'nin AAB üretiminde ikincil bir hammadde olarak kullanımına yönelik çalışmalar bulunmaktadır [10]. MW'nin AAB'lere dahil edilmesi, bir yandan başka bir önemli atık akışının değerlendirilmesini sağlarken diğer yandan bağlayıcı matrisinin özelliklerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilmektedir. Bu nedenle RTW ve MW'nin birlikte kullanılması; depolama alanlarına gönderilen atık miktarının azaltılması, doğal kaynakların korunması ve daha sürdürülebilir, katma değerli yapı malzemelerinin geliştirilmesi açısından potansiyel bir yaklaşım oluşturmaktadır.

Seramik esaslı yapı ve yıkım atıkları, AAB tasarımında iki farklı yaklaşımla değerlendirilmektedir: agrega ikamesi ve alüminosilikat öncül malzeme kullanımı. Bu iki yaklaşım farklı mekanizmalara dayandığından, elde edilen mekanik performansların doğrudan karşılaştırılması uygun değildir. Seramik atıkların agrega olarak kullanılması durumunda atık malzeme esas olarak doğal agreganın yerine geçen inert bir bileşen olarak davranırken, öncül olarak kullanıldığında alkali aktivasyon sırasında reaktif silis ve alümina sağlayarak bağlayıcı jel oluşumuna doğrudan katılmaktadır. Bu nedenle öncül esaslı sistemlerin performansı; atığın özelliklerinin yanı sıra aktivatör bileşimi, kür koşulları ve reaksiyon ortamından da etkilenmektedir. Literatürde farklı seramik atıkları ve yardımcı öncüller kullanılarak üretilen AAB'lerde geniş bir basınç dayanımı aralığının elde edildiği bildirilmiş ve bu atıkların uygun aktivasyon koşulları altında bağlayıcı hammaddesi olarak kullanılabileceği gösterilmiştir [11–15]. Ayrıca RTW içeren alkali aktive malzemelerin yüksek sıcaklık, donma-çözülme ve aşınma etkilerine karşı olumlu dayanıklılık özellikleri gösterebildiği bildirilmiştir [16,17].

Geleneksel AAB'lerle karşılaştırıldığında, seramik atıklar kullanılarak üretilen alkali aktive köpüklere (AAF'ler) yönelik çalışmalar daha sınırlıdır. AAF'ler, yüksek gözenekliliğe sahip hücresel yapıları sayesinde düşük birim ağırlık ve düşük ısıl iletkenliği yeterli mekanik bütünlük ile bir arada sağlayabilmekte ve bu özellikleri nedeniyle özellikle taşıyıcı olmayan yapı uygulamaları açısından önem taşımaktadır [18]. AAF'lerde gözenekli yapı mekanik köpükleme, kimyasal köpükleme, geçici kalıp yöntemleri ve eklemeli imalat gibi farklı yöntemlerle oluşturulabilmektedir. Kimyasal köpükleme yönteminde ise alüminyum (Al) tozu, hidrojen peroksit veya sodyum perborat gibi gaz oluşturucu maddeler alkali ortamda reaksiyona girerek gaz kabarcıkları oluşturmakta ve bu kabarcıkların matris içerisinde tutulması sonucunda gözenekli yapı meydana gelmektedir [19].

Literatürde farklı seramik atıkları kullanılarak AAF üretiminin teknik olarak mümkün olduğu gösterilmiş olmakla birlikte, bildirilen fiziksel, mekanik ve ısıl özellikler arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır [20–22]. Bu farklılıkların temel nedenleri arasında kullanılan öncül maddeler, köpük oluşturucu ajanlar, aktivatör bileşimleri, yüzey aktif maddeler ve kür koşullarının birbirinden farklı olması yer almaktadır. Dolayısıyla elde edilen performans farklılıklarının doğrudan atık öncül malzemeden mi yoksa karışım tasarımı ve üretim parametrelerinden mi kaynaklandığının belirlenmesi güçleşmektedir. Ayrıca mevcut çalışmaların önemli bir bölümünde fiziksel veya mekanik özellikler ayrı ayrı değerlendirilmiş, gözenek yapısının gelişimi ile mekanik ve ısıl performans arasındaki ilişkilerin bütüncül olarak ortaya konulmasına daha sınırlı düzeyde odaklanılmıştır [23]. Bu kapsamda literatürde üç temel araştırma gereksinimi öne çıkmaktadır. İlk olarak, RTW'nin öncül malzeme olarak kullanıldığı yüksek performanslı gözenekli AAF üretimine yönelik çalışmalar sınırlıdır. İkinci olarak, RTW ile MW'nin birlikte kullanıldığı AAB ve AAF'lerde MW'nin performansa katkısı yeterince sistematik olarak değerlendirilmemiştir. Üçüncü olarak, gözenek büyüklüğü dağılımı, gözenek morfolojisi ve gözeneklerin birbiriyle bağlantılılığı gibi gözenek yapısına ilişkin özellikler ile mekanik ve ısıl performans arasındaki ilişkiler RTW esaslı AAF'ler için kapsamlı biçimde ortaya konulmamıştır.

Bu proje kapsamında söz konusu araştırma gereksinimlerine yönelik olarak RTW ve MW'nin birlikte kullanılmasıyla hafif AAF'lerin geliştirilmesi iki aşamalı bir deneysel yaklaşım ile ele alınmıştır. İlk aşamada optimum RTW–MW alkali aktive bağlayıcı bileşiminin belirlenmesi, ikinci aşamada ise farklı oranlarda Al tozu kullanımının gözenek yapısının gelişimi ile fiziksel, mekanik ve ısıl performans üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın temel yaklaşımı, köpük oluşturma aşamasından önce bağlayıcı matrisinin optimize edilmesi ve daha sonra Al kaynaklı gözenek oluşumunun farklı karakterizasyon yöntemleriyle sistematik olarak incelenmesidir. Ayrıca kuru durum ısıl iletkenliği ile seçilmiş

mühendislik özellikleri arasındaki ilişkiler regresyon analizleri ile değerlendirilmiştir. Böylece RTW ve MW'nin yüksek katma değerli biçimde değerlendirilmesine olanak sağlayan, düşük birim ağırlık ve gelişmiş ısıl yalıtım performansını yeterli mekanik performans ile bir araya getiren ve taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında kullanılabilecek atık esaslı AAF'lerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

2. GEREÇ VE YÖNTEM

2.1. Hammaddeler

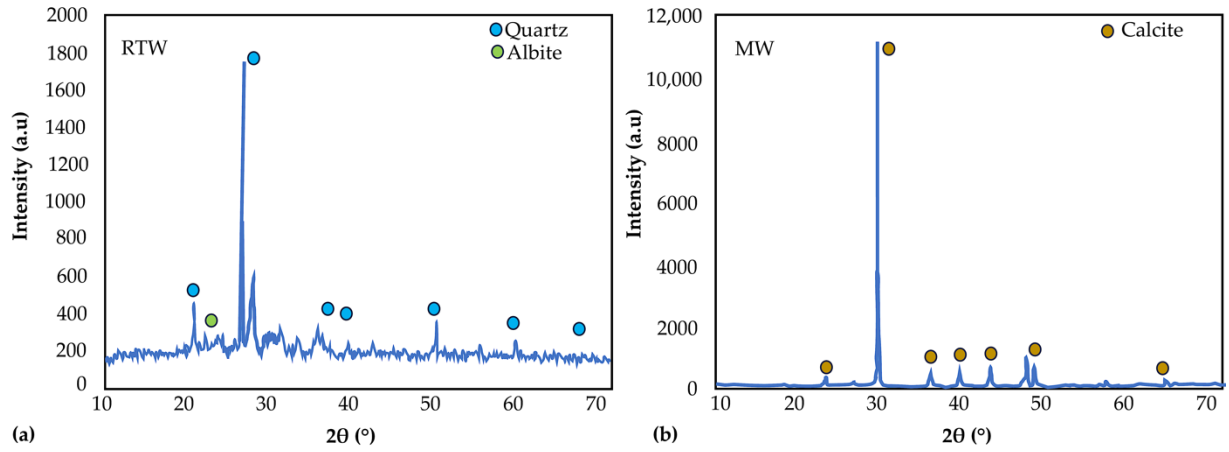
RTW ve MW, Türkiye'de bulunan bir yapı ve yıkım atığı depolama sahasından temin edilmiştir. Her iki malzeme de en az 24 saat süreyle 105 °C'de etüvde kurutulmuş, ardından bilyalı değirmende öğütülmüş ve 125 µm göz açıklığına sahip elekten geçirilmiştir. RTW ve MW'nin özgül ağırlık değerleri sırasıyla 2,44 ve 2,63 olarak belirlenmiştir. RTW ve MW'nin kimyasal bileşimleri X-ışını floresans (XRF) analizi ile belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur. RTW esas olarak SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3'ten oluşmakta olup, bu bileşenlerin toplam miktarı ağırlıkça %89,87 ile %70'in üzerindedir. Bu durum, RTW'nin alüminosilikat öncül malzeme olarak uygunluğunu doğrulamaktadır [24]. Buna karşılık MW, ağırlıklı olarak CaO'dan (ağırlıkça %55,8) oluşurken, SiO_2 ve Al_2O_3 içeriğinin toplamı oldukça düşük (%0,51) olup, bu durum MW'nin karbonat bakımından zengin yapısını doğrulamaktadır.

Tablo 1. Hammaddelerin temel kimyasal bileşimi.

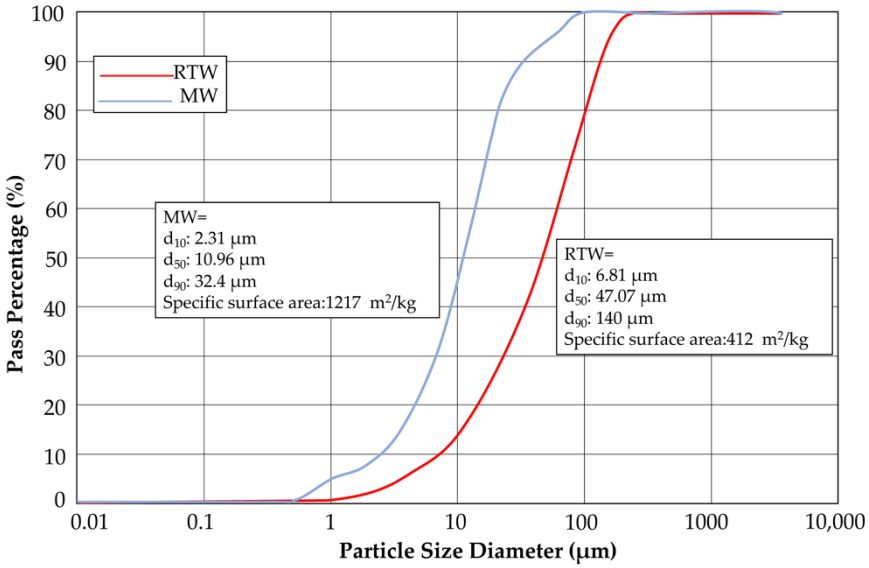
Chemical Composition (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	ZrO_2	LOI
RTW	72.33	16.40	1.14	1.67	0.62	1.87	2.83	0.75	0.36	2.03
MW	0.34	0.17	-	55.80	0.26	-	-		-	43.43

X-ışını kırınımı (XRD) analizi sonucunda, RTW'nin başlıca kristalin fazlarının kuvars ve albit olduğu, MW'nin ise ağırlıklı olarak kalsitten oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 1). Kırınım desenlerinde ayrıca düşük şiddetli bazı yansımalar gözlenmiştir. Ancak bu yansımalar, mevcut XRD verileri ve hammaddelerin kimyasal bileşimleri kullanılarak kesin olarak tanımlanamadığından, belirli kristalin fazlarla ilişkilendirilmemiştir.

Lazer tane boyutu analiz cihazı kullanılarak belirlenen RTW ve MW'nin tane boyutu dağılımları Şekil 2'de gösterilmiştir. MW'nin RTW'ye kıyasla belirgin şekilde daha ince tanelere sahip olduğu görülmüştür. MW için d_{10}, d_{50} ve d_{90} değerleri sırasıyla **2**,31 µm, 10,96 µm ve 32,4 µm olarak belirlenirken, RTW için bu değerler sırasıyla 6,81 µm, 47,07 µm ve 140 µm olarak ölçülmüştür. Ayrıca MW'nin özgül yüzey alanı 1217 m^2/kg olarak belirlenmiş olup, bu değer RTW'nin özgül yüzey alanının (412 m^2/kg) yaklaşık üç katıdır.



Şekil 1. (a) RTW ve (b) MW'nin XRD desenleri.



Şekil 2. RTW ve MW'nin tane boyutu dağılımları.

%98 saflığa ve 40 g/mol molekül ağırlığına sahip katı sodyum hidroksit (NaOH), Merck Chemicals firmasından temin edilmiştir. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu molarite (M) cinsinden ifade edilmiştir. 7,5 M NaOH çözeltisi, 300,0 g katı NaOH'nin (7,5 × 40 = 300 g) deiyonize su içerisinde çözündürülmesi ve nihai hacmin 1 L'ye tamamlanmasıyla hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti, kullanılmadan önce ortam sıcaklığında (yaklaşık 23 °C) 24 saat süreyle soğumaya bırakılmıştır. Yine Merck Chemicals firmasından temin edilen ticari sodyum silikat çözeltisi herhangi bir değişiklik yapılmadan doğrudan kullanılmıştır. Bu çözeltinin silikat modülü (SiO_2/Na_2O) 3,4 olup, bileşimi ağırlıkça %25,5 SiO_2, %7,5 Na_2O ve %67,0 H_2O'dan oluşmaktadır. Çözeltinin 20 °C'deki yoğunluğu 1,29 g/mL'dir.

Birim ağırlığı azaltmak ve ısıl performansı iyileştirmek amacıyla köpük oluşturucu ajan olarak Ytong A.Ş.'den temin edilen Al tozu kullanılmıştır. Al tozunun saflığı %99 olup, tane boyutu 5–50 µm aralığındadır. Deneylerin tamamında deiyonize su kullanılmıştır.

2.2. Karışım Tasarımı

Çalışmada, ilk olarak optimum bağlayıcı bileşiminin belirlenmesi ve ardından köpük oluşturucu ajan miktarının AAF'lerin fiziksel, mekanik ve ısıl performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amacıyla iki aşamalı bir deneysel tasarım uygulanmıştır. İlk aşamada, RTW esaslı AAB'lerde RTW'nin farklı oranlarda MW ile ikame edilmesinin faz özellikleri, kimyasal bağ yapısı ile fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. İkinci aşamada ise önceki aşamada elde edilen optimum bileşime sahip AAB'ye farklı oranlarda Al tozu ilave edilerek daha düşük birim ağırlığa ve geliştirilmiş ısıl performansa sahip AAF'lerin üretimine odaklanılmıştır.

Ana deney programından önce, seçilen karışım parametrelerinin uygunluğunu kontrol etmek amacıyla çeşitli ön deneme karışımları hazırlanmıştır. Seçilen MW ikame oranları (%0, %10, %15, %20, %25 ve %30) kasıtlı olarak geniş bir aralıkta belirlenmiştir. Bu ikame aralığı, MW'nin yüksek oranda katkı olarak kullanımının uygulanabilirliğini araştırmak ve etkisinin kritik hâle geldiği düzeyi belirlemek amacıyla seçilmiştir. Önceki bazı çalışmalarda MW, genellikle %10–30 aralığında kısmi bağlayıcı ikamesi olarak kullanılmıştır [25, 26]. Tüm karışımlarda toplam sıvı/bağlayıcı oranı, yeterli işlenebilirlik ve gözenek kararlılığını

sağlamak amacıyla gerçekleştirilen ön denemeler doğrultusunda 0,30 olarak sabit tutulmuştur [9].

Reaksiyon ortamındaki NaOH molaritesi, alkali aktivasyonda kullanılan alüminosilikat öncül malzemenin çözünmesini kontrol eden önemli bir faktördür. Reaksiyon ortamının alkalinitesi arttıkça öncül malzemeden daha fazla Si ve Al içeren bileşen çözünmekte ve bunu izleyen polikondenzasyon reaksiyonları teşvik edilmektedir. Önceki çalışmalar, yaklaşık 6–10 M aralığındaki NaOH konsantrasyonlarının, AAB'lerin yeterli işlenebilirliğini korurken kararlı geopolimerizasyon kinetiğini desteklemek için genel olarak yeterli alkalinite sağladığını göstermiştir [27, 28]. Bu çalışmada, işlenebilirliği ve gözenek kararlılığını olumsuz etkileyebilecek aşırı hızlı reaksiyonlara neden olmadan RTW'nin çözünmesini desteklemek amacıyla 7,5 M NaOH çözeltisi kullanılmıştır.

İki farklı alkali aktivatörden oluşan AAB'lerin tasarımında, bu aktivatörler arasındaki karışım oranı AAB özelliklerinin gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. NaOH, matrisin alkalinitesini düzenleyerek özellikle çözünme reaksiyonlarının gelişimini desteklerken, sodyum silikat reaksiyon ortamına ilave silikat türleri sağlayarak üç boyutlu alüminosilikat jel yapısının gelişimini kolaylaştırmakta ve böylece daha yüksek mekanik performansa sahip AAB'lerin üretimine olanak sağlamaktadır. Literatüre göre, yaklaşık 1:1–1:2 aralığındaki NaOH:sodyum silikat oranları, reaksiyon gelişimi, işlenebilirlik ve mekanik performans arasında genel olarak uygun bir denge sağladığından AAB tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır [29, 30]. Bu nedenle, bu çalışmada NaOH:sodyum silikat oranı 1:2 olarak sabit tutulmuştur. Ön denemeler doğrultusunda, toplam alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 1:4 olarak deney programı boyunca sabit tutulmuştur.

Belirtilen 0,30 sıvı/bağlayıcı oranı; 7,5 M NaOH çözeltisi, ticari sodyum silikat çözeltisi ve ilave deiyonize suyu içeren toplam sıvı fazını ifade etmektedir. Açıklık sağlamak amacıyla, her iki alkali aktivatör çözeltisinde bulunan su ile ilave deiyonize su dikkate alınarak hesaplanan etkin toplam su/bağlayıcı oranı yaklaşık 0,23 olarak belirlenmiştir. Etkin su miktarı; NaOH çözeltisindeki su, ticari sodyum silikat çözeltisinin ağırlıkça %67'sini oluşturan su ve karışımın hazırlanması sırasında ilave edilen deiyonize sudan oluşmaktadır.

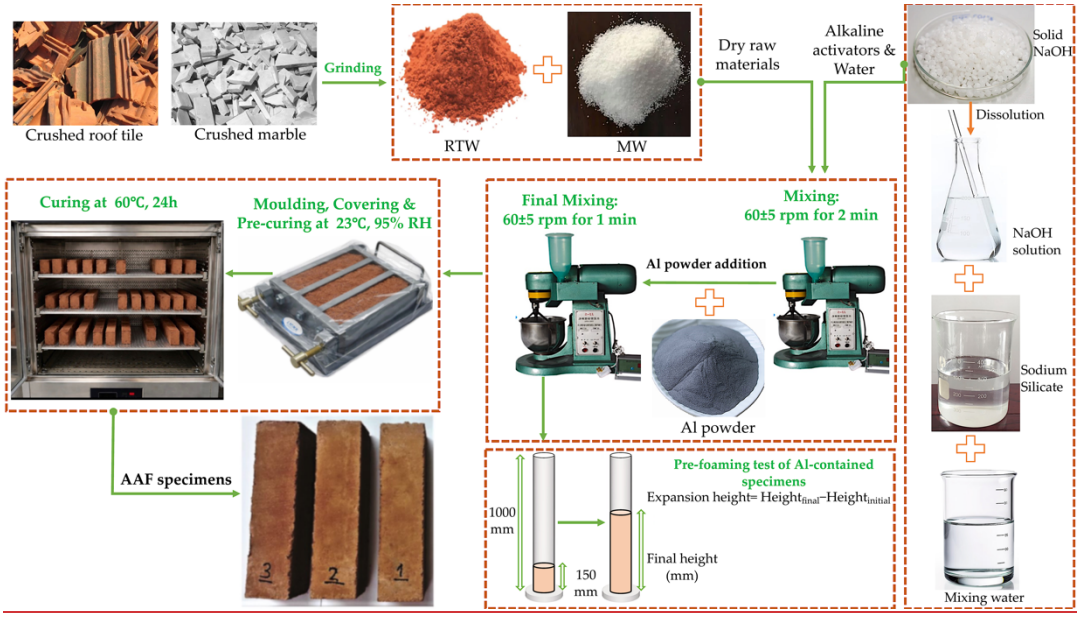
Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında, toplam bağlayıcı kütlesi (RTW + MW) esas alınarak ağırlıkça %0,05, %0,10, %0,15 ve %0,20 oranlarında Al tozu kullanılmıştır. Bu oranlar, artan hidrojen gazı oluşumunun AAF'lerin fiziksel, mekanik ve ısıl davranışlarının yanı sıra gözenek boyutu dağılımı ve gözenekler arası bağlantılılık üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla seçilmiştir. Çalışmanın farklı aşamalarında kullanılan numune kodları ve hammadde miktarları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Numunelerin deneysel aşamaları ve karışım oranları.

Stage	Specimen Code	RTW (g)	MW (g)	NaOH Solution (7.5 M) (g)	Sodium Silicate Solution (g)	Additional Water (g)	Al Powder (g)	Total Liquid: Binder Ratio	Effective Total Water: Binder Ratio	Activator: Binder Ratio
I	100RTW:0MW:0Al	400	0	33.3	66.6	20.1	0	0.30	0.23	1:4
	90RTW:10MW:0Al	360	40							
	85RTW:15MW:0Al	340	60							
	80RTW:20MW:0Al	320	80							
	75RTW:25MW:0Al	300	100							
	70RTW:30MW:0Al	280	120							
II	70RTW:30MW:0.05Al	280	120				0.2			
	70RTW:30MW:0.10Al						0.4			
	70RTW:30MW:0.15Al						0.6			
	70RTW:30MW:0.20Al						0.8			

2.3. Numune Üretimi

Şekil 3'te gösterilen numune üretim süreci sekiz temel aşamada gerçekleştirilmiştir: **(i)** alkali aktivatörün hazırlanması, **(ii)** hammaddelerin kuru olarak karıştırılması, **(iii)** AAB karışımının üretilmesi, **(iv)** ön köpüklenme deneyi, **(v)** kalıplara döküm, **(vi)** karışımın genleşmesi, **(vii)** ön kür ve **(viii)** nihai kür. İlk aşamada, kuru tanelerin homojen dağılımını sağlamak amacıyla RTW ve MW, 60 ± 5 dev/dak hızda çalışan bir karıştırıcı kullanılarak 2 dakika süreyle karıştırılmıştır. Ardından, önceden hazırlanmış ve soğutulmuş NaOH çözeltisi, sodyum silikat çözeltisi ve ilave deiyonize su kuru karışıma eklenmiştir. Homojen bir AAB elde edilinceye kadar karıştırma işlemine aynı hızda 2 dakika daha devam edilmiştir.



Şekil 3. AAF numunelerinin üretim sürecine ait akış şeması.

AAF'lerin üretimi için daha sonra karışıma Al tozu ilave edilmiş ve hamur ile yeterli etkileşimin sağlanması amacıyla karıştırma işlemine 1 dakika daha devam edilmiştir. Al tozunun ilave edilmesinin ardından reaktif alüminyum taneleri, suyun varlığında alkali çözelti ile reaksiyona girerek Denklem (1)'de gösterildiği gibi hidrojen gazı oluşturmuştur [31]. Açığa çıkan hidrojen gazı kabarcıkları hamur içerisinde hapsolarak hücresel bir gözenek yapısı meydana getirmiş; bu yapı birim ağırlığın azalmasını ve ısıl yalıtım performansının iyileşmesini sağlamıştır. Köpüklenme işlemi hemen başlamış ve hacimsel genleşme yaklaşık 10–12 dakika içerisinde tamamlanmıştır.

$$2Al + 2NaOH + 6H_2O \rightarrow 2Na(Al(OH)_4) + 3H_2 \quad (1)$$

Malzeme israfını önlemek ve köpüklenme sürecinin verimliliğini artırmak amacıyla AAF karışımları, kalıp hacminin yaklaşık üçte birini dolduracak şekilde kalıplara yerleştirilmiştir. Farklı Al içeriklerine sahip AAF karışımlarının genleşme oranlarının değişkenlik göstermesi nedeniyle, 1000 mL hacimli dereceli silindir kullanılarak bir ön köpüklenme deneyi gerçekleştirilmiştir. Taze AAF karışımları, başlangıç hacmi 150 mL olacak şekilde silindirlere dökülmüş ve genleşme yükseklikleri 30 saniyelik aralıklarla kaydedilmiştir.

Taze karışımlar 40 × 40 × 160 mm boyutlarındaki kalıplara dökülmüştür. Yüzey kurumasını ve çatlamayı önlemek amacıyla kalıplanan numunelerin üzeri polietilen (PE) film ile kapatılmış ve numuneler ortam koşullarında (~23 °C ve %50–55 bağıl nem (RH)) 24

saat süreyle bekletilmiştir. Bu ilk ön kür aşaması, erken yaş alkali aktivasyon reaksiyonlarının kademeli olarak başlamasını sağlamak ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce köpüklü yapıyı kararlı hâle getirmek amacıyla uygulanmıştır. Bu aşama AAF üretiminde kritik öneme sahiptir; çünkü hızlı gaz oluşumu ve hacim artışı, matrisin yeterli erken dayanımı kazanamaması durumunda gözeneklerin çökmesine veya yapısal kararsızlığa neden olabilmektedir.

Literatürde 40–80 °C arasındaki ısıl kür sıcaklıklarının, aşırı kuruma veya mikro çatlak oluşumuna neden olmadan AAB reaksiyon kinetiğini hızlandırabildiği ve mekanik performansı geliştirebildiği bildirilmiştir [31]. Bu çalışmada, ön kür işleminin ardından numuneler, gözenekli AAF yapısının kararlılığı korunurken etkin alkali aktivasyonun sağlanması amacıyla 60 °C'de 24 saat süreyle kür edilmiştir. Kür süresinin tamamlanmasının ardından numuneler kalıplardan çıkarılmadan önce etüv içerisinde oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmış ve daha sonra 28 günlük yaşa ulaşıncaya kadar laboratuvar koşullarında (~23 °C ve %50–55 bağıl nem) bekletilmiştir.

Numuneler "xRTW:yMW:zAl" biçiminde kodlanmıştır. Burada "x" ve "y" sırasıyla RTW ve MW oranlarını, "z" ise toplam bağlayıcı kütlesine göre Al tozu içeriğini ifade etmektedir.

2.4. Uygulanan Deneyler

Deneyler, her bir analizin amacına bağlı olarak deney programının farklı aşamalarında kontrollü laboratuvar koşulları altında gerçekleştirilmiştir. Hammaddelerin (RTW ve MW) kimyasal bileşimlerini, mineralojik ve fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla XRF, XRD ve tane boyutu dağılımı analizleri yalnızca hammaddeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Artan MW ikame oranına bağlı olarak meydana gelen faz gelişimini ve kimyasal bağ yapısındaki değişimleri incelemek amacıyla, deneysel çalışmanın ilk aşamasında elde edilen seçilmiş AAB numuneleri üzerinde XRD ve Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) analizleri gerçekleştirilmiştir. Birim ağırlık [32], su emme oranı [33], gözeneklilik [34], ultrases geçiş hızı [35], eğilme dayanımı ve basınç dayanımını [36] içeren fiziksel ve mekanik testler, her bir deneysel aşamanın amaçları doğrultusunda AAB ve AAF numuneleri üzerinde uygulanmıştır. AAF numunelerinin ısıl yalıtım performansını, gözenek yapısını ve iç gözenek morfolojisini değerlendirmek amacıyla ısıl iletkenlik [37], civa porozimetresi (MIP) ve optik mikroskop analizleri yalnızca AAF numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

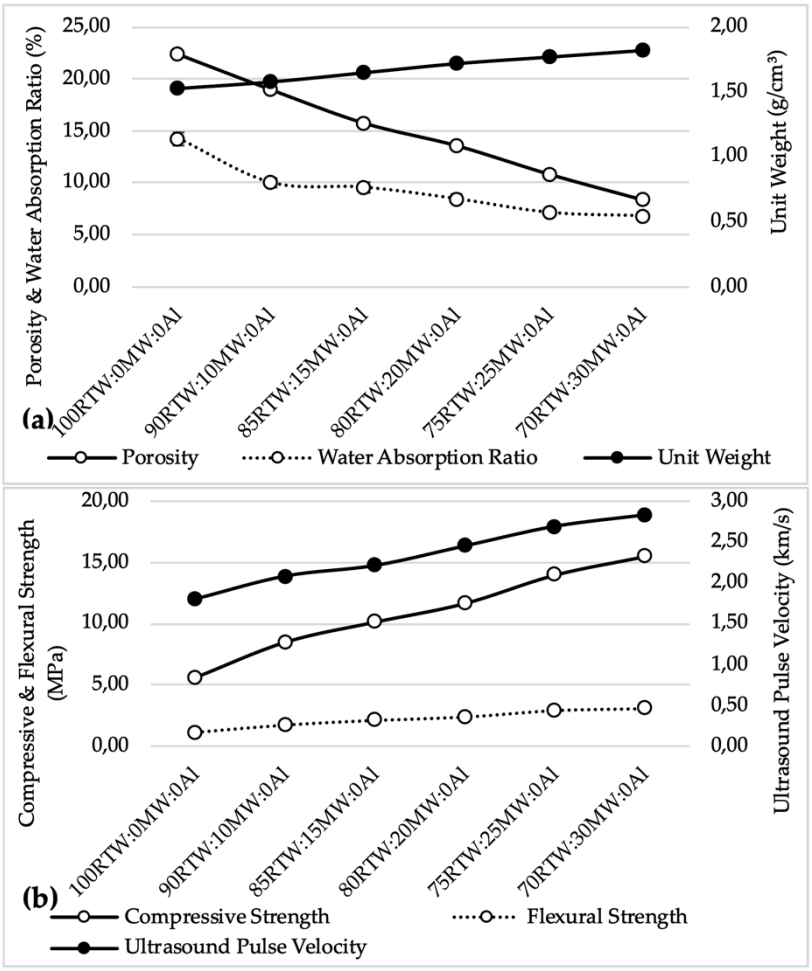
Ölçüm sonuçları, deneysel verilerin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini değerlendirmek amacıyla istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Olası aykırı değerlerin belirlenmesinde Chauvenet kriteri uygulanmıştır [38]. Bu yaklaşıma göre, bir ölçümün ortalamadan sapma olasılığının 1/(2N) değerinden küçük olması durumunda ilgili veri noktası aykırı değer olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada fiziksel, mekanik ve ısıl testler için altı tekrarlı ölçüm (N = 6) gerçekleştirilmiştir. Chauvenet kriterine göre, bu örneklem büyüklüğü için kabul edilebilir maksimum sapma katsayısı 1,73 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle yalnızca Chauvenet kriterinde belirtilen kabul edilebilir maksimum sapma sınırını aşan ölçümler analiz dışında bırakılmıştır. Aykırı değerlerin çıkarılmasının ardından aritmetik ortalama, kalan veriler kullanılarak yeniden hesaplanmıştır. Ayrıca ölçümlerin ortalamaya göre dağılımını değerlendirmek amacıyla varyasyon katsayısı hesaplanmış ve elde edilen değerlerin tüm parametreler için %5'in altında kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, deneysel sonuçların yüksek tekrarlanabilirliğe sahip olduğunu göstermektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Alkali-Aktive Bağlayıcıların Özellikleri

3.1.1. AAB'lerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

AAB'lerde birim hacim ağırlık, porozite ve su emme oranı birbiriyle yakından ilişkilidir ve bu özelliklerin birleşik etkileri; ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri belirlemektedir. Bu çalışmanın ilk aşamasında, farklı RTW ve MW içerikleriyle üretilen AAB'lerin fiziksel özelliklerindeki değişimler Şekil 4a'da, bunlara karşılık gelen mekanik özellikler ise Şekil 4b'de sunulmuştur.

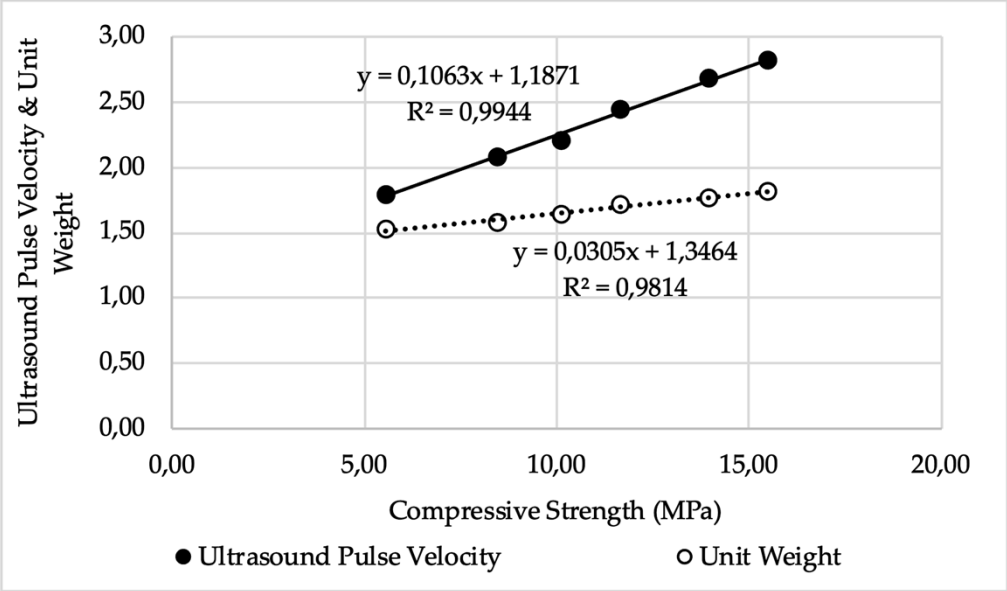


Şekil 4. MW içeriğine bağlı olarak AAB'lerin özelliklerindeki değişimler: (a) Fiziksel özellikler. (b) Mekanik özellikler.

Referans karışım (100RTW:0MW:0Al) için porozite, birim hacim ağırlık ve su emme oranı sırasıyla %22,36, 1,53 g/cm³ ve %14,23 olarak belirlenmiştir. RTW'nin ağırlıkça %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında MW ile kısmen ikame edilmesiyle porozitede sistematik bir azalma gözlenmiş ve bu azalma oranları sırasıyla %15, %29, %39, %51 ve %62 olarak gerçekleşmiştir. Beklendiği üzere, porozite ile birim hacim ağırlık arasında negatif bir korelasyon gözlenmiştir. Gözenek hacmindeki azalma, AAB'nin katı faz oranını artırmış ve bu durum birim hacim ağırlığın kademeli olarak yükselmesine neden olmuştur. MW içeriğinin artmasıyla birlikte birim hacim ağırlık kademeli olarak artarak sırasıyla 1,58, 1,65, 1,72, 1,77 ve 1,82 g/cm³ değerlerine ulaşmıştır. Referans AAB'nin su emme oranı %14,23 iken, MW içeren numunelerde su emme oranları %6,82–10,00 aralığında değişmiştir. Bu davranış, daha rafine bir gözenek yapısına ve birbirine bağlı gözeneklerin sayısının azalmasına bağlanabilir; bu durum suyun AAB matrisi içerisine nüfuzunu sınırlandırmıştır.

Şekil 4b'de gösterildiği üzere, MW ilavesi RTW esaslı AAB'lerin mekanik özelliklerinde belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Referans karışım (100RTW:0MW:0Al) için ölçülen ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sırasıyla 1,80 km/s, 5,57 MPa ve 1,11 MPa'dır. MW içeriği arttıkça bu parametreler de artmıştır. %10, %15, %20, %25 ve %30 MW içeren karışımlarda ultrases geçiş hızı yaklaşık %15–57 oranında artarak sırasıyla 2,08, 2,21, 2,45, 2,69 ve 2,83 km/s değerlerine ulaşmıştır. Dayanım sonuçlarında da benzer bir eğilim gözlenmiştir. Basınç ve eğilme dayanımları sırasıyla %52–178 ve %55–175 oranlarında artmıştır. En yüksek MW içeriğine (%30) sahip karışım, 2,83 km/s ultrases geçiş hızı, 15,50 MPa basınç dayanımı ve 3,06 MPa eğilme dayanımı ile en iyi mekanik özellikleri göstermiştir. Bu iyileşmeler MW'nin matris içerisindeki rolüne bağlanabilir. Gözlenen iyileşmelerin, MW'nin daha ince tane boyutu ve nispeten yüksek özgül yüzey alanıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bu özellikler, parçacık paketlenmesini iyileştirerek gözenek hacmini azaltmakta ve matrisin yoğunlaşmasına katkıda bulunarak mikro-dolgu etkisi sağlamaktadır. Ayrıca, MW'nin nispeten kohezyonlu yapısı AAB'nin stabilitesini desteklemiş ve böylece dayanım artışına ilave katkı sağlamış olabilir. Bu bulgular, AAM'lerde benzer iyileşmelerin gözenek yapısının incelmesi ve matrisin yoğunlaşmasıyla ilişkilendirildiği literatürde daha önce bildirilen sonuçlarla [39,40] uyumludur.

Şekil 5, RTW-MW esaslı AAB'lerde basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve birim hacim ağırlık arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 5. RTW-MW esaslı AAB'lerde basınç dayanımına bağlı olarak ultrases geçiş hızı ve birim hacim ağırlıktaki değişim.

Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasındaki güçlü doğrusal ilişki, yalnızca birim hacim ağırlıktaki artışla açıklanamayacak düzeyde daha belirgin bir mikroyapısal iyileşmenin varlığına işaret etmektedir. Ultrasonik dalgaların yayılımı, malzemenin birim hacim ağırlığının yanı sıra katı fazın sürekliliğine, gözeneklerin birbiriyle bağlantılılık derecesine ve iç yapıdaki süreksizliklerin dağılımına da bağlıdır. Bu çalışmada elde edilen yüksek korelasyon katsayısı (R^2 = 0,9944), MW ilavesinin daha sürekli bir matris oluşumunu desteklemiş olabileceğini ve böylece ultrasonik dalgaların daha az kesintiye uğrayarak yayılmasına olanak sağladığını düşündürmektedir. Bu sonuç, ultrases geçiş hızı ölçümünün AAB'lerde mikroyapısal bütünlüğün değerlendirilmesinde pratik ve tahribatsız bir yöntem

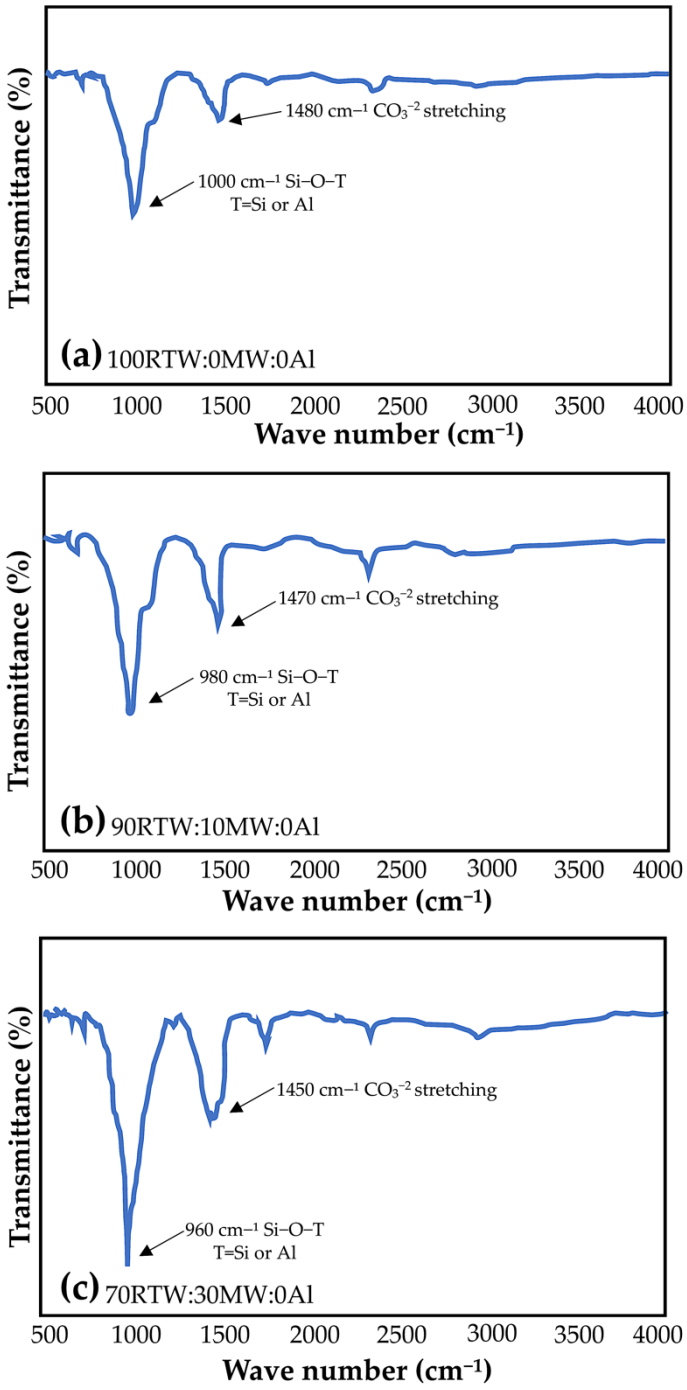
olarak kullanılabileceğini göstermektedir [41]. Buna karşılık, birim hacim ağırlık ile basınç dayanımı arasındaki nispeten daha zayıf ilişki, mekanik performansı açıklamak için tek başına birim hacim ağırlığın yeterli olmadığını ve mikroyapısal süreklilikle ilişkili parametrelerin de önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

3.1.2. AAB'lerin Mikroyapısal ve Faz Analizi

Farklı MW içeriklerine sahip karışımların FTIR spektrumları Şekil 6'da gösterilmektedir. 950–1000 cm^{-1} civarında belirgin bir absorpsiyon bandı gözlenmiştir. Bu bant genellikle Si–O–T (T = Si veya Al) bağlarının asimetrik gerilme titreşimleriyle ilişkilendirilmekte ve alkali aktivasyon sırasında oluşan alüminosilikat jel yapısının karakteristik bir göstergesi olarak kabul edilmektedir [42]. %30 MW içeren numunede Si–O–T bandının bir miktar daha keskin olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, gözlenen spektral değişim nispeten sınırlı olup ilave jeopolimerizasyonun veya yeni reaksiyon ürünlerinin oluşumunun açık bir kanıtı olmaktan ziyade, mevcut alüminosilikat matris içerisindeki yerel bağlanma ortamının değişimi olarak yorumlanmıştır [43]. Ayrıca, karbonat (CO_3^{2-}) titreşimlerine karşılık gelen 1400–1500 cm^{-1} bölgesinde bant şiddetinde bir artış gözlenmiştir. Bu artış, MW içeriğinin artmasıyla daha belirgin hale gelmiş olup MW'nin kalsiyum karbonat bakımından zengin bileşimiyle uyumludur [44]. Fiziksel ve mekanik sonuçlarla birlikte değerlendirildiğinde, bu gözlemler MW'nin ağırlıklı olarak düşük reaktiviteli, karbonat bakımından zengin bir mikro-dolgu malzemesi olarak işlev görerek matrisin yoğunlaşmasına katkıda bulunduğunu düşündürmektedir.

Şekil 7'de sunulan XRD desenleri, esas olarak hammaddelerden kaynaklanan kalıntı kristalin fazlarla karakterize edilmiştir. Kuvars ve albit tüm numunelerde baskın kristalin fazlar olarak varlığını sürdürürken, karbonat bakımından zengin mermer atığının karışıma ilave edilmesi nedeniyle MW içeriğinin artmasıyla kalsit yansımalarının şiddeti artmıştır. Ayrıca birkaç minör yansıma da gözlenmiş; ancak mevcut XRD verilerine dayanarak bu pikler ilave kristalin reaksiyon ürünleriyle kesin olarak ilişkilendirilememiştir. Bu nedenle, MW ilavesiyle ilişkili herhangi bir yeni kristalin faz yeterli güvenilirlik düzeyinde tanımlanamamıştır. Sonuçlar, MW'nin tespit edilebilir kristalin reaksiyon ürünleri oluşturmaktan ziyade, düşük reaktiviteli ve karbonat bakımından zengin bir mikro-dolgu malzemesi olarak işlev görerek matrisin yoğunlaşmasına ağırlıklı olarak katkıda bulunduğunu göstermektedir.

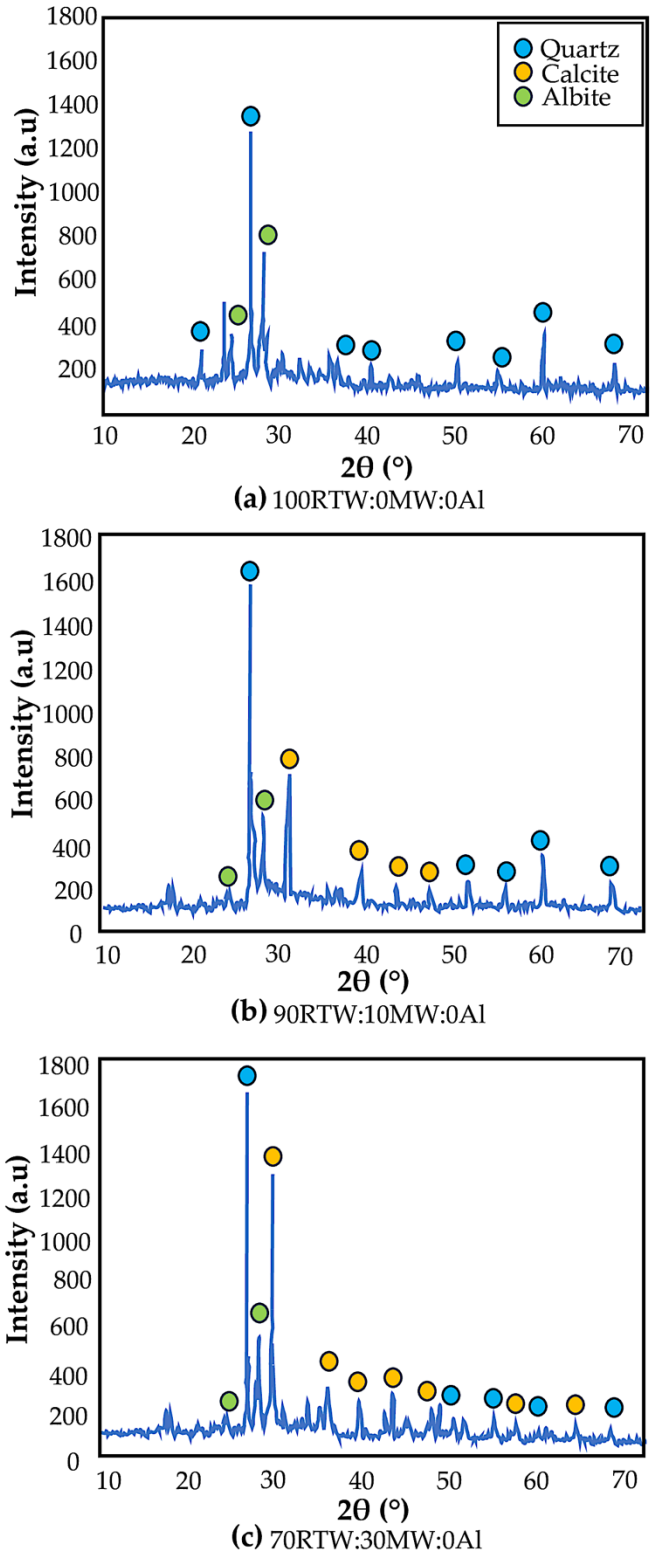
XRD ve FTIR sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, MW ilavesi yeni kristalin reaksiyon ürünlerinin güvenilir bir şekilde tanımlanmasına olanak vermemiştir. Bunun yerine, karbonatla ilişkili FTIR bandının şiddetindeki artış ile XRD desenlerinde gözlenen daha yüksek kalsit pik şiddeti, MW ilavesiyle sisteme dahil edilen daha yüksek karbonat içeriğini yansıtmaktadır. Si–O–T bandındaki hafif keskinleşme ise ilave jeopolimerizasyonun bir kanıtı olmaktan ziyade mevcut alüminosilikat jel yapısındaki bir değişim olarak yorumlanmıştır.



Şekil 6. Seçilen numunelerin FTIR spektrumları: (a) Referans numune (100RTW:0MW:0Al). (b) 90RTW:10MW:0Al. (c) 70RTW:30MW:0Al.

Fiziksel ve mekanik özelliklerdeki iyileşmelerle birlikte değerlendirildiğinde, bu bulgular MW'nin esas olarak düşük reaktiviteli, karbonat bakımından zengin bir mikro-dolgu malzemesi olarak işlev gördüğünü ve başlıca parçacık paketlenmesine, matrisin yoğunlaşmasına ve gözenek yapısının incelmesine katkıda bulunduğunu düşündürmektedir. Mevcut XRD ve FTIR sonuçları bu yorumu desteklemekle birlikte, reaksiyon mekanizmasının tam olarak açıklığa kavuşturulması ve MW'nin alkali-aktive matris

içerisindeki katkısının doğrulanması için SEM-EDS, NMR ve TGA gibi tamamlayıcı karakterizasyon tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.



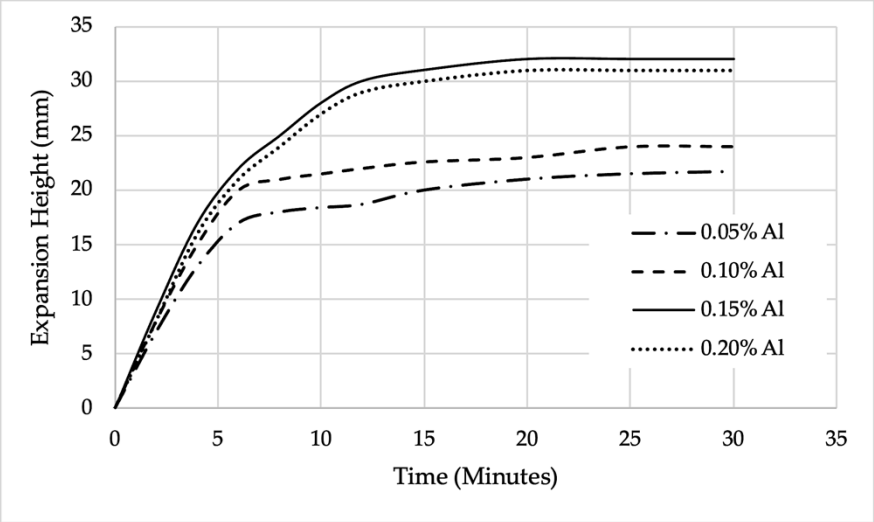
Şekil 7. Seçilen numunelerin XRD sonuçları: (a) Referans numune (100RTW:0MW:0Al). (b) 90RTW:10MW:0Al. (c) 70RTW:30MW:0Al.

Bu çalışmada, farklı oranlarda MW içeren numunelerde porozite %8,35–18,95, su emme oranı %6,82–10,00, 28 günlük basınç dayanımı 8,47–15,50 MPa ve eğilme dayanımı 1,72–3,06 MPa aralığında değişmiştir. Elde edilen sonuçlar, MW içeren AAM'ler için literatürde bildirilen sonuçlarla uyumludur. Örneğin, karo tozu ve MW içeren AAM'lerde daha düşük porozite (%4,63–8,70) ve su emme oranları (%3,13–5,22) bildirilmiş olmasına rağmen, basınç dayanımı değerleri (11,63–15,83 MPa) bu çalışmada elde edilen değerlerle benzer bir aralıkta yer almaktadır [45]. Bu farklılıkların, daha yoğun bir harç yapısının oluşmasını sağlayan agrega kullanımından kaynaklanmış olması muhtemeldir. Başka bir çalışmada, %25–75 MW içeren metakaolin, kırmızı çamur ve cüruf karışımından üretilen numunelerin basınç dayanımları 21,9–28,0 MPa arasında değişmiştir [40]. Benzer şekilde, %25–75 MW içeren metakaolin ve cüruf karışımından üretilen numunelerde 50–65 MPa basınç dayanımı ve 8–10 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir [39]. Bu çalışmalarda gözlenen daha yüksek mekanik özellikler, hem farklı alüminosilikat öncüllerin kullanılmasına hem de harç bileşimine 1/2–1/3 bağlayıcı/agrega oranında agrega ilave edilmesine bağlı olabilir. Buna karşılık, mevcut çalışmada agrega kullanımından bilinçli olarak kaçınılmış ve bu yaklaşımın temel amacı, sonraki AAF üretim aşamasında gözenek oluşumunu olumsuz etkileyebilecek faktörleri sınırlandırmak olmuştur. Bu bağlamda, elde edilen fiziksel ve mekanik özellikler, hedeflenen hafif ve gözenekli iç yapı tasarımı açısından yeterli başlangıç performansı sağlamaktadır. Bu değerlendirmelere dayanarak, 70RTW:30MW:0Al karışımı ikinci aşamadaki AAF üretimi için başlangıç bağlayıcı matrisi olarak seçilmiştir. MW ilavesi birim hacim ağırlıkta artışa yol açmasına rağmen, köpük esaslı AAM'lerin geliştirilmesinde yalnızca düşük bir başlangıç birim hacim ağırlığı elde edilmesi yeterli değildir. Kimyasal köpürtme sırasında oluşan hidrojen gazı kabarcıklarının korunabilmesi için taze matrisin yeterli bütünlüğe ve erken dönem yapısal stabiliteye sahip olması gerekmektedir. Bu bağlamda, en düşük poroziteyi ve en yüksek mekanik dayanımı sergileyen 70RTW:30MW:0Al karışımının, Al kaynaklı gaz oluşumu sırasında gözenek çökmesini ve kontrolsüz gözenek birleşmesini sınırlandırabilecek daha stabil bir başlangıç matrisi sağlayabileceği değerlendirilmiştir. Böylece ikinci aşamada, Al içeriğinin gözenek gelişimi, birim hacim ağırlık, mekanik davranış ve ısıl performans üzerindeki etkileri daha stabil bir bağlayıcı sistem üzerinden incelenmiştir.

3.2. Alkali-Aktive Köpüklerin Özellikleri

3.2.1. AAF'lerin Köpürme Öncesi Davranışı ve Genleşme Performansı

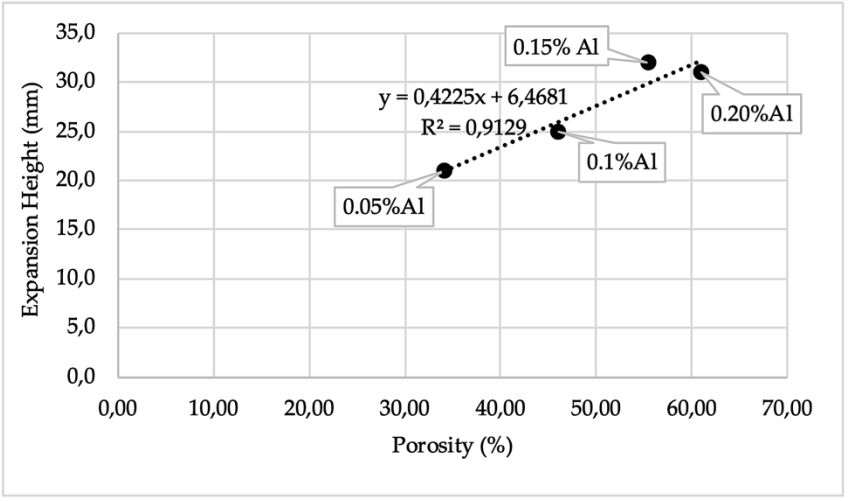
Şekil 8, farklı Al içeriklerine sahip AAF'lerin zamana bağlı genleşme davranışını göstermektedir.



Şekil 8. Farklı Al içeriklerine sahip AAF'lerin zamana bağlı genleşme davranışı.

Tüm karışımlarda, genleşme yüksekliği başlangıçta hızlı bir artış göstermiştir. Bu davranış, Al tozunun alkali ortamda reaksiyona girmesi sonucunda H_2 gazının oluşmasına ve ardından oluşan gazın taze matris içerisinde hapsolmasına bağlanabilir. Zaman ilerledikçe, yükseklikteki artış hızı azalmış ve bir plato bölgesi oluşmuştur. Al içeriğinin artırılması genleşme davranışını önemli ölçüde etkilemiş, ancak bu etki doğrusal bir eğilim göstermemiştir. En düşük Al içeriğinde (%0,05), sınırlı gaz oluşumu nedeniyle genleşme düşük düzeyde kalırken, %0,10 Al içeren karışımda genleşmede belirgin bir artış gözlenmiştir. En yüksek genleşme yüksekliği %0,15 Al içeren numunede kaydedilmiştir. Bu durum, gaz oluşumu ile taze matrisin gözenekleri stabilize etme kapasitesi arasında uygun bir dengenin sağlandığını düşündürmektedir. Buna karşılık, gaz oluşumu için daha fazla miktarda Al bulunmasına rağmen, %0,20 Al içeren numunede genleşme yüksekliği sınırlı kalmıştır. Bu davranış, yüksek Al içeriklerinde gaz oluşumunun, taze matrisin gaz kabarcıklarını tutma ve oluşan gözenek yapısını stabilize etme kapasitesini aşmış olabileceğini göstermektedir. Benzer davranışlar literatürde de bildirilmiştir [46, 47]. Bu çalışmada oluşan gaz hacmi ve taze karışımların reolojik özellikleri doğrudan ölçülmemiş olmakla birlikte, gözlenen davranışın gaz oluşumu ile taze matrisin yapısal gelişimi arasındaki etkileşimden kaynaklandığı düşünülmektedir.

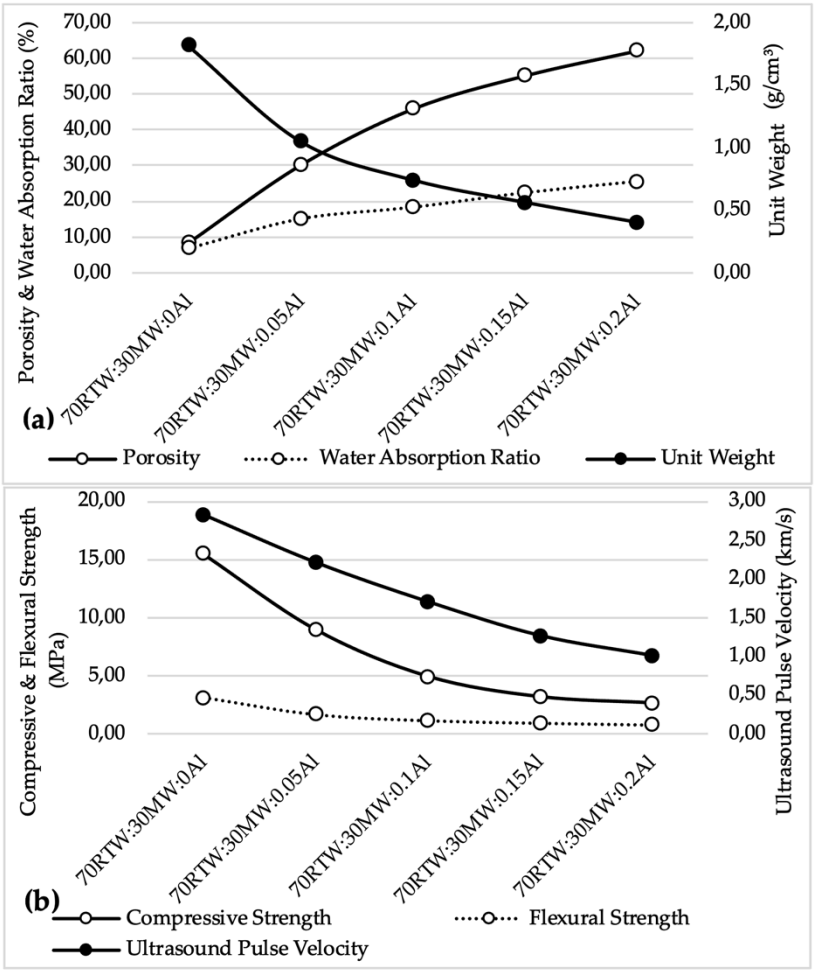
Şekil 9, köpürme öncesi deneylerden elde edilen genleşme yüksekliği ile sertleşmiş AAF numunelerinin nihai porozitesi arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sonuçlar, genleşme yüksekliği ile porozite arasında güçlü bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir (R^2 = 0,9129). Bu durum, taze matris içerisinde gerçekleşen genleşmenin nihai gözenek yapısının oluşumunda önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Al içeriği arttıkça hem genleşme yüksekliği hem de porozite artmıştır. En düşük Al içeriğine (%0,05) sahip karışımlar daha sınırlı genleşme ve daha düşük porozite sergilerken, %0,10 ve %0,15 Al içeren numunelerde her iki parametrede de belirgin artışlar gözlenmiştir. Özellikle %0,15 Al içeren karışım en yüksek genleşmeyi göstermiş olup bu durum, gaz oluşumu ile matris stabilitesi arasında daha uygun bir denge sağlandığına işaret etmektedir. Buna karşılık, %0,20 Al içeren numunede porozite artmaya devam ederken genleşme yüksekliğinde yalnızca sınırlı bir artış gözlenmiştir. Bu davranış, yüksek Al içeriklerinde gözenek birleşmesi, olası gaz kaçışı ve yerel yapısal kararsızlıklar gibi mekanizmalarla ilişkili olabilir. Bulgular, genleşme yüksekliğinin nihai porozitenin tahmin edilmesinde önemli bir parametre olduğunu ve gözenek yapısının yalnızca genleşme davranışından değil, aynı zamanda sertleşme sürecinde meydana gelen mikroyapısal dönüşümlerden de etkilendiğini göstermektedir. Bu bulgular, köpürme öncesi aşamada elde edilen genleşme verilerinin AAF'lerin gözenek yapısının tasarlanmasında pratik ve öngörücü bir yaklaşım sunduğunu düşündürmektedir. Gözenek hacmi ve gözenek bağlantılılığı, gözenekli malzemelerde ısı transfer mekanizmalarını doğrudan etkilediğinden, köpürme öncesi davranış nihai AAF yapısının potansiyel ısı yalıtım performansına ilişkin de başlangıç düzeyinde bir gösterge sağlayabilir.



Şekil 9. Farklı miktarlarda Al tozu içeren AAF'lerde köpürme öncesi genleşme yüksekliği ile nihai porozite arasındaki ilişki.

3.2.2. AAF'lerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Farklı Al tozu içeriklerine sahip AAF numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Al içeriğine bağlı olarak AAF'lerin özelliklerindeki değişimler: (a) Fiziksel özellikler. (b) Mekanik özellikler.

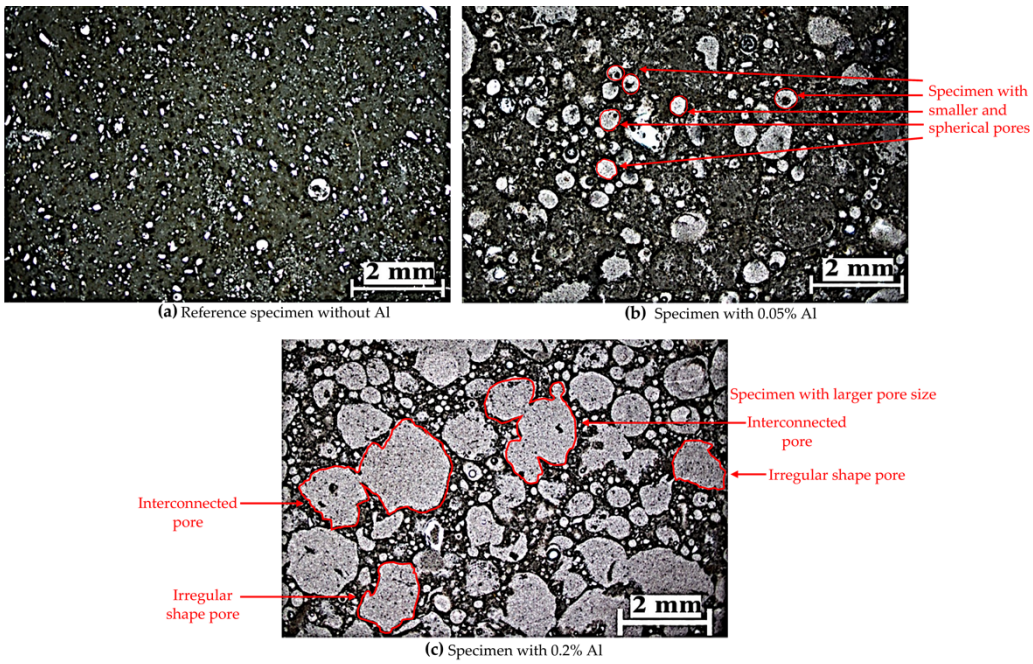
Şekil 10a'da gösterildiği üzere, Al tozu miktarının artırılması numunelerin porozite ve su emme oranlarında belirgin bir artışa neden olurken, birim hacim ağırlık sistematik olarak azalmıştır. Bu davranış, Al tozunun alkali çözelti ile reaksiyona girerek hidrojen gazı oluşturması ve ardından oluşan gaz kabarcıklarının matris içerisinde hapsolmasıyla açıklanabilir. Gaz oluşumunun artmasıyla birlikte matristeki toplam gözenek hacmi artmış ve bunun sonucunda katı faz oranı azalmıştır [48].

Şekil 10b'de, Al içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızında belirgin bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma, artan porozite nedeniyle AAF'nin yük taşıyan katı faz oranının azalmasına bağlanabilir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar yalnızca toplam porozitedeki artışla açıklanamayacak daha karmaşık bir mikroyapısal dönüşüme işaret etmektedir. Bu çalışmada Al içeriğinin artmasıyla birlikte yalnızca toplam gözenek hacmi artmamış, aynı zamanda gözenekler büyümüş, şekil bakımından daha düzensiz hale gelmiş ve daha bağlantılı bir yapı oluşturmuştur. Bu dönüşüm, katı faz sürekliliğini azaltarak yük aktarım mekanizmasını zayıflatmış ve dolayısıyla mekanik dayanımda önemli bir azalmaya yol açmıştır. Bu bulgular, AAF'lerin performans değerlendirmesinde yalnızca toplam porozitenin değil, gözenek yapısının morfolojik özelliklerinin de dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Bu özellikler takip eden bölümlerde ele alınmaktadır. Ultrases geçiş hızındaki azalma da söz konusu mikroyapısal dönüşümü desteklemekte olup, porozitedeki artışa ve daha düzensiz ve bağlantılı bir gözenek ağının gelişmesine bağlanabilir [41]. Isıl performans açısından değerlendirildiğinde, gözenek yapısındaki bu dönüşüm, sürekli ısı transfer yollarını kesintiye uğratarak ve etkin katı faz iletim alanını azaltarak ısıl iletkenliğin düşmesine katkıda bulunabilir.

Al içeriğinin artırılması AAF'lerin birim hacim ağırlığını etkili bir şekilde azaltmış ve gözenekli bir yapının gelişimini desteklemiş olmakla birlikte, sonuçlar optimum karışım tasarımında yalnızca porozitenin değil, aynı zamanda ısıl verimlilik ile mekanik bütünlük arasındaki dengenin de dikkate alınması gerektiğini göstermiştir. Taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında temel amaç yüksek mekanik dayanım elde etmek değil, düşük birim hacim ağırlık ve düşük ısıl iletkenlik sağlarken yeterli yapısal bütünlüğü korumaktır. Önceki çalışmalarda AAF'ler için geniş bir mekanik özellik aralığı bildirilmiş olup, taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında yaklaşık 1–10 MPa basınç dayanımı değerlerinin yaygın olarak gözlendiği belirtilmiştir [19]. Bu çalışmada, %0,15 Al içeren numune düşük birim hacim ağırlık, düşük ısıl iletkenlik ve kabul edilebilir mekanik performans arasında uygun bir denge sağlamıştır. Buna karşılık, %0,20 Al içeren karışım daha düşük ısıl iletkenlik sergilemesine rağmen, daha düşük mekanik performansı aşırı gaz oluşumunun gözenek birleşmesini ve gözenekler arası bağlantılılığı artırarak matris sürekliliğini azaltabileceğini düşündürmektedir. Dolayısıyla sonuçlar, AAF'lerin performans optimizasyonunun yalnızca gözenek hacminin en üst düzeye çıkarılmasına değil, aynı zamanda gözenek morfolojisinin, gözenek boyutu dağılımının ve gözenekler arası bağlantılılık derecesinin kontrol edilmesine de bağlı olduğunu göstermektedir.

3.2.3. AAF'lerin Optik Mikroyapısı

Şekil 11, optik mikroskop görüntülerinde gözlendiği üzere, Al tozu içeriğinin artmasıyla AAF'lerin gözenek morfolojisinde meydana gelen değişimleri göstermektedir.



Şekil 11. Farklı Al tozu içeriklerine sahip AAF'lerin optik mikroyapısı: (a) Al içermeyen referans numune. (b) %0,05 Al. (c) %0,20 Al. Artan gaz oluşumu ve gözenek birleşmesiyle birlikte nispeten homojen ve küresel gözeneklerden daha büyük, düzensiz ve birbiriyle bağlantılı gözenek yapılarına geçiş gösterilmektedir.

Al tozu içermeyen referans numunede (Şekil 11a), nispeten homojen olarak dağılmış sınırlı sayıda küçük gözenek içeren, görece kompakt bir matris gözlenmiştir. Al kaynaklı herhangi bir gaz oluşum mekanizması bulunmadığından, bu morfoloji esas olarak karıştırma sırasında matriste hapsolan hava boşluklarına bağlanabilir. Düşük miktarda Al ilavesiyle (%0,05, Şekil 11b), Al'nin alkali ortamda reaksiyonu sırasında meydana gelen gaz çıkışı nedeniyle gözenek oluşumu önemli ölçüde artmıştır. Bu numunede gözenekler ağırlıklı olarak küçük ve yaklaşık küresel şekilli olup, daha düzenli ve nispeten homojen bir dağılım sergilemiştir. Bu morfoloji, düşük Al içeriğinde nispeten sınırlı gaz oluşumundan kaynaklanmış olabilir; bu durum taze matrisin gaz kabarcıklarını daha etkili bir şekilde tutmasına ve gelişen gözenekleri stabilize etmesine olanak sağlamıştır. Al içeriğinin %0,20'ye yükseltilmesiyle (Şekil 11c) gözenek yapısında önemli bir değişim meydana gelmiştir. Daha büyük, düzensiz şekilli ve birbiriyle bağlantılı gözenekler gözlenmiştir. Bu durum, artan gaz oluşumunun gözenek duvarlarının stabilitesini azaltırken gözenek birleşmesini teşvik etmiş olabileceğini göstermektedir. Gözenekler arası bağlantılılığın artması, makro gözenek oranındaki artış ve matris heterojenliğinin daha belirgin hale gelmesiyle ilişkilendirilmiştir.

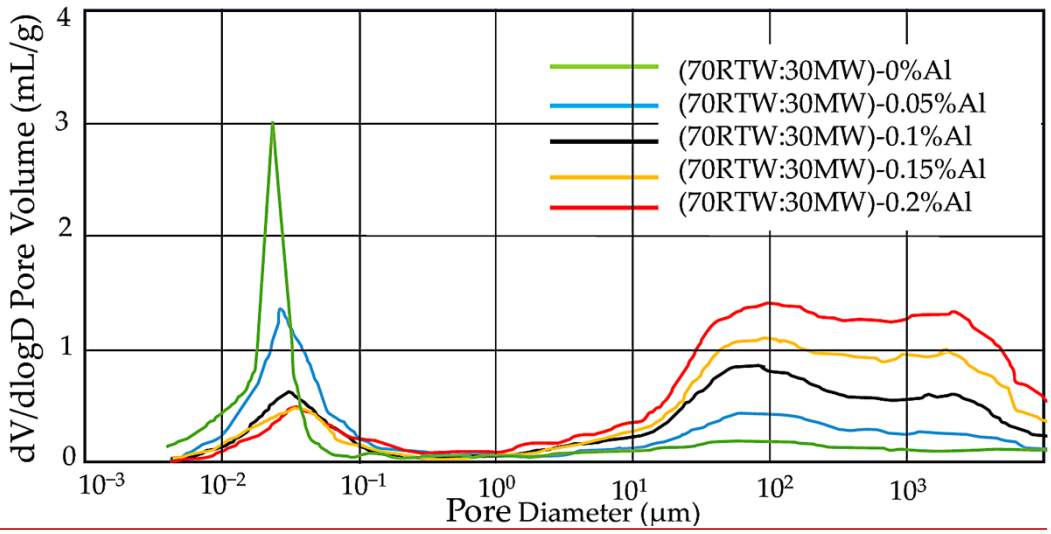
Optik mikroskopi gözlemleri, MIP analizlerinden elde edilen gözenek boyutu dağılımı sonuçlarıyla uyumludur. Düşük Al içeriklerinde gözlenen daha küçük ve daha küresel gözenek yapısı, MIP sonuçlarında belirlenen daha yüksek nanogözenek oranıyla desteklenirken; yüksek Al içeriklerinde gözlenen daha büyük ve birbiriyle bağlantılı gözenek morfolojisi, MIP ile ölçülen makrogözenek oranındaki belirgin artışla uyumludur. Bu gözlemler birlikte değerlendirildiğinde, artan Al içeriğiyle birlikte meydana gelen gözenek irileşmesine ilişkin birbirini tamamlayan nitel ve nicel kanıtlar sunmaktadır.

3.2.4. AAF'lerin Gözenek Yapısı Analizi

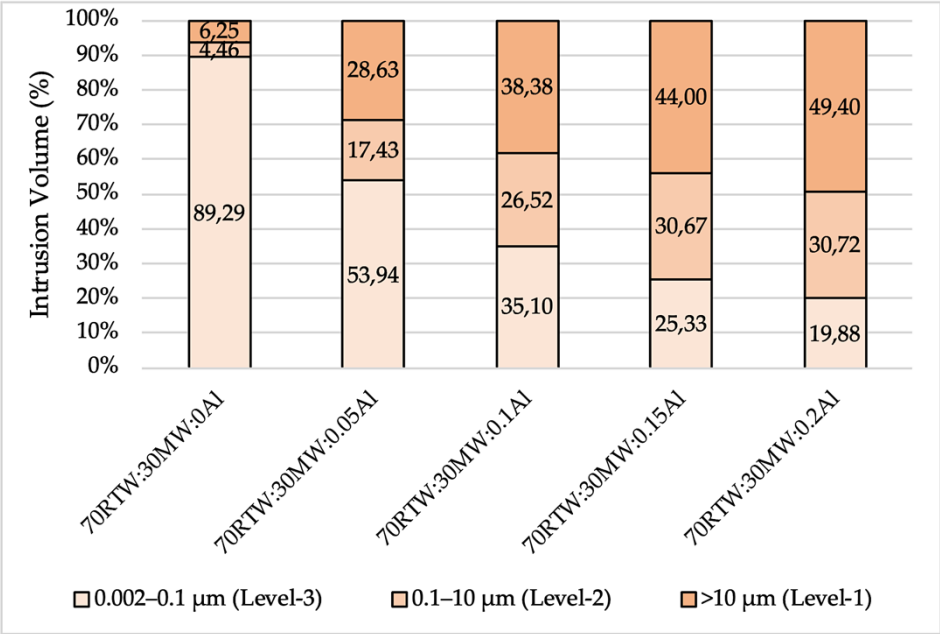
AAF'lerdeki gözenek türleri dört grupta sınıflandırılabilir: 10 μm'den büyük makrogözenekler (üretim sırasında kasıtlı olarak oluşturulan hava kabarcıkları)

(Seviye-1); 0,1 µm ile 10 µm arasındaki mezogözenekler (kısmen reaksiyona girmiş parçacıkların içinde veya çevresinde oluşan) (Seviye-2); 0,002 µm ile 0,1 µm arasındaki nanogözenekler (matris içerisindeki jel boşluklarından oluşan) (Seviye-3); ve 0,002 µm'den küçük moleküler gözenekler (alüminosilikat ağıyla ilişkili) (Seviye-4) [49]. Şekil 12'de verilen gözenek boyutu dağılımı, Al içeriğinin artmasıyla gözenek yapısının yalnızca hacimsel olarak genişlemediğini, aynı zamanda karakterinin de değiştiğini göstermektedir. Al içermeyen numunedeki gözenek yapısı büyük ölçüde jel matrisi içerisinde dağılmış ince gözeneklerden oluşurken, Al ilavesiyle birlikte dağılım daha büyük gözenek çaplarına doğru kaymıştır. Bu durum, nanogözenek oranının %89,29'dan %19,88'e azalması ve buna karşılık makrogözenek oranının %6,25'ten %49,40'a yükselmesiyle açıkça görülmektedir (Şekil 13).

MIP yönteminin esas olarak erişilebilir gözenek hacmini temsil ettiği, toplam porozite ölçümlerinin ise hem erişilebilir hem de kısmen kapalı gözenekleri içerdiği dikkate alınmalıdır. Bu nedenle, farklı ölçüm teknikleriyle elde edilen mutlak değerler arasında farklılıklar ortaya çıkabilir. Bununla birlikte, her iki yaklaşım da aynı eğilimi tutarlı bir şekilde doğrulamakta ve Al içeriğinin artmasıyla birlikte gözenek hacminin kademeli olarak arttığını ve gözenek yapısının irileştiğini göstermektedir. Bu önemli değişim, gözenek oluşumunda baskın sürecin değişmiş olabileceğini düşündürmektedir. Bu davranış, alkali ortamda oluşan hidrojen gazı kabarcıklarının, özellikle yüksek Al içeriklerinde, taze matris yeterli kararlılığa ulaşmadan önce büyüme ve birleşme eğilimi göstermesine bağlanabilir. Bu süreç, daha büyük, düzensiz ve heterojen makrogözeneklerin oluşmasına yol açarak katı faz sürekliliğini zayıflatmakta ve ultrasonik dalga yayılımını kesintiye uğratmaktadır. Bu nedenle, mekanik özelliklerde gözlenen azalma yalnızca porozitedeki artışa değil, aynı zamanda gözenek büyümesine, gözeneklerin birleşmesine ve daha süreksiz bir gözenek yapısının gelişmesine de bağlanmalıdır. Bu bulgu, AAF'lerin mekanik performansında gözenek boyutunun belirleyici rolünü vurgulayan önceki çalışmalarla uyumludur. Zhang ve ark. [50] ile Chen ve ark. [49], makrogözeneklerin geopolimer köpük betonların mekanik performansını önemli ölçüde azalttığını bildirmiştir. Dolayısıyla, AAF'lerin ısı yalıtım performansı yalnızca toplam poroziteye dayalı olarak değerlendirilmemeli; gözenek morfolojisi, gözenek boyutu dağılımı ve gözenekler arası bağlantı derecesi de dikkate alınmalıdır.



Şekil 12. Al içeriğinin AAF'lerin gözenek boyutu dağılımı üzerindeki etkisi.



Şekil 13. Al içeriğinin AAF'lerin gözenek hacim fraksiyonları üzerindeki etkisi.

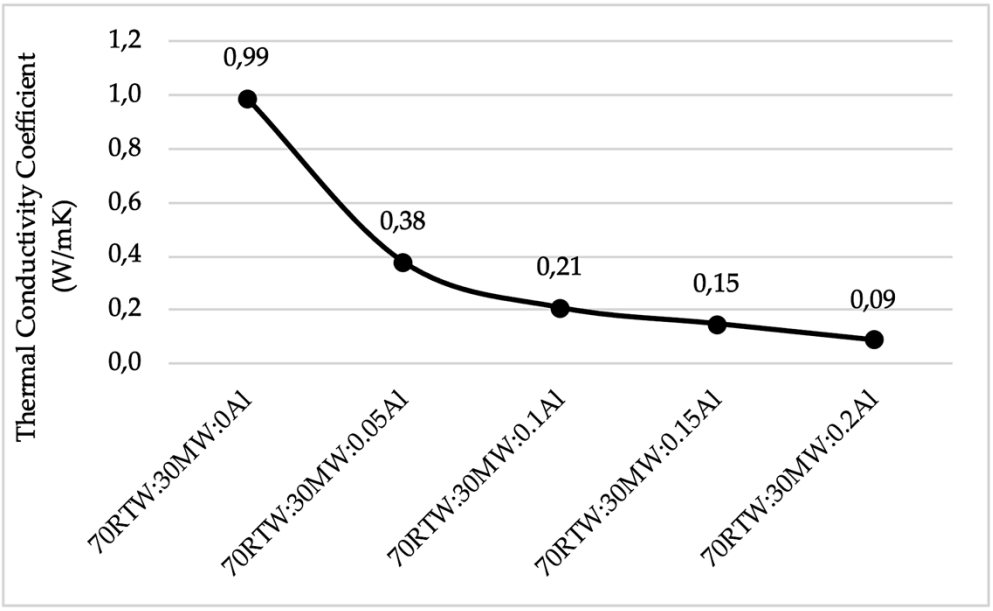
Toplam gözenek hacmi değerleri de bu eğilimi desteklemektedir. Tablo 3'te gösterildiği üzere, referans numunede 0,336 mL/g olan toplam gözenek hacmi, sırasıyla %0,05, %0,10, %0,15 ve %0,20 Al içeren numunelerde 0,482, 0,641, 0,750 ve 0,830 mL/g değerlerine ulaşmıştır. Bu artış, porozite sonuçlarıyla uyumludur ve Al tozunun köpük oluşturucu etkisini ayrıca desteklemektedir.

Tablo 3. MIP testi ile elde edilen AAF'lerin gözenek hacimleri.

Specimens	Pore Volume (mL/g)			Total Pore Volume (mL/g)
	0.002–0.1 µm (Level-3)	0.1–10 µm (Level-2)	≥10 µm (Level-1)	
70RTW:30MW:0Al	0.300	0.015	0.021	0.336
70RTW:30MW:0.05Al	0.260	0.084	0.138	0.482
70RTW:30MW:0.10Al	0.225	0.170	0.246	0.641
70RTW:30MW:0.15Al	0.190	0.230	0.330	0.750
70RTW:30MW:0.20Al	0.165	0.255	0.410	0.830

3.2.5. AAF'lerin Isıl Özellikleri

Farklı Al içeriklerine sahip numunelerin kuru durumdaki ısıl iletkenlik değerleri Şekil 14'te verilmiştir. Kuru durumdaki ısıl iletkenlik, Al tozu içeriğinin artmasıyla önemli ölçüde azalmıştır. Referans numunede 0,99 W/m·K olan ısıl iletkenlik, %0,05 Al ilavesiyle keskin bir düşüş göstererek 0,38 W/m·K'ye gerilemiştir. Bu azalma eğilimi Al içeriğinin artmasıyla devam etmiş ve %0,10, %0,15 ve %0,20 Al içeren karışımlarda sırasıyla 0,21, 0,15 ve 0,09 W/m·K değerlerine ulaşmıştır. Bu davranış, Al içeriğinin artmasıyla gözenek hacminin ve özellikle makrogözenek fraksiyonunun artmasına bağlanabilir. Köpük yapısının gelişmesiyle katı faz sürekliliği azalmakta ve ısı transferi büyük ölçüde düşük ısıl iletkenliğe sahip hava fazı üzerinden gerçekleşmektedir. Ayrıca, porozitedeki artış katı iskelet içerisindeki sürekli ısı transfer yollarını kesintiye uğratmakta ve etkin katı faz ısı iletim alanını azaltarak daha düşük ısıl iletkenlik değerlerine yol açmaktadır [51]. Özellikle %0,05 Al ilavesinin ardından gözlenen keskin düşüş, matristeki hızlı gaz oluşumuna ve gözenek oluşumunun başlangıç aşamalarında meydana gelen mikroyapısal dönüşüme bağlanabilir. Daha yüksek Al içeriklerinde ise gözenek birleşmesi ve bağlantılılık derecesi artmasına rağmen, porozitenin hâlihazırda yüksek olması nedeniyle ısıl iletkenlikteki azalma daha sınırlı hale gelmektedir.



Şekil 14. Al içeriğine bağlı olarak AAF'lerin kuru durumdaki ısıl iletkenliğindeki değişimler.

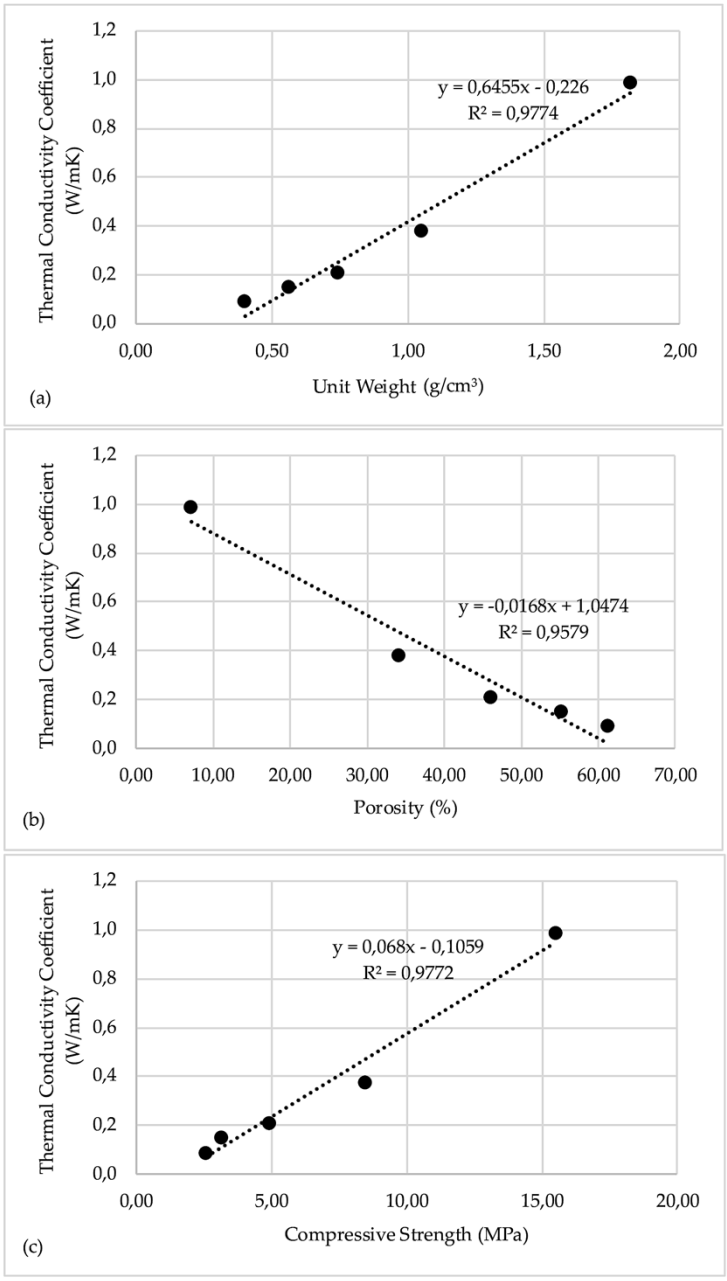
Raporlanan ısıl iletkenlik değerlerinin, deney öncesinde numunelerin sabit kütleye ulaşıncaya kadar kurutulmasının ardından gerçekleştirilen kuru durum ölçümlerine karşılık geldiği belirtilmelidir. Al içeriğinin artırılması, yüksek poroziteli bir yapı oluşturarak kuru durumdaki ısı yalıtım performansını önemli ölçüde iyileştirmesine rağmen, köpüklü karışımlarda gözlenen daha yüksek su emme oranları, kullanım koşullarında gözenek ağına nüfuz eden nemin gözeneklerdeki havanın bir kısmının yerini alabileceğini ve böylece etkin ısıl iletkenliği artırabileceğini göstermektedir. Bu nedenle, raporlanan ısıl iletkenlik değerleri kullanım koşullarındaki ısıl performansı değil, kuru durum özelliklerini temsil eden değerler olarak değerlendirilmelidir. Bu AAF'lerin uzun vadeli ısıl davranışının nicel olarak belirlenebilmesi için farklı nem koşulları altında ilave araştırmalara ihtiyaç vardır.

Şekil 15, AAF'lerin ısıl iletkenliği ile birim hacim ağırlık, porozite ve basınç dayanımı arasındaki ilişkileri göstermektedir. Şekil 15a'da görüldüğü üzere, deneysel veriler birim hacim ağırlığın azalmasıyla ısıl iletkenliğin de azaldığı bir eğilim sergilemekte ve bu eğilim doğrusal bir uyum ile iyi bir şekilde açıklanmaktadır ($R^2 = 0,9774$). Bu davranış, daha yüksek birim hacim ağırlık değerlerinde daha düşük gözenek hacmi ve daha fazla katı faz sürekliliğinin bulunmasına bağlanabilir. Katı faz sürekliliğinin artması, ısı transferi için daha sürekli yolların oluşmasına neden olarak ısıl iletkenliği artırmaktadır. Deneysel karışım sayısının sınırlı olduğu dikkate alındığında, regresyon bağımsız bir tahmin ilişkisi olarak değil, yalnızca incelenen veri seti içerisinde gözlenen eğilimi tanımlamak amacıyla sunulmuştur. Şekil 15b, ısıl iletkenlik ile porozite arasında ters yönlü bir ilişki olduğunu göstermektedir ($R^2 = 0,9579$). Porozitenin artmasıyla ısıl iletkenlik önemli ölçüde azalmıştır. Bu eğilim, gözenek hacminin artmasıyla katı faz sürekliliğinin bozulması ve ısı akış yollarının kesintiye uğramasıyla açıklanabilir.

Şekil 15c, ısıl iletkenlik ile basınç dayanımı arasında doğrusal bir uyumla temsil edilen pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir ($R^2 = 0,9772$). Basınç dayanımındaki artış, mikroyapının daha kompakt ve daha az gözenekli hâle gelmesiyle ilişkilidir. Bu mikroyapısal yoğunlaşma, birim hacim ağırlığı ve katı faz sürekliliğini artırarak ısı transferi için daha etkin bir ortam oluşturmakta ve dolayısıyla ısıl iletkenliğin artmasına yol açmaktadır. Regresyon analizleri

deneysel veri seti içerisinde tutarlı eğilimler ortaya koymakla birlikte, bağımsız tahmin modelleri oluşturmak amacıyla değil, gözlenen ilişkileri göstermek amacıyla kullanılmıştır.

Genel olarak regresyon analizleri, incelenen karışımlarda ısıl iletkenlik, birim hacim ağırlık, porozite ve basınç dayanımı arasında gözlenen ilişkilerin nicel bir tanımını sunmaktadır. Bu sonuçlar, gözenek yapısının AAF'lerin ısıl performansının belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Gözlenen eğilimler, incelenen bileşim aralığında karışım tasarımı açısından yararlı bir rehber sağlayabilmekle birlikte, evrensel tahmin modelleri olarak yorumlanmamalıdır.



Şekil 15. Isıl iletkenlik ile AAF'lerin (a) birim hacim ağırlığı, (b) porozitesi ve (c) basınç dayanımı arasındaki ilişkiler.

Tablo 4, farklı prekürsör malzemeler ve köpürtücü ajanlarla üretilen AAF'lerin yalnızca performans açısından değil, aynı zamanda gözenek oluşum mekanizması ve baskın gözenek özellikleri açısından da farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4. Farklı köpürtme stratejileri kullanılarak üretilen AAF'lerin fiziksel performanslarının ve gözenek gelişim mekanizmalarının karşılaştırılması.

Ref	Precursor	Foaming Agent (wt%)	Unit Weight (g/cm^3)	Porosity (%)	Thermal Conduct. (W/m·K)	Compressive Strength (MPa)	Pore-Forming Mechanism	Dominant Pore Feature
[20]	CC + MK	H_2O_2 (0.24)	0.73–0.82	63–69	-	3.64–7.60	O_2 release	Closed spherical pores
[21]	WGC	Na-perborate (5)	0.80	-	-	1.70	Hydrolysis-induced O_2 generation	Uniform fine pore network
		H_2O_2 (10)	0.70			4.60	O_2 release	Fine and relatively homogeneous pores
		Al (1)	0.70			2.80	H_2 release	Large closed macropores
[22]	FA + PST	H_2O_2 (0.5–2.5)	1.05–1.20	-	-	-	O_2 release	Uniform macropore distribution
		Na-bicarbonate (5–10)	1.07–1.28	-	-	-	CO_2 generation by thermal decomposition	Elongated and unstable macropores
		Al (0.2–1)	1.09–1.29	-	-	-	H_2 release	Non-uniform localized macro voids
[52]	BW	Al (0.15)	0.77–0.83	-	0.22–0.27	0.70–2.42	H_2 release	Fine spherical pores
[53]	GGBS + BW	Precast foam (0.17)	-	65	0.11–0.12	1.33–3.34	Bubble stability-controlled pore formation	Spherical closed pores at low alkalinity; irregular interconnected pores at high alkalinity
This study	RTW + MW	Al powder (0.05–0.2)	0.40–1.05	30.1–62.1	0.09–0.38	2.58–8.95	H_2 evolution; matrix stability controlled	Fine and spherical pores at low Al contents; larger, irregular, and partially interconnected macropores at high Al contents.

H_2O_2 ve sodyum perborat gibi O_2 oluşumuna dayalı malzemeler genellikle daha ince ve daha homojen gözenek yapıları geliştirirken, Al tozu kullanılan AAF'lerde H_2 gazı oluşumu ve yüksek Al içeriklerinde meydana gelen gözenek birleşmesi nedeniyle daha büyük makrogözenekler oluşmaktadır. Bu çalışma, önceki çalışmalarla uyumlu olarak, porozitenin artmasıyla birim hacim ağırlık ve ısıl iletkenliğin azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte bulgular, gözenek oluşumunun yalnızca gaz üretimiyle değil, aynı zamanda gaz oluşumu ile taze matrisin gaz kabarcıklarını tutma ve gelişmekte olan gözenekleri stabilize etme kapasitesi arasındaki dengeyle de ilişkili olduğunu göstermektedir. Özellikle, yüksek Al içeriklerinde daha fazla gaz oluşumu beklenmesine rağmen hacimsel artışın sınırlı kalması, gözenek birleşmesi ve gaz kaçışı gibi mekanizmaların baskın hâle geldiğine işaret etmektedir. Bulgular, en düşük ısıl iletkenlik değerine sahip karışımın her zaman optimum performansı sağlamadığını göstermektedir. %0,20 Al içeren numune yüksek porozite ve düşük ısıl iletkenlik sergilerken, dayanımda önemli bir kayıp göstermektedir. Buna karşılık, %0,15 Al içeren karışım, daha kararlı bir gözenek yapısı sayesinde ısıl ve mekanik performans arasında optimum bir denge sunmaktadır. Bu çalışma, AAF karışım tasarımında yalnızca toplam porozitenin değil, aynı zamanda kontrollü gözenek mimarisinin ve Al kaynaklı mikroyapısal gelişimin de dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Literatürde daha önce bildirilen AAF sistemleriyle karşılaştırıldığında, bu çalışmada geliştirilen RTW-MW esaslı AAF, ısı yalıtım kapasitesi ile mekanik performans arasında rekabetçi bir denge sağlamaktadır. Literatürde bildirilen bazı yüksek poroziteli AAF'ler çok düşük ısıl iletkenlik değerlerine ulaşmasına rağmen, bu iyileşmeye genellikle basınç dayanımında önemli bir azalma eşlik etmektedir. Mevcut sonuçlar, alüminosilikat bakımından zengin RTW ile karbonat bakımından zengin MW'nin birlikte kullanımının yeterince kararlı bir başlangıç matrisi oluşumunu kolaylaştırdığını ve böylece Al kaynaklı köpürme sırasında

kontrollü gözenek gelişimine olanak sağladığını göstermektedir. Dolayısıyla önerilen RTW-MW esaslı AAF, yalnızca atıkların etkin bir şekilde değerlendirilmesine yönelik bir yaklaşım sunmakla kalmayıp, aynı zamanda hafif ve taşıyıcı olmayan yapı uygulamaları için dengeli bir çözüm sunmaktadır.

Tablo 5, geleneksel bölme duvar malzemeleri ile bu çalışmada geliştirilen AAF'lerin birim hacim ağırlık, ısıl iletkenlik ve basınç dayanımı açısından karşılaştırmalı analizini sunmaktadır.

Tablo 5. Geleneksel taşıyıcı olmayan duvar malzemeleri ile AAF'lerin birim hacim ağırlık, ısıl iletkenlik ve basınç dayanımı açısından karşılaştırmalı değerlendirmesi.

Non-loadbearing Wall Materials	Unit Weight (g/cm^3)	Thermal Conduct. (W/m·K)	Compressive Strength (MPa)
Lightweight aggregate concrete [54]	0.8–2.0	0.39–1.6	>4.0
Pumice concrete [54]	0.4–1.3	0.11–0.46	2.5–7.5
Autoclaved aerated concrete [54]	0.4–1.0	0.10–0.30	>4.0
Clay-based perforated brick [54]	0.6–1.0	0.33–0.45	2.5–5.0
Sand-lime brick [54]	0.7–2.2	0.35–1.30	5.0–20.0
70RTW:30MW:0Al	1.82	0.99	15.5
70RTW:30MW:0.05Al	1.05	0.38	8.95
70RTW:30MW:0.10Al	0.74	0.21	4.89
70RTW:30MW:0.15Al	0.56	0.15	3.12
70RTW:30MW:0.20Al	0.40	0.09	2.58

Geleneksel taşıyıcı olmayan duvar malzemeleri, malzeme türüne bağlı olarak genellikle 0,4–2,2 g/cm^3 aralığında birim hacim ağırlığa, 0,10–1,60 W/m·K aralığında ısıl iletkenliğe ve yaklaşık 2,5–20 MPa aralığında basınç dayanımına sahiptir. Bu aralıklar, bölme duvar uygulamalarında kullanılan malzemeler için tipik performans sınırlarını temsil etmektedir. Bu çalışmada geliştirilen 70RTW:30MW esaslı AAF karışımlarında, Al tozu içeriğinin artmasıyla birim hacim ağırlık ve ısıl iletkenlikte önemli bir azalma gözlenmiştir. Birim hacim ağırlık 1,82 g/cm^3'ten 0,40 g/cm^3'e, ısıl iletkenlik ise 0,99 W/m·K'den 0,09 W/m·K'ye düşmüştür. Buna karşılık, basınç dayanımı 15,5 MPa'dan 2,58 MPa'ya kademeli olarak azalmıştır. Dolayısıyla bulgular, birim hacim ağırlık, ısıl iletkenlik ve mekanik dayanım arasında önemli bir etkileşim bulunduğunu göstermektedir. Bu çok parametreli etkileşim dikkate alındığında, karışımların performansı tek bir özelliğe göre değil; ısıl performans, düşük birim hacim ağırlık ve mekanik performans arasındaki denge temelinde değerlendirilmelidir. En yüksek Al içeriğine sahip karışımlar (%0,20 Al) düşük birim hacim ağırlık ve düşük ısıl iletkenlik sergilemiş; ancak basınç dayanımının 2,58 MPa'ya düşmesi, bu karışımın mekanik açıdan daha sınırlı bir uygulama alanına sahip olabileceğini göstermiştir. Buna karşılık, 70RTW:30MW:0.15Al karışımı; 0,56 g/cm^3 birim hacim ağırlık, 0,15 W/m·K ısıl iletkenlik ve 3,12 MPa basınç dayanımı ile daha dengeli bir performans profili sunmaktadır. Bu değerler, söz konusu karışımın hafif bir yapı malzemesi olarak sınıflandırılabileceğini, yaygın bölme duvar malzemeleriyle karşılaştırılabilir bir ısıl iletkenliğe sahip olduğunu ve mekanik dayanım açısından kabul edilebilir sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir. Bu bağlamda, 70RTW:30MW:0.15Al numunesi, ısı yalıtımı, düşük birim hacim ağırlık ve yeterli mekanik performans arasında optimum denge sağlayan karışım olarak değerlendirilebilir.

3.3. AAF Karışımlarının Nicel Sürdürülebilirlik Değerlendirmesi

3.3.1. Atık Kullanımı ve Kaynak Verimliliğinin Değerlendirilmesi

CDW'nin AAF üretiminde prekürsör olarak kullanılması, böylece doğal kaynak tüketiminin azaltılması ve atıkların yüksek katma değerli yapı malzemelerine dönüştürülmesi, önemli bir sürdürülebilirlik stratejisini temsil etmektedir [55]. Bu çalışmada, AAF'lerin kaynak

verimliliğini ve döngüsel ekonomi potansiyelini nicel olarak değerlendirmek amacıyla atık kullanım oranı (WIR) belirlenmiştir. WIR, ISO 14021'de [56] belirtilen geri dönüştürülmüş içerik yaklaşımının kütle dengesi prensibine dayalı olarak hesaplanmıştır. Atık kullanım oranı, ilgili malzeme içerisine dahil edilen atık kökenli malzemelerin kütlece oranını ifade etmektedir. Bu kapsamda iki farklı gösterge tanımlanmıştır: (i) prekürsör bazlı atık kullanım oranı (WIRp) ve (ii) toplam karışım bazlı atık kullanım oranı (WIRt). WIRp, AAF üretiminde kullanılan katı prekürsör içerisindeki atık kökenli malzemelerin oranını ifade ederken; WIRt, alkali aktivatörler ve köpürtücü ajan da dahil olmak üzere tüm karışım içerisindeki atık kökenli malzemelerin toplam oranını temsil etmektedir. Fiziksel, mekanik, ısıl ve mikroyapısal performans açısından en dengeli özellikleri sergileyen optimum 70RTW:30MW:0.15Al karışımı için hesaplanan WIR değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. 70RTW:30MW:0.15Al numunesi için nicel atık kullanım göstergeleri.

Waste Incorporation Parameter	Equation	Calculation	Result (%)
WIR_p	$WIR_p = [(m_{RTW} + m_{MW})/(m_{precursor})] \times 100$	$WIR_p = [(280 + 120)/(400)] \times 100$	100
WIR_t	$WIR_t = [(m_{RTW} + m_{MW})/(m_{total\ mixture})] \times 100$	$WIR_t = [(280 + 120)/(280 + 120 + 33.3 + 66.6 + 0.6)] \times 100$	79.9

Tablo 6'da görüldüğü üzere, AAF karışımının prekürsör fazının tamamı (%100) ikincil hammaddelerden (RTW ve MW) oluşmakta olup, bu durum bağlayıcı üretimi için herhangi bir birincil prekürsöre ihtiyaç duyulmadığını göstermektedir. Alkali aktivatörler ve Al tozu da dahil olmak üzere tüm karışım dikkate alındığında, toplam atık kullanım oranı %79,9'a ulaşmaktadır. Bu sonuç, üretilen AAF'nin yüksek atık kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgular, RTW ve MW'nin yalnızca düşük düzeyde kullanılan mineral katkılar olarak değil, AAF üretiminde temel hammaddeler olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla geliştirilen AAF; inşaat ve yıkım atıklarının (CDW) yeniden kullanılması, doğal hammadde tüketiminin azaltılması ve malzeme döngüselliğinin artırılması yoluyla önemli bir sürdürülebilirlik potansiyeli ortaya koymaktadır.

3.3.2. Malzeme Bazlı Gömülü Karbon Değerlendirmesi

Geliştirilen AAF'nin çevresel performansını nicel olarak karşılaştırmak amacıyla basitleştirilmiş, malzeme bazlı bir gömülü karbon değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmenin amacı, kapsamlı bir beşikten kapıya yaşam döngüsü değerlendirmesi (LCA) gerçekleştirmek yerine, optimize edilmiş karışımda kullanılan bileşen malzemelerin gömülü karbonlarını karşılaştırmaktır. Buna göre, mevcut değerlendirmenin sistem sınırı bilinçli olarak yalnızca bağlayıcı formülasyonuna dahil edilen hammaddelerle, yani RTW, MW, NaOH ve sodyum silikat ile sınırlandırılmıştır.

Tanımlanan bu sistem sınırı kapsamında yalnızca bileşen malzemelerin gömülü karbonu dikkate alınmıştır. Atıkların toplanması, kırılması, öğütülmesi, kurutulması, karıştırılması, ısıl kür uygulanması, taşınması, ekipman kullanımı, ambalajlama ve diğer üretim faaliyetlerinden kaynaklanan süreçle ilişkili emisyonlar değerlendirme kapsamı dışında bırakılmıştır. Dolayısıyla raporlanan değerler, tüm üretim sürecinin toplam karbon ayak izi olarak değil, karşılaştırmalı ve malzeme bazlı bir sürdürülebilirlik göstergesi olarak yorumlanmalıdır. Bu basitleştirilmiş yaklaşım, şeffaf ve tekrarlanabilir bir hesaplama prosedürü korunurken, sıradan Portland çimentosunun (OPC) inşaat ve yıkım atıklarından elde edilen prekürsör malzemelerle ikame edilmesinin çevresel faydalarını değerlendirmek amacıyla benimsenmiştir. Optimize edilmiş AAF karışımının malzeme bazlı gömülü karbonu (EC_{AAF}, kg CO_2-eşd.) Denklem (2)'ye göre hesaplanmıştır:

$$EC_{AAF} = \sum_{i=1}^{n} (m_i \times EF_i) \quad (2)$$

Burada m_i, *i* malzemesinin kütlesini (kg), EF_i ise ilgili malzemenin emisyon faktörünü (kg CO_2-eşd./kg) ifade etmektedir.

Optimize edilmiş AAF'nin çevresel faydası, malzeme bazlı gömülü karbonunun aynı bağlayıcı kütlesine (400 g) sahip geleneksel bir OPC bağlayıcının gömülü karbonu ile karşılaştırılması yoluyla değerlendirilmiştir. Karşılaştırma, eşdeğer dayanım yerine eşdeğer bağlayıcı kütlesi esas alınarak gerçekleştirilmiştir; çünkü geliştirilen AAF, yapısal yük taşıma kapasitesinden ziyade ısı yalıtım performansına öncelik veren hafif, taşıyıcı olmayan bir duvar malzemesi olarak özel olarak tasarlanmıştır.

OPC, NaOH ve sodyum silikat için kullanılan emisyon faktörleri Yang ve ark. [57] tarafından bildirilen değerlerden alınmıştır. RTW ve MW, atık tahsis yaklaşımı kapsamında ikincil hammaddeler olarak değerlendirilmiş; bu nedenle, bu malzemelerin birincil üretimleriyle ilişkili çevresel yükler geliştirilen AAF karışımına tahsis edilmemiştir. Sonuç olarak, benimsenen sistem sınırı kapsamında optimize edilmiş AAF'nin malzeme bazlı gömülü karbonuna yalnızca alkali aktivatörlerin gömülü karbonu katkıda bulunmuştur. Her bir bileşen malzemenin miktarı, ilgili emisyon faktörleri, hesaplama prosedürü ve bireysel gömülü karbon katkıları Tablo 7'de özetlenmiştir.

Tablo 7. Tanımlanan sistem sınırı kapsamında optimize edilmiş 70RTW:30MW:0.15Al karışımının malzeme bazlı gömülü karbon hesabı.

Component	Amount (kg)	Emission Factor (EF, kg CO_2-eq/kg)	Calculation	CO_2 Contribution (kg CO_2-eq)
RTW	0.280	0	0.280 × 0	0
MW	0.120	0	0.120 × 0	0
NaOH	0.033	1.232 [57]	0.033 × 1.232	0.041
Na_2SiO_3	0.066	1.320 [57]	0.066 × 1.320	0.088
EC_{AAF}				0.129
EC_{OPC}	0.400	0.944 [57]	0.400 × 0.944	0.378

EF = malzeme emisyon faktörü. RTW ve MW ikincil hammaddeler olarak değerlendirilmiştir; bu nedenle, bunların birincil üretimleriyle ilişkili çevresel yükler geliştirilen AAF'ye tahsis edilmemiştir. Mevcut değerlendirme, yalnızca optimize edilmiş karışıma dahil edilen bileşen malzemeleri kapsayan malzeme bazlı bir sistem sınırı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Atıkların toplanması, kırılması, öğütülmesi, kurutulması, karıştırılması, ısıl kür uygulanması, taşınması, ekipman kullanımı, ambalajlama ve diğer üretim faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonlar bilinçli olarak kapsam dışında bırakılmıştır. Buna göre, raporlanan değerler kapsamlı bir beşikten kapıya LCA yerine, basitleştirilmiş malzeme bazlı bir gömülü karbon değerlendirmesini temsil etmektedir.

Optimize edilmiş AAF'nin OPC referans bağlayıcıya kıyasla malzeme bazlı gömülü karbonundaki göreli azalma, tanımlanan malzeme bazlı sistem sınırı içerisindeki gömülü karbon azalmasını yüzde olarak ifade eden Denklem (3) kullanılarak belirlenmiştir.

$$[(EC_{OPC} - EC_{AAF})/(EC_{OPC})] \times 100 \quad (3)$$

Burada EC_{OPC}, OPC referans bağlayıcının malzeme bazlı gömülü karbonunu (kg CO_2-eşd.), EC_{AAF} ise optimize edilmiş AAF karışımının malzeme bazlı gömülü karbonunu (kg CO_2-eşd.) ifade etmektedir.

Tablo 7'de sunulan gömülü karbon değerlerine göre, optimize edilmiş 70RTW:30MW:0.15Al karışımının malzeme bazlı gömülü karbonu 0,129 kg CO_2-eşd. iken, eşdeğer OPC referans bağlayıcının malzeme bazlı gömülü karbonu 0,378 kg CO_2-eşd. olarak belirlenmiştir. Buna göre, malzeme bazlı gömülü karbon azalması aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$[(0.378 - 0.129)/(0.378)] \times 100 = 65.9\% \quad (4)$$

Bu sonuç, tanımlanan değerlendirme sınırı kapsamında OPC referansına kıyasla malzeme bazlı gömülü karbonda %65,9 oranında bir azalma olduğunu göstermektedir. Bu azalma temel olarak Portland çimentosunun atık kökenli prekürsör malzemeler (RTW ve MW) ile tamamen ikame edilmesinden kaynaklanırken, alkali aktivatörler geliştirilen AAF'nin gömülü karbonuna katkıda bulunan başlıca bileşenler olmaya devam etmektedir. Dolayısıyla, önerilen karışım bileşen malzemelerin seçimi açısından önemli bir çevresel avantaj ortaya koymasına rağmen, süreçle ilişkili emisyonlar mevcut değerlendirmenin kapsamından bilinçli olarak çıkarıldığı için raporlanan azalma, tüm üretim sürecinin toplam karbon ayak izindeki azalma olarak yorumlanmamalıdır. Bununla birlikte bu sonuçlar, RTW ve MW'nin birlikte kullanımının, yüksek atık kullanım oranına ve eşdeğer kütledeki geleneksel bir OPC bağlayıcıya kıyasla önemli ölçüde daha düşük malzeme bazlı gömülü karbona sahip eko-verimli bir alkali aktive köpük üretimine olanak sağladığını göstermektedir.

3.3.3. Eko-Verimlilik Performansının Değerlendirilmesi

Yalnızca gömülü karbonun azaltılması, yapı malzemelerinin sürdürülebilirliğinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi için yeterli değildir. Bu nedenle çevresel performans, malzemenin işlevsel performansıyla birlikte yorumlanmalıdır. Bu doğrultuda eko-verimlilik değerlendirmeleri, çevresel etki ile mühendislik performansının eş zamanlı olarak dikkate alınmasına olanak sağlayarak alternatif çimento esaslı malzemeler arasında daha anlamlı karşılaştırmalar yapılmasını sağlayan ve yaygın olarak benimsenen bir yaklaşım hâline gelmiştir [58,59]. Özellikle, gömülü karbonun birim basınç dayanımı başına ifade edilmesi, farklı mekanik performans düzeylerine sahip malzemelerin karşılaştırılmasında etkili bir gösterge sağlamakta ve çimento esaslı malzemelerin sürdürülebilirlik değerlendirmelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [60].

Bu çalışmada, optimize edilmiş AAF'nin malzeme bazlı gömülü karbonu, çevresel verimliliğinin yorumlanmasını kolaylaştırmak amacıyla ayrıca basınç dayanımına göre normalize edilmiştir. Mutlak malzeme bazlı gömülü karbon değerinden farklı olarak bu normalizasyon, bileşen malzemelerle ilişkili çevresel etkiyi geliştirilen AAF'nin mekanik performansıyla ilişkilendirmektedir. Önerilen malzemenin temel amacı, geliştirilmiş ısı yalıtım performansına sahip hafif ve taşıyıcı olmayan bir duvar elemanı üretmek olduğundan, eko-verimliliğin daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi amacıyla çevresel göstergelerin yanı sıra kuru durumdaki ısıl iletkenlik de dikkate alınmıştır. Birim basınç dayanımı başına malzeme bazlı gömülü karbon (kg CO_2-eşd./MPa) Denklem (5)'e göre hesaplanmıştır:

$$EC_{AAF}/C_s \quad (2)$$

Burada C_s, numunenin MPa cinsinden basınç dayanımını ifade etmektedir.
Optimize edilmiş AAF'nin malzeme bazlı çevresel göstergeleri ile temel işlevsel özellikleri Tablo 8'de özetlenmiştir.

Tablo 8. Optimize edilmiş 70RTW:30MW:0.15Al numunesinin malzeme bazlı çevresel ve işlevsel sürdürülebilirlik göstergelerinin özeti.

Environmental/Functional Indicator	Value	Unit	Interpretation
WIR_t	79.9	%	High waste utilization capacity
Material-based embodied carbon (EC_{AAF})	0.129	kg CO_2-eq	Material-based embodied carbon within the defined system boundary
Material-based embodied carbon reduction	65.9	%	Relative to the OPC reference binder (material-based assessment)
Material-based embodied carbon per unit compressive strength (EC/C_s)	0.129/3.12 = 0.041	kg CO_2-eq/MPa	Environmental efficiency normalized by compressive strength
Compressive strength	3.12	MPa	Suitable for lightweight non-loadbearing wall
Thermal conductivity	0.15	W/m·K	High thermal insulation performance under dry conditions

Sonuçlar, geliştirilen RTW-MW esaslı AAF'nin, hedeflenen uygulama için gerekli işlevsel özellikleri korurken yüksek oranda atık kullanımını iyileştirilmiş malzeme düzeyindeki çevresel performansla başarılı bir şekilde bir araya getirdiğini göstermektedir. Optimize edilmiş karışım, %79,9 oranında atık kökenli malzeme içermekte ve 0,129 kg CO_2-eşd. malzeme bazlı gömülü karbon değeri sergilemektedir. Bu değer, tanımlanan malzeme bazlı sistem sınırı kapsamında OPC referans bağlayıcıya kıyasla malzeme bazlı gömülü karbonda %65,9 oranında bir azalmaya karşılık gelmektedir. Ayrıca, normalize edilmiş malzeme bazlı gömülü karbon değeri (0,041 kg CO_2-eşd./MPa), çevresel faydanın hafif, taşıyıcı olmayan duvar uygulamaları için yeterli mekanik performans korunarak elde edildiğini göstermektedir. Ölçülen 0,15 W/m·K kuru durum ısıl iletkenlik değeri ile birlikte değerlendirildiğinde, bu sonuçlar önerilen AAF'nin kaynak verimliliği, çevresel performans, mekanik yeterlilik ve ısı yalıtım performansı arasında etkili bir denge sağladığını ortaya koymaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu projenin başlıca sonuçları aşağıdaki gibidir:

İlk aşama sonuçları, MW ilavesinin RTW esaslı bağlayıcı matrisin kompaktlığını ve mekanik bütünlüğünü iyileştirdiğini göstermiştir. MW içeriğinin artırılması porozite ve su emme oranını azaltırken, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımını artırmıştır. FTIR ve XRD sonuçları, MW'nin yeni kristalin reaksiyon ürünleri oluşturmaktan ziyade ağırlıklı olarak düşük reaktiviteli, karbonat bakımından zengin bir mikro-dolgu olarak işlev gördüğünü ortaya koymuştur. Buna göre, 70RTW:30MW:0Al karışımı AAF üretimi için en uygun başlangıç matrisi olarak seçilmiştir.

İkinci aşamada, Al tozu ilavesi gözenek oluşumunu etkili bir şekilde teşvik etmiş ve birim hacim ağırlık ile kuru durumdaki ısıl iletkenliği önemli ölçüde azaltmıştır. Bununla birlikte, Al içeriğinin etkisi doğrusal olmamıştır. Al içeriğinin artırılması poroziteyi yükseltirken, daha yüksek Al içeriklerinde aşırı gaz oluşumu gözenek birleşmesini, düzensiz gözenek büyümesini ve gözenekler arası bağlantılılığın artmasını teşvik etmiştir. Bu durum, katı faz sürekliliğini zayıflatmış ve ultrases geçiş hızı ile mekanik dayanımda önemli azalmalara yol açmıştır.

Ön köpürme sonuçları, genleşme davranışı ile nihai porozite arasında yakın bir ilişki bulunduğunu göstermiş ve ön köpürme ölçümlerinin AAF'lerde gözenek yapısının gelişimini değerlendirmek için pratik bir gösterge olarak kullanılabileceğine işaret etmiştir. Ayrıca, kuru durumdaki ısıl iletkenlik ile birim hacim ağırlık, porozite ve basınç dayanımı arasındaki korelasyonlar, kuru durumdaki ısıl performansın yalnızca toplam gözenek hacmi tarafından

değil, aynı zamanda gözenek boyutu dağılımı ve katı faz sürekliliği tarafından da kontrol edildiğini göstermektedir.

70RTW:30MW:0.15Al numunesi; gözenek yapısı, fiziksel ve mekanik özellikler ve kuru durumdaki ısı yalıtım potansiyeli açısından en dengeli performansı sergilemiştir. %0,20 Al içeren AAF en düşük kuru durum ısıl iletkenlik değerini göstermesine rağmen, mekanik dayanımdaki önemli kayıp, optimum malzeme seçiminde yalnızca ısıl iletkenliğin tek kriter olarak dikkate alınmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, RTW-MW esaslı AAF'lerin tasarımında yalnızca yüksek porozite elde edilmesi değil, aynı zamanda mekanik bütünlük ile ısıl performans arasındaki dengeyi koruyan kontrollü bir gözenek yapısının geliştirilmesi hedeflenmelidir.

Nicel sürdürülebilirlik performansı açısından, optimize edilmiş 70RTW:30MW:0.15Al karışımı %100 prekürsör bazlı atık kullanım oranına ve %79,9 toplam karışım bazlı atık kullanım oranına ulaşarak yüksek kaynak verimliliği ve döngüsel ekonomi potansiyeli sergilemiştir. Bu çalışmada benimsenen tanımlı malzeme bazlı sistem sınırı kapsamında, optimize edilmiş karışım 0,129 kg CO_2-eşd. malzeme bazlı gömülü karbon değerine sahip olmuş ve bu değer, eşdeğer bağlayıcı kütlesine sahip OPC referans bağlayıcıya kıyasla malzeme bazlı gömülü karbonda %65,9 oranında bir azalmaya karşılık gelmiştir. Bu azalma, Portland çimentosunun atık kökenli prekürsör malzemelerle ikame edilmesinden kaynaklanan çevresel faydayı yansıtmakta olup, tüm üretim sürecinin toplam karbon ayak izindeki azalma olarak değil, benimsenen malzeme bazlı değerlendirme kapsamı içerisinde yorumlanmalıdır. Basınç dayanımına göre normalize edildiğinde, malzeme bazlı gömülü karbon 0,041 kg CO_2-eşd./MPa olarak belirlenmiş ve bu sonuç, hafif, taşıyıcı olmayan duvar uygulamaları için yeterli işlevsel performans korunurken çevresel faydanın da sağlandığını göstermiştir.

Ayrıca, bu projede sunulan sürdürülebilirlik değerlendirmesi, tanımlanmış bir sistem sınırı kapsamında malzeme bazlı gömülü karbon değerlendirmesiyle bilinçli olarak sınırlandırılmıştır. Atık işleme, öğütme, taşıma, karıştırma, ısıl kür ve ekipman kullanımından kaynaklanan süreçle ilişkili emisyonlar mevcut değerlendirmenin kapsamı dışında tutulmuştur. Gelecekteki çalışmalar, RTW-MW esaslı AAF'lerin kapsamlı bir beşikten kapıya yaşam döngüsü değerlendirmesinin (LCA) geliştirilmesi amacıyla bu süreç aşamalarını da çevresel değerlendirmeye dahil etmelidir.

Bu proje, Al tozu içeriğinin gözenek gelişimi ve bunun sonucunda ortaya çıkan mekanik ve ısıl performans üzerindeki etkisini ortaya koymakla birlikte, taze durum reolojik parametreleri (örneğin akma gerilmesi, plastik viskozite ve priz süresi) değerlendirilmemiştir. Bu parametreler kimyasal köpürme sırasında hidrojen kabarcıklarının tutulmasını, büyümesini ve birleşmesini kontrol ettiğinden, gelecekteki çalışmalarda taze durum reolojisi, gözenek gelişimi ve sertleşmiş AAF'lerin özellikleri arasındaki ilişki araştırılmalıdır.

RTW-MW esaslı AAF'ler, elverişli kuru durum ısı yalıtım performansları ve eko-verimli bileşimleri sayesinde hafif, taşıyıcı olmayan duvar uygulamalarında kullanım açısından umut vadetmektedir. Bununla birlikte, raporlanan ısıl iletkenlik değerlerinin numunelerin kurutulmasının ardından gerçekleştirilen kuru durum ölçümlerine karşılık geldiği unutulmamalıdır. Köpüklü karışımların nispeten yüksek su emme değerleri sergilemesi nedeniyle, kullanım sırasında nemin malzemeye nüfuz etmesi etkin ısıl iletkenliği artırabilir ve gerçek kullanım koşullarında yalıtım performansını azaltabilir. Bu nedenle gelecekteki çalışmalarda, bu malzemelerin gerçekçi nem etkisi altındaki ısıl davranışı ve dayanıklılığı; ıslanma–kuruma döngüleri, donma–çözülme koşulları ve uzun süreli kullanım ortamları da dahil olmak üzere araştırılmalıdır.

Genel olarak bu proje, çatı kiremiti ve mermer atıklarının, mekanik, ısıl ve çevresel performans açısından dengeli özelliklere sahip hafif ve yalıtım amaçlı alkali aktive köpüklere eş zamanlı olarak dönüştürülmesi için yenilikçi ve uygulanabilir bir yaklaşım ortaya koymakta ve böylece kaynak verimliliği daha yüksek yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

5. PROJEDEN ÜRETİLEN AKADEMİK ÇIKTILAR

Bu proje kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen bulgular temel alınarak aşağıdaki bilimsel yayın üretilmiştir:

Ekiz Barış, K. Development of Lightweight Alkali-Activated Foams from Roof Tile and Marble Wastes: Pore Structure Evolution and Thermal Performance Optimization, Sustainability, 2026, [18/7458]. DOI: [https://doi.org/10.3390/su18147458]. (SCI-E ve SCOPUS indekste taranan Q1 türü uluslararası hakemli dergi)

Söz konusu yayında, FBA-2026-5074 numaralı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular sunulmuş ve Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Biriminin desteği belirtilmiştir. Yayının PDF'i BAPSİS sistemine projeye ait yayın kanıtı olarak yüklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Georgiades, M.; Shah, I.H.; Steubing, B.; Cheeseman, C.; Myers, R.J. Prospective life cycle assessment of European cement production. *Resour. Conserv. Recycl*. **2023**, *194*, 106998.
2. Sbahieh, S.; McKay, G.; Al-Ghamdi, S.G. Comprehensive analysis of geopolymer materials: Properties, environmental impacts, and applications. *Materials* **2023**, *16*, 7363.
3. Liu, J.; Liu, B.; Li, Q.; Zhang, Q.; An, C.; Sun, Z.; Wei, S.; Fan, J. Review of solid waste-based geopolymers: Preparation, deterioration and durability. *Mater. Today Commun*. **2025**, *43*, 111820.
4. Sbi, S.; Aboulayt, A.; Ounacer, M.; Manoun, B.; Sajieddine, M.; Mansouri, S.; Samih, Y.; Semlal, N.; Kriven, W.M.; Tamraoui, Y.; et al. Assessing the long-term structural changes of metakaolin geopolymers encapsulating pyrite cinder: Environmental, microstructural and structure studies. *Sustain. Mater. Technol.* **2025**, *45*, e01459.
5. Ma, X.; Yang, Y. Single-component low-carbon sustainable geopolymer synthesis using calcium carbide residue, gypsum, sewage sludge ash, and ground granulated blast slag. *Sustain. Mater. Technol.* **2025**, *43*, e01314.
6. Pacheco-Torgal, F. Introduction to handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 2nd ed.; Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasirt, P. Eds.; Woodhead Publishing Limited: Cambridge, UK, 2015; Volume 1, pp. 1–16.
7. Santos, A.; Andrejkovičová, S.; Řimnáčová, D.; Perná, I.; Almeida, F.; Rocha, F. Synthesis and characterization of lightweight foamed geopolymers from iron tailings for energy-efficient construction. *J. Build. Eng.* **2026**, *120*, 115414.
8. Soto-Paz, J.; Arroyo, O.; Torres-Guevara, L.E.; Parra-Orobio, B.A.; Casallas-Ojeda, M. The circular economy in the construction and demolition waste management: A comparative analysis in emerging and developed countries. *J. Build. Eng.* **2023**, *78*, 107724.
9. Faraji, M.F.; Türkel, I.; Ozkan, I.G.M.; Bayraktar, O.Y.; Kaplan, G.; Bayram, M.; Aydın, A.C.; Ozbakkaloglu, T. Fly ash and waste brick powder-based one-part geopolymer foam concrete with enhanced thermal performance: A circular approach to construction and demolition waste utilization. *J. Build. Eng.* **2026**, *117*, 114850.
10. Simão, L.; Hotza, D.; Ribeiro, M.J.; Novais, R.M.; Montedo, O.R.K.; Raupp-Pereira, F. Development of new geopolymers based on stone cutting waste. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *257*, 119525.
11. Altheeb, A. Engineering attributes of alkali-activated mortars containing ceramic tiles waste as aggregates replacement: Effect of high-volume fly ash inclusion. *Mater. Today Proc.* **2023**, 1–9.
12. Sarkar, M.; Dana, K. Partial replacement of metakaolin with red ceramic waste in geopolymer. *Ceram. Int.* **2021**, *47*, 3473–3483.

13. Fugazzotto, M.; Cultrone, G.; Mazzoleni, P.; Barone, G. Suitability of ceramic industrial waste recycling by alkaline activation for use as construction and restoration materials. *Ceram. Int.* **2023**, *49*, 9465–9478.
14. Geraldo, R.H.; Ouellet-Plamondon, C.; Muianga, E.A.D.; Camarini, G. Alkali-activated binder containing wastes: A study with rice husk ash and red ceramic. *Cerâmica* **2017**, *63*, 44–51.
15. Khater, H.M.; Elnagar, A.M. Optimization of alkali activated grog/ceramic wastes geopolymer bricks. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* **2016**, *5*, 37–46.
16. Bezerra, B.P.; Soares, G.; Morelli, M.R.; Da Luz, A.P. Recycling of roof tile waste in the manufacturing of high-temperature metakaolin-based geopolymer composites. *Cerâmica* **2023**, *69*, 242–247.
17. Abadel, A.A.; Alghamdi, H. Effect of high volume tile ceramic wastes on resistance of geopolymer mortars to abrasion and freezing-thawing cycles: Experimental and deep learning modelling. *Ceram. Int.* **2023**, *49*, 15065–15081.
18. Li, X.; Bai, C.; Qiao, Y.; Wang, X.; Yang, K.; Colombo, P. Preparation, properties and applications of fly ash-based porous geopolymers: A review. *J. Clean. Prod.* **2022**, *359*, 132043.
19. Novais, R.M.; Pullar, R.C.; Labrincha, J.A. Geopolymer foams: An overview of recent advancements. *Prog. Mater. Sci.* **2020**, *109*, 100621.
20. Lertcumfu, N.; Kaewapai, K.; Jaita, P.; Tunkasiri, T.; Sirisoonthorn, S.; Rujijanagul, G. Effects of olive oil on physical and mechanical properties of ceramic waste-based geopolymer foam. *J. Reinf. Plast. Compos.* **2019**, *39*, 111–118.
21. Horvat, B.; Ducman, V. Potential of green ceramics waste for alkali activated foams. *Materials* **2019**, *12*, 3563.
22. Masi, G.; Tugnoli, A.; Bignozzi, M.C. Lightweight alkali activated composites by direct foaming based on ceramic tile waste and fly ash. *Ceram. Int.* **2024**, *50*, 55410–55420.
23. Li, Z. Resource utilization of red mud in low-carbon binders: A review of reaction mechanisms, performance, and microstructure. *Buildings* **2026**, *16*, 2140.
24. *ASTM C618*; Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2023.
25. Kaya, M.; Köksal, F.; Bayram, M.; Nodehi, M.; Gencel, O.; Ozbakkaloglu, T. The effect of marble powder on physico-mechanical and microstructural properties of kaolin-based geopolymer pastes. *Struct. Concr.* **2023**, *24*, 6485–6504.
26. Alharthy, S.E.; Hodhod, O.A.; Abdelkadir, B.A. Developing a geopolymer pastes using marble dust. *Water Sci.* **2022**, *36*, 144–153.
27. Duxson, P.; Fernández-Jiménez, A.; Provis, J.L.; Lukey, G.C.; Palomo, A.; van Deventer, J.S.J. Geopolymer technology: The current state of the art. *J. Mater. Sci.* **2007**, *42*, 2917–2933.
28. Siyal, A.A.; Radin Mohamed, R.M.S.; Shamsuddin, R.; Ridzuan, M.B. A comprehensive review of synthesis kinetics and formation mechanism of geopolymers. *RSC Adv.* **2024**, *14*, 446–462.
29. Tayyab, S.; Ferdous, W.; Lokuge, W.; Ngo, T.; Gerdes, A.; Manalo, A. Influence of mix design parameters on fresh and hardened properties of geopolymer concrete: A state-of-the-art review. *Polymers* **2026**, *18*, 854.
30. Chen, G.; Luo, R.; Cai, Y.; Lin, J.X.; Guo, Y.C. Workability and mechanical properties of alkali-activated materials: Regulatory mechanisms dominated by composite alkali activator. *Constr. Build. Mater*. **2025**, *505*, 144672.
31. Zhang, Z.; Provis, J.L.; Reid, A.; Wang, H. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *56*, 113–127.
32. *TS EN 1015-10*; Methods of Test for Mortar for Masonry—Part 10: Determination of Dry Bulk Density of Hardened Mortar. Turkish Standards Institution: Ankara, Türkiye, 2001.
33. *TS EN 13755*; Natural Stone Test Methods—Determination of Water Absorption at Atmospheric Pressure. Turkish Standards Institution: Ankara, Türkiye, 2008.
34. *TS 699*; Natural Building Stones—Methods of Inspection and Laboratory Testing. Turkish Standards Institution: Ankara, Türkiye, 2009.
35. *TS EN 14579*; Natural Stone Test Methods—Determination of Sound Speed Propagation. Turkish Standards Institution: Ankara, Türkiye, 2005.
36. *TS EN 196-1*; Methods of Testing Cement—Part 1: Determination of Strength. Turkish Standards Institution: Ankara, Türkiye, 2016.
37. *ASTM C518-17*; Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017.
38. Statistical Rejection of "Bad" Data–Chauvenet's Criterion. Available online: https://www.waterproperties.ca/osd_data_archive/Cruise_Data/2009/2009-020/DOC/Individual%20Reports/chauvenet.pdf (accessed on 12 April 2026).
39. Kabirova, A.; Uysal, M.; Hüsem, M.; Aygörmez, Y.; Dehghanpour, H.; Pul, S.; Canpolat, O. Physical and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer mortars containing various waste powders. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2023**, *27*, 437–456.

40. Uysal, M.; Aygörmez, Y.; Canpolat, O.; Cosgun, T.; Kuranlı, O.F. Investigation of using waste marble powder, brick powder, ceramic powder, glass powder, and rice husk ash as eco-friendly aggregate in sustainable red mud-metakaolin based geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *361*, 129718.
41. Mahmood, A.Z.; Babaee, M.; Foster, S.J.; Castel, A. Capturing the early-age physicochemical transformations of alkali-activated fly ash and slag using ultrasonic pulse velocity technique. *Cem. Concr. Compos*. **2022**, *130*, 104529.
42. Krol, M.; Minkiewicz, J.; Mozgawa, W. IR spectroscopy studies of zeolites in geopolymeric materials derived from kaolinite. *J. Mol. Struct.* **2016**, *1126*, 200–206.
43. Vasić, M.V.; Terzić, A.; Radovanović, Ž.; Radojević, Z.; Warr, L.N. Alkali-activated geopolymerization of a low illitic raw clay and waste brick mixture. An alternative to traditional ceramics. *Appl. Clay Sci*. **2022**, *218*, 106410.
44. Xu, Z.; Jiang, Z.; Wu, D.; Peng, X.; Xu, Y.; Li, N.; Qi, Y.; Li, P. Immobilization of strontium-loaded zeolite A by metakaolin based-geopolymer. *Ceram. Int.* **2017**, *43*, 4434–4439.
45. Kaya, M.; Munir, M.J.; Kazmi, S.M.S.; Gencel, O. Valorization of tile waste in geopolymer mortars: A sustainable approach using marble powder, fly ash, and silica fume. *Powder Technol.* **2026**, *469*, 121866.
46. Hu, X.; Ge, X.; Zhou, M.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Yang, H.; Zhang, Y. Recycling hazardous secondary aluminum dross as a functional foaming agent in fly ash/slag-based foamed geopolymer concrete. *J. Build. Eng.* **2026**, *120*, 115558.
47. Ramakrishnan, S.; Ramesh, A.; Pasupathy, K.; Manalo, A.C.; Sanjayan, J. Regulating the chemical foaming and pore distribution in aerated geopolymer concrete. *Mater. Today Sustain.* **2026**, *33*, 101276.
48. Provis, J.L.; van Deventer, J.S.J. *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM*, 1st ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2014; pp. 34–69.
49. Chen, S.; Ruan, S.; Zeng, Q.; Liu, Y.; Zhang, M.; Tian, Y.; Yan, D. Pore structure of geopolymer materials and its correlations to engineering properties: A review. *Constr. Build. Mater.* **2022**, *328*, 127064.
50. Zhang, Z.; Wang, H. The pore characteristics of geopolymer foam concrete and their impact on the compressive strength and modulus. *Front. Mater.* **2016**, *3*, 38.
51. Liu, J.; Liu, Y.; Ma, X.; Xu, H.; Wu, X.; Liu, M.; Zhuge, Y. Thermal performance optimisation of foam concrete for energy-efficient construction: A state-of-the-art review. *J. Build. Eng*. **2025**, *112*, 113899.
52. Pasupathy, K.; Ramakrishnan, S.; Sanjayan, J. Formulating eco-friendly geopolymer foam concrete by alkali-activation of ground brick waste. *J. Clean. Prod.* **2021**, *325*, 129180.
53. Dang, J.; Tang, X.; Xiao, J.; Han, A. Influence of alkaline activator and precursor on the foam characterization and alkali-activated foamed concrete properties. *Cem. Concr. Compos.* **2024**, *145*, 105341.
54. TS 825; Thermal Insulation Requirements for Buildings—Rules for Heat Insulation in Buildings. Turkish Standards Institution: Ankara, Türkiye, 2024.
55. Bernal, S.A.; Rodríguez, E.D.; Kirchheim, A.P.; Provis, J.L. Management and valorisation of wastes through use in producing alkali-activated cement materials. *J. Chem. Technol. Biotechnol*. **2016**, *91*, 2365–2388.
56. *ISO 14021:2016*; Environmental Labels and Declarations—Self-Declared Environmental Claims (Type II Environmental Labelling). International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2016.
57. Yang, K.H.; Song, J.K.; Song, K. Assessment of CO_2 reduction of alkali-activated concrete. *J. Clean. Prod.* **2013**, *39*, 265–272.
58. Suarez-Riera, D.; Restuccia, L.; Falliano, D.; Ferro, G.A.; Tuliani, J.-M.; Pavese, M.; Lavagna, L. An overview of methods to enhance the environmental performance of cement-based materials. *Infrastructures* **2024**, *9*, 94.
59. Miller, S.A.; Juenger, M.; Kurtis, K.E.; Weiss, J. Cement and alternatives in the anthropocene. *Annu. Rev. Environ. Resour*. **2024**, *49*, 309–335.
60. Purnell, P.; Black, L. Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters. *Cem. Concr. Res.* **2012**, *42*, 874–877.