

Bağlayıcı Olarak Bazaltik Pomza Tozu Kullanımının Geopolimer Harçların Mekanik Dayanımına Etkisi

Taha Salah Wahhab AL-ANTAKİ^{1,a}, Anıl NİŞ^{1,b}

¹İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

^aORCID: 0000-0001-8050-4062; ^bORCID: 0000-0001-9092-8088

Makale Bilgileri

Geliş : 10.09.2024

Kabul : 24.09.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1790372

Sorumlu Yazar

Anıl NİŞ

anis@gelisim.edu.tr

Anahtar Kelimeler

Bazaltik pomza

Geopolimer

Basınç dayanımı

Eğilme dayanımı

Ultrasonik ses geçiş hızı (UPV)

Atf şekli: AL-ANTAKİ, T.S.W., NİŞ, A., (2025). Bağlayıcı Olarak Bazaltik Pomza Tozu Kullanımının Geopolimer Harçların Mekanik Dayanımına Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 40(3), 687-697.

ÖZ

Bu çalışmada, %20 ve %40 oranlarında volkanik kökenli bazaltik pomza kullanımı ile üretilen geopolimer harçların mekanik özelliklerine olan etkisi incelenmiştir. Geopolimer numuneler üretilirken bağlayıcı olarak F-tipi uçucu kül ile yüksek fırın cürufu, alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat ile sodyum hidroksit kullanılmıştır. Çalışmada %20 ve %40 oranlarında bağlayıcı malzeme yerine kullanılan pomza (P) ile üretilmiş numunelerin 7., 28., ve 56. günlerde basınç ve eğilme dayanımları, ultrasonik ses geçiş hızları irdelenmiştir. Ayrıca farklı sodyum hidroksit molaritelerinin (8M, 12M ve 16M) mekanik dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara göre, pomza oranı arttıkça basınç dayanımının azaldığı, sodyum hidroksit molaritesi arttıkça da basınç dayanımının arttığı bulunmuştur. 56. günde en yüksek dayanım değerleri P0-16M numunelerinde 61.62 MPa bulunurken, en düşük dayanımsa P40-8M numunelerinde 44.14 MPa bulunmuştur. Bağlayıcı olarak cüruf ve uçucu kül yerine %40 oranlarına kadar bazaltik pomza kullanılarak üretilen geopolimer numuneler, mevcut standartlarda belirtilen yapıların inşasında kullanılabilecek minimum C25/30 beton basınç dayanımı sınıfını sağlamaktadır.

The Influence of Using Basaltic Pumice Powder as a Binder on the Mechanical Strength of Geopolymer Mortars

Article Info

Received : 10.09.2024

Accepted : 24.09.2025

DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1790372

Corresponding Author

Anıl NİŞ

anis@gelisim.edu.tr

Keywords

Basaltic pumice

Geopolymer

Compressive strength

Flexural strength

Ultrasonic pulse velocity (UPV)

How to cite: AL-ANTAKİ, T.S.W., NİŞ, A., (2025). The Influence of Using Basaltic Pumice Powder as a Binder on the Mechanical Strength of Geopolymer Mortars. Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering, 40(3), 687-697.

ABSTRACT

In this study, the influence of 20% and 40% volcanic origin basaltic pumice on the mechanical properties of geopolymer mortars was examined. F-type fly ash and ground granulated blast furnace slag were used as binders, and sodium silicate and sodium hydroxide were used as alkali activators. Compressive and bending strengths, and ultrasonic pulse velocities of geopolymers produced with pumice (P) at 20% and 40% ratios were examined on the 7., 28., and 56. days. Also, effects of different sodium hydroxide molarities (8M, 12M and 16M) on mechanical strengths were investigated. It was found that compressive strength decreases as pumice ratio increases, and compressive strength enhances as sodium hydroxide molarity increases. The highest compressive strength was obtained as 61.62 MPa in the P0-16M sample, while the lowest compressive strength was obtained as 44.14 MPa in the P40-8M sample at 56 days. Geopolymers up to 40% pumice provide the minimum C25/30 concrete compressive strength class that can be used in the construction of structures specified in current standards.

1. GİRİŞ

Dünyada 2014 yılından sonra geleneksel Portland çimentosu üretimi 4,3 milyar ton değerine ulaştığı belirtilmektedir ve 2050 yılında geleneksel Portland çimentosu üretiminin 5,5 milyar ton değerine ulaşacağı tahmin edilmektedir [1]. Çimento üretiminin çok önemli çevresel etkileri bulunmaktadır ve üretimi sırasında 3 milyar ton hammadde tüketirken 4700 MJ/ton enerjiye ihtiyaç duymaktadır [2]. Genel olarak 1 ton çimento üretimi sırasında atmosfere yaklaşık 900 kg karbondioksit (CO_2) salınımı gerçekleşmektedir. Bu da şu an geleneksel Portland çimento üretimiyle beraber çevreye çok yüksek miktarda CO_2 salındığı ve bu miktarın 2050 yılına kadar daha da artması beklenmektedir. Bu çevresel etkiyi önlemek adına son zamanlarda araştırmacılar çimentosuz beton olarak adlandırdıkları yeni nesil çevreci bir yapı malzemesi üzerine çalışmalarını yoğunlaştırdılar. Geopolimer olarak isimlendirilen çimentosuz yapı malzemesi, bağlayıcı olarak çimento yerine düşük kalsiyum içerikli uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmaktadır. Bu malzemelerden F-tipi uçucu kül termik santral atığı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ise demir-çelik endüstrisi atığı olmasından ötürü bu malzemelerle üretilecek yeni nesil sürdürülebilir yapı malzemeleri atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi açısından da çevreye çok büyük katkı sağlamaktadır. Ayrıca çimento yerine uçucu kül ve cüruf gibi malzemelerin kullanılması diğer atık malzemelerin depolanma veya gömülme problemlerini de ortadan kaldırmakta ve doğal kaynakların daha az kullanımı açısından da son derece önem arz etmektedir [3].

Diğer taraftan pomza, volkanik patlamalar sonunda ortaya çıkmış, boşluklu ve süngerimsi yapıya sahip, kimyasal ve fiziksel etmenlere karşı dirençli bir volkanik kayadır. Pomzanın oluşması sırasında bünyesinde bulunan gazların yapıyı hızlı bir şekilde terk etmesi ve sonrasında soğuması sonucunda bünyesinde çok sayıda gözenek içermektedir. Dolayısıyla pomzanın birim hacim ağırlığı düşerek yaklaşık 500 kg/m³ olmaktadır. Boşluklu yapısı sayesinde ses ve ısı yalıtımına uygun bir malzemedir. Pomza kışın soğuğa karşı, yazın ise sığağa karşı yüksek yalıtım görevi görmektedir. Pomzanın kimyasal içeriğinde ise yaklaşık %75 civarlarında silis bulunmaktadır. Pomzada bulunan silisyum oksit (SiO_2) miktarı pomza malzemesine abrasif özelliği kazandırmaktadır. Bu abrasif özellikten dolayı pomzanın çeliği bile rahatça aşındıracak bir kimyasal yapısı vardır. Pomzanın kimyasal içeriğindeki %15 alüminyum oksit (Al_2O_3) bileşeni ise ateş ve ısıya karşı yüksek yalıtım sağlar [4-6].

Pomza asidik ve bazaltik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bazaltik pomzanın özgül ağırlığı 1-2 g/cm³ civarında, rengi ise siyah, kahverengi ve koyu olmaktadır. Asidik pomzanın ise özgül ağırlığı 0,5-1 g/cm³ civarında, rengi ise genellikle beyaz ve beyaza yakın olmaktadır. İçeriğinde alüminyum, potasyum, sodyum ve silis içerdiği için açık renge sahiptir [7]. Asidik pomza genelde inşaat endüstrisinde kullanılmakta ve ülkemizdeki pomzanın %80'i hafif beton agregası olarak kullanılmaktadır. Pomza kullanılarak üretilen betonların daha hafif olmasıyla hem işçilikten hem de zamandan tasarruf edilmektedir [8,9]. Ayrıca pomza ile üretilen betonlar hafif beton olacağı için deprem bölgelerinde yapılara daha az deprem yükünün gelmesini sağlayabilirler. Pomzanın beton agregası olarak kullanıldığında, kırılmadan büyük deformasyon yapabilme yetenekleri sayesinde, deprem bölgelerinde önemli şekil değiştirme kapasitesi sağlayacağı düşünülmektedir. Şu an pomza kullanımı bims ve briket üretimi ile duvarların inşasıyla sınırlı kalmaktadır. Pomza kullanımı ile ısı yalıtımı da sağlanması enerji tasarrufu sağlaması bakımından önem arz etmektedir. Ek olarak pomza zemin stabilizasyonunda da kullanılabilir [10].

Pomza hafif agrega olarak kullanılabilmesi gibi, kimyasal bileşimindeki yüksek oranda silis içermesinden dolayı puzolanik özelliği gösterip bağlayıcı olarak kullanılabilmesi de mümkündür. Bunun yanı sıra pomza bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda %15-%25 oranlarında pomzanın dolgu olarak kullanımı ASTM standardına göre uygun olabileceği belirtilmiş olup, daha yüksek oranlarda pomza kullanımının dayanım değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir [10].

Son yıllarda yapılan araştırmalar çimento üretimi sebebiyle neden olan çevre kirliliğini ve enerji talebini azaltmak amacıyla pomza ve diğer malzemelerin kullanılması üzerinedir. Yapılan bir çalışmada hafif betonda iri agrega ve çimento yerine pomza kullanımı araştırılmıştır. Çalışmada çimento yerine %0-25 oranlarında öğütülmüş pomza tozunun kullanılarak, pomzanın taze ve sertleşmiş hal özelliklerine olan

etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak çimento yerine %15 oranlarına kadar kullanılan öğütülmüş pomzanın betonların fiziksel ve kimyasal özelliklerini olumlu etkilediği belirtilmiştir [11]. Başka bir çalışmada %20 uçucu kül ve bazaltik pomza agregası kullanılarak üretilen betonlarda basınç dayanımının 29 MPa olduğunu bunun da yapılarda kullanılması gereken minimum basınç dayanımı olan 25 MPa değerinden büyük olduğunu belirtmişlerdir [12]. Yapılan diğer bir çalışmada bazaltik pomzanın hafif yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği irdelenmiş olup, bazaltik pomza kullanılarak 28. günde 30 MPa basınç dayanımına sahip hafif beton üretiminin mümkün olduğu belirtilmiştir [13]. Başka bir çalışmada ise pomza agregası, silis dumanı ve uçucu kül kullanılarak hafif betonlar üretilmiş olup, üretilen numuneler farklı dayanım testlerine tabii tutulmuştur. Elde ettikleri sonuçlara göre, pomza kullanılarak üretilen hafif beton dayanımlarının ACI 213R standardında belirtilen yük taşıyan hafif beton dayanımını aştığını belirtmişlerdir [14].

Geopolimer beton ise çimentosuz olarak üretilen yeni nesil bir beton tipidir. Cüruf bazlı geopolimer ısı kürüne ihtiyaç duymaksızın erken basınç dayanımına sahip olurken, uçucu kül bazlı geopolimerlerde ise yüksek erken dayanım için ısı kürüne ihtiyaç vardır. Cüruf bazlı geopolimerlerde büzülme çatlakları ve erken priz alma problemleri olurken, uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimerlerde ise bu sorun büyük oranda ortadan kalkmaktadır. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda %50 uçucu kül ve %50 cüruf kullanılarak üretilen geopolimer numunelerde büzülme çatlakları ve ani priz alma gibi problemlerin ortadan kalktığı rapor edilmiştir. Ayrıca üretilen bu betonlar yüksek basınç ve eğilme dayanımına ve farklı kimyasal etkilere karşı da yüksek dirence sahiptir [3].

Literatürde bazaltik pomza tozunun bağlayıcı olarak kullanımının geopolimer harçların üzerindeki etkisini inceleyen çok az çalışma mevcuttur. Zeyad ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada pomzanın boşlukları doldurma etkisi ve pomzanın puzolanik reaktif olması sebebiyle geleneksel Portland çimentolu numunelerde basınç dayanımının arttığını belirtmiştir [15]. Geopolimer numunelerde yapılan çalışmalarda ise benzer sonuçlar göstermektedir. Geopolimer bağlayıcının bir kısmının volkanik pomza tozu ile yer değiştirmesinin daha yoğun bir mikro yapı ile sonuçlandığı, gözenekliliğin azaldığı ve basınç dayanımının arttığı rapor edilmiştir [16-18]. Yapılan başka bir çalışmada [19], farklı oranlarda pomza tozu ikamesinin (%25, %50 ve %75) geopolimer numunelerin farklı günlerdeki (7, 28 ve 56 gün) basınç dayanımına olan etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, geopolimer numunelerin basınç dayanımının zamanla arttığı fakat 28 gün sonrasındaki dayanım artışın çok düşük olduğu hatta bazı numunelerde basınç dayanımında düşüşler gözlemlenmiştir. Bunun sebebine ise değinilmemiştir. %25 pomza eklenmesinin geopolimer numunelerinin 7. gün basınç dayanımını %8.79, 28. gün basınç dayanımını ise %8.68 oranında düşürdüğü belirtilmiştir. Daha yüksek pomza ikamesinde (%50 ve %75) ise bu dayanımdaki azalmanın çok fazla olduğu rapor edilmiştir. %50 oranında pomza ilavesinin basınç dayanımını 42.6 MPa değerinden 34.1 MPa değerine, %75 oranında pomza ilavesinin ise basınç dayanımını 16.69 MPa değerine düşürdüğü gözlemlenmiştir [19].

Dolayısıyla yapılan bu çalışma kapsamında %20 ve %40 oranlarında bazaltik pomza tozu, F-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu yerine ikame edilerek geopolimer harçlardaki mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, bazaltik pomza tozunun farklı sodyum hidroksit molaritesinin (8M, 12M ve 16M) değişimi ile hangi oranda değiştiği 7., 28. ve 56. günlerde detaylıca irdelenecektir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Malzemeler ve Karışım Oranları

Geopolimer harçların üretiminde bazaltik pomza tozu (P), F-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Bazaltik pomza tozu %0, %20 ve %40 oranlarında düşük kalsiyum içerikli F-tipi uçucu kül ve cüruf yerine eşit oranda kullanılmıştır. Pomzasız serilerde uçucu kül ve cüruf oranları sırasıyla %50 ve %50, %20 oranında pomza içeren numunelerde uçucu kül ve cüruf oranları %40 ve %40, %40 oranında pomza içeren numunelerde uçucu kül ve cüruf oranları %30 ve %30 olarak kullanılmıştır. Kullanılan bazaltik pomza, F-tipi uçucu kül ve yüksek fırın cürufu Sika şirketi

tarafından temin edilmiştir. Kullanılan ince agrega, 4 mm'nin altında dane boyutuna sahip doğal kumdur. Toz halindeki pomzanın parçacık boyutu 200 μm 'den küçüktür; pomzanın özgül ağırlığı 2,5 (g/cm^3) ve Blaine inceliği 3700 (cm^2/g) olarak belirlenmiştir. Agrega dane dağılımı eğrileri, diğer çalışmalara benzer bulunmuştur [20, 21]. Çizelge 1'de pomza, uçucu kül ve cürufun fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca 3 farklı sodyum hidroksit molaritesi 8 M, 12 M ve 16 M kullanılmıştır. Sodyum silikat çözeltisi (Na_2O : %11,4, SiO_2 : %30,1, su: %57,5 kütlece) sıvı olarak, NaOH ise %97-98 saflıkta peletler halinde temin edilmiştir. NaOH çözeltisi kullanılmadan en az bir gün önce hazırlanıp, soğuması sağlanmıştır.

Çizelge 1. Pomza, cüruf ve uçucu külün fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	Fe_2O_3 (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Na_2O (%)	K_2O (%)	Cl (%)	Yanma kayıp (%)	Özgül ağırlık (g/cm^3)
Bazaltik pomza	58.12	21	11.47	7	7	0.41	5.16	1.86	-	1.68	2.5
Cüruf	37.97	13.27	37.92	1.16	5.64	0.23	0.84	0.56	0.01	0.01	2.95
F-tipi uçucu kül	56.15	26.37	1.79	6.44	2.35	0.056	1.1	3.8	0.09	2.2	2.05

2.2. Numunelerin Hazırlanması ve Kür Koşulları

Pomza bazlı geopolimer harç numuneleri beton üretimine benzer şekilde laboratuvar ortamında üretilmiştir. Bir gün öncesinde alkali çözeltisi hazırlanmış ve laboratuvar ortamında 24 saat soğutulmuştur. İlk önce kuru malzemeler (kum, cüruf, kül, varsa pomza) homojenlik sağlamak için mikserde 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, önceden hazırlanan alkali aktivatör çözeltisi mikserin içine eklenmiş ve 2 dakika daha karıştırılmıştır. Ardından, süper akışkanlaştırıcı karışıma dâhil edilmiş ve ek olarak 2 dakika daha karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Pomza bazlı geopolimer harçların karıştırma işlemi toplamda 6 dakika sürmüştür. İşlenebilirliği artırmak için yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi (Sika Plastiment-15) kullanılmış olup, dayanım için ise sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2.5, aktivatör/bağlayıcı oranı ise 0.45 olarak belirlenmiştir [22, 23]. Numunelerde bazaltik pomza olmayan numuneler P0, %20 pomza içeren numuneler P20 ve %40 pomza içeren numuneler ise P40 olarak isimlendirilmiştir. İkinci terim NaOH molaritesini göstermektedir. Örneğin, P40-16M numunesi %40 pomza içermekte olup, sodyum hidroksit molaritesi 16 Molar olan geopolimer numuneleri göstermektedir.

Basınç dayanım testi için 50×50×50 mm küp numuneleri üretilip ASTM C39 standardına göre test edilmiştir. Eğilme dayanım testi için ise 40×40×160 mm prizmatik üretilerek eğilme dayanımları EN1015-11 standardı kullanılarak belirlenmiştir. Numuneler üretildikten hemen sonra üzeri alkali çözeltinin buharlaşmasını önlemek amacıyla plastik torbalarla kaplanmış ve geopolimerizasyon aktivasyonu için 65°C'de 48 saat süreyle ısı kürü uygulanmıştır. Isı kürü sonrası geopolimer numuneler test zamanı gelene kadar oda sıcaklığında (23±2°C) tutulmuştur. Şekil 1'de bazaltik pomza tozu, üretilen numuneler, uygulanan ısı kürü ve eğilme testi gösterilmiştir. Çizelge 2'de ise geopolimer numunelerin üretilmesinde kullanılan malzeme miktarları verilmiştir. 8 M, 12 M, 16 M ifadelerinde ise sodyum hidroksit molaritesi değişmektedir.



Şekil 1. Bazaltik pomza katkılı geopolimer numuneler

Çizelge 2. Geopolimer harçlarda kullanılan malzeme miktarları (g/l)

Malzeme	P0 (50C+50U)	P20 (40C+40U+20P)	P40 (30C+30U+40P)
Kum	1608	1598	1587
Bazaltik pomza	0	107	212
Cüruf	268	213	159
Uçucu kül	268	213	159
Sodyum silikat	172	172	172
Sodyum hidroksit	69	69	69
Akışkanlaştırıcı	2	2	2

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Birim Hacim Ağırlık

Çizelge 3’de 50x50x50 mm ebatlarındaki küp geopolimer harçların birim hacim ağırlıkları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, pomza oranının artması numunenin birim hacim ağırlığını azaltmaktadır. Birim hacim ağırlıklarındaki azalmanın sebebi ise pomzanın özgül ağırlığı ile mineral katkıların özgül ağırlığı arasındaki farkla ilişkilidir [24]. Başka bir çalışmada da pomza tozunun kademeli olarak artması birim hacim ağırlığını düşürmüştür [25]. Ayrıca, birim hacim ağırlıkları sodyum hidroksit molaritesi arttıkça az da olsa artmaktadır. Sodyum hidroksit molaritenin artması katı sodyum hidroksit parçacıklarının miktarının artırdığı için numunelerdeki birim hacim ağırlığı artmıştır.

Çizelge 3. Geopolimer numunelerin birim hacim ağırlıkları

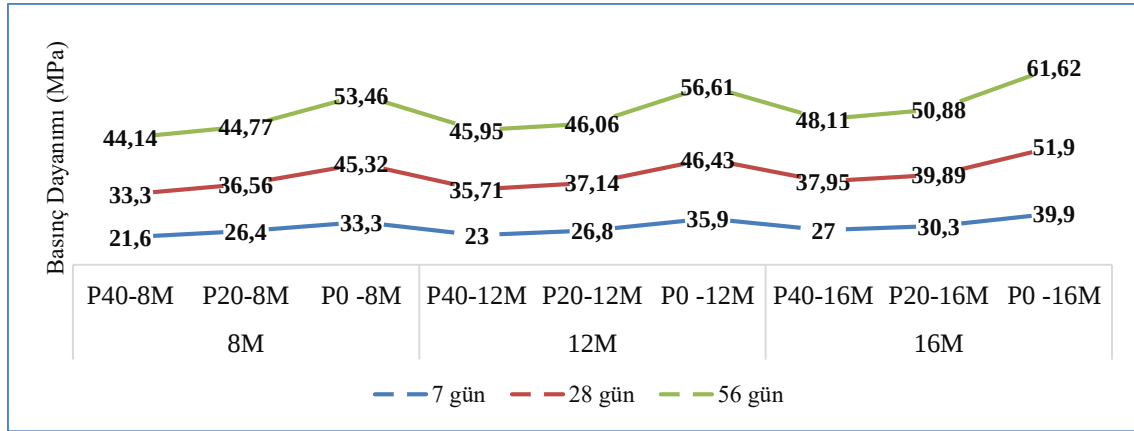
Numune adı	(g/cm ³)	Numune adı	(g/cm ³)	Numune adı	(g/cm ³)
P0 -8M	2.36	P0 -12M	2.38	P0 -16M	2.42
8M P20-8M	2.34	12M P20-12M	2.35	16M P20-16M	2.38
P40-8M	2.28	P40-12M	2.30	P40-16M	2.32

3.2. Basınç Dayanımı Sonuçları

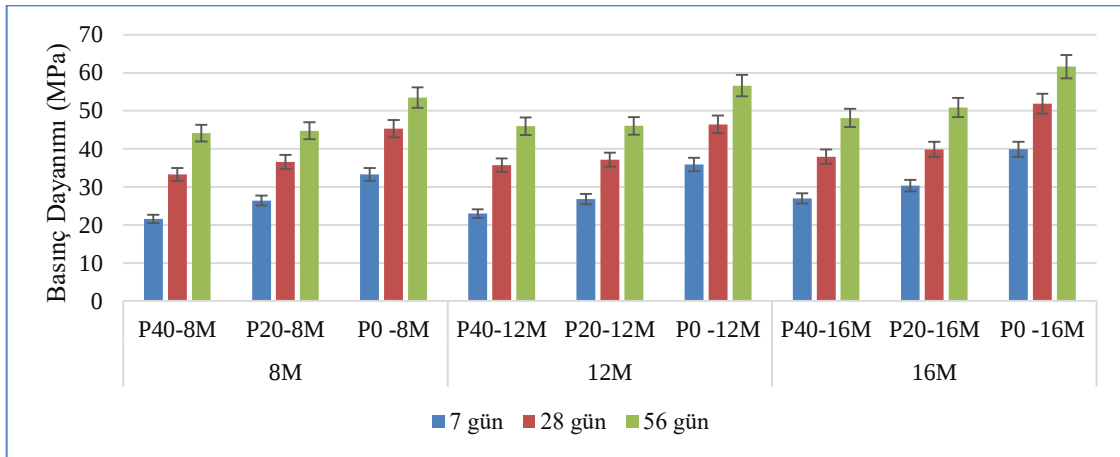
Çizelge 4’de ise farklı sodyum hidroksit molaritesine sahip ve pomza katkılı geopolimer numunelerin 7., 28. ve 56. günlerdeki basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Her bir seri için 3 numunenin ortalama basınç dayanım değeri alınarak numunelerin basınç dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en yüksek basınç dayanımı P0-16M numunelerinde elde edilirken, en düşük basınç dayanımı ise P40-8M geopolimer harç numunelerinde elde edilmiştir. Sonuçlara göre, geopolimer numunelere 65 °C 48 saat ısı kürü uygulanmasına rağmen, basınç dayanımlarındaki artışın zamanla devam ettiği görülmektedir (Şekil 2). Bu da geopolimerizasyon reaksiyonlarının tamamlanmadığını göstermektedir. Isı kürü uygulandıktan sonra artan basınç dayanımları literatürde de rapor edilmiştir [26,27]. Kullanılan pomza oranının artması geopolimer harç numunelerinde basınç dayanımını düşürmüştür. Fakat %20 pomza kullanımı ile %40 pomza kullanımı arasındaki dayanım farkı özellikle çok azdır.

%40 pomza kullanımında dahi 28. günde elde edilen basınç dayanım değerleri birçok standartta yapıların inşasında kullanılması gereken beton numunelerde minimum basınç dayanımı olan 25 MPa (silindir) ve 30 MPa (küpe) değerlerinden daha fazladır. Şekil 3’de ise sodyum hidroksit molaritesi değişiminin geopolimer harç numunelerde basınç dayanımına olan etkisi gösterilmektedir. Sonuçlara göre, sodyum hidroksit molaritesi arttıkça pomza katkılı geopolimer numunelerin basınç dayanımı da artmaktadır. En düşük basınç dayanımı 8M numunelerinde, sonra 12M numunelerde, en yüksek dayanım ise 16M geopolimer numunelerde elde edilmiştir. Molaritenin artması sonucu elde edilen daha alkali bir ortam, pomzadan silika çözünmesini kolaylaştırarak, dayanım artışına katkı sağlayan sodyum alüminyum silikat-hidratlı jel (N-A-S-H), C-S-H (kalsiyum silikat-hidratlı jel) ve C-A-S-H (kalsiyum alüminyum silikat-hidratlı jel) geopolimerizasyon ürünlerinin artmasını sağlayarak dayanım katkıda bulunmaktadır [3]. Özellikle yüksek kalsiyum içeriğine sahip cürufun alkali aktivasyonu sonucunda C-S-H ile C-A-S-H jelleri oluşurken, uçucu külün aktivasyonu sırasında ise ana jel N-A-S-H jelleri oluşarak, geopolimer numunelerde basınç dayanımının artmasını sağlamaktadır [28,29]. Sonuçlara göre, geopolimer harç numunelerde

öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve F-tipi uçucu kül yerine %40 oranlarına kadar bazaltik pomza ikamesi yapılmasının uygun olabileceği söylenebilir.



Şekil 2. Numunelerinin farklı günlerdeki ortalama basınç dayanımı (MPa)



Şekil 3. Numunelerinin farklı günlerdeki ortalama basınç dayanımı (MPa)

Çizelge 4. Numunelerin farklı günlerdeki ortalama basınç dayanımları

		Ortalama basınç dayanımı (MPa)		
Numune adı		7 gün	28 gün	56 gün
8 M	P40-8M	21,6	33,3	44,14
	P20-8M	26,4	36,56	44,77
	P0-8M	33,3	45,32	53,46
12 M	P40-12M	23	35,71	45,95
	P20-12M	26,8	37,14	46,06
	P0-12M	35,9	46,43	56,61
16 M	P40-16M	27	37,95	48,11
	P20-16M	30,3	39,89	50,88
	P0-16M	39,9	51,90	61,62

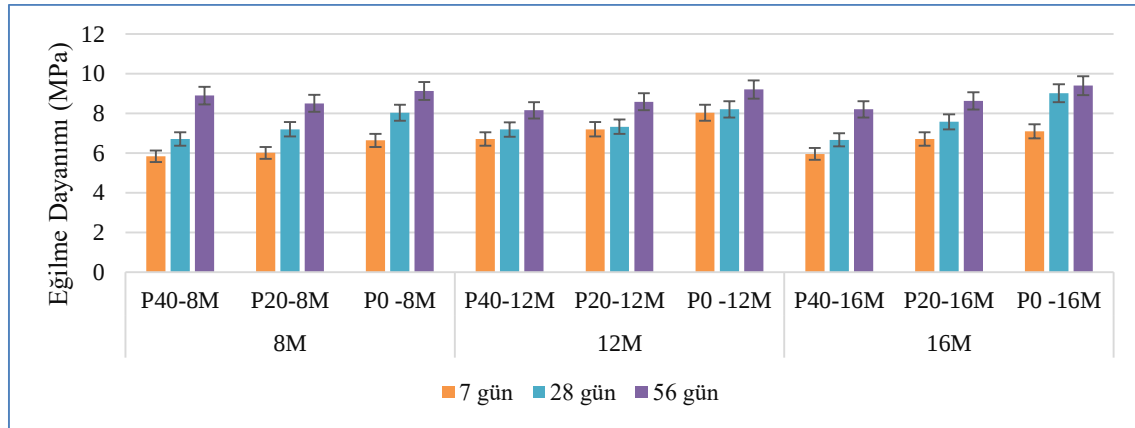
3.3. Eğilme Dayanımı Sonuçları

Çizelge 5'te farklı sodyum hidroksit molaritesine sahip ve pomza katkılı geopolimer numunelerin 7., 28. ve 56. günlerdeki üç noktalı eğilme dayanımı sonuçları verilmiştir. Her bir seri için 3 numunenin ortalama eğilme dayanım değeri alınarak numunelerin ortalama eğilme dayanımı elde edilmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, en yüksek eğilme dayanımı P0-16M numunelerinde 9,40 MPa olarak elde edilirken, en düşük eğilme dayanımı ise P40-8M numunelerinde 5,84 MPa olarak elde edilmiştir. Pomza oranı arttıkça eğilme dayanımı değerleri düşmektedir. Şekil 4'de bazaltik pomza katkılı geopolimer harç

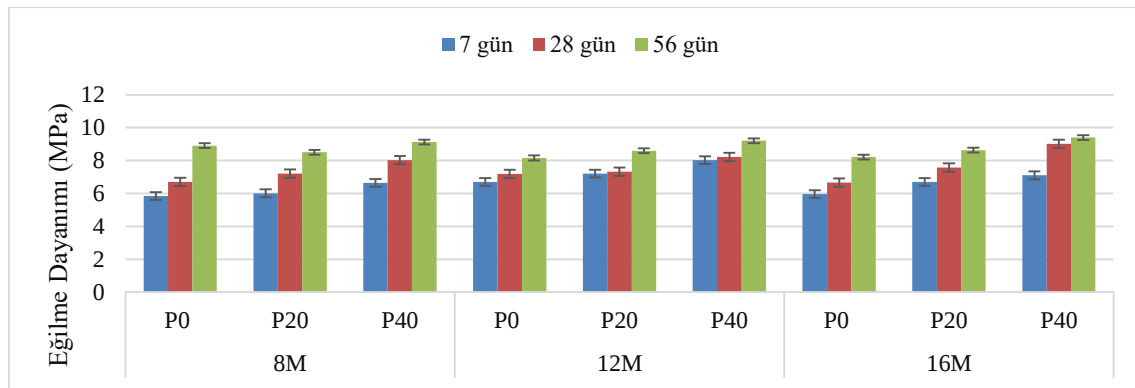
numunelerin farklı günlerdeki ortalama eğilme dayanım sonuçları gösterilmiştir. Geopolimer numunelere ısı kürü uygulanmasına rağmen, zaman arttıkça numunelerin eğilme dayanımları artmıştır. Bu da geopolimerizasyon sürecinin ilk günlerde tamamlanmadığını, devam eden geopolimerizasyon reaksiyonlarından ötürü oluşan C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H jel oluşumunun eğilme dayanımını arttırdığı söylenebilir. Şekil 5’de ise sodyum hidroksit molaritesi değişiminin bazaltik pomza katkıli geopolimer harç numunelerin eğilme dayanıma olan etkisi gösterilmektedir. Sonuçlara göre, sodyum hidroksit molaritesi arttıkça pomza katkıli geopolimer numunelerin eğilme dayanımı az da olsa artmaktadır. Özellikle 7. gün eğilme dayanımları sonuçlarına göre en yüksek eğilme dayanımına sahip numuneler sodyum hidroksit molaritesi 12M olan numuneler olmuştur. Sonraki günlerde ise en yüksek eğilme dayanımları 16M geopolimer harç numunelerde olmuştur. Bunun sebebi olarak alkali ortamın kısa zamanda pomzadaki silisi çözmemesi olarak gösterilebilir. Elde edilen bu bulgular, pomza oranı ve sodyum hidroksit molaritesinin eğilme dayanımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5. Bazaltik pomza katkıli numunelerinin farklı günlerdeki ortalama eğilme dayanımı (MPa)

		Ortalama eğilme dayanımı (MPa)		
Numune adı		7 gün	28 gün	56 gün
8M	P40-8M	5,84	6,71	8,90
	P20-8M	6,01	7,20	8,51
	P0-8M	6,64	8,03	9,13
12M	P40-12M	6,71	7,19	8,16
	P20-12M	7,20	7,33	8,59
	P0 -12M	8,03	8,21	9,21
16M	P40-16M	5,96	6,67	8,21
	P20-16M	6,71	7,58	8,63
	P0-16M	7,10	9,02	9,40



Şekil 4. Bazaltik pomzalı geopolimer numunelerinin farklı günlerdeki eğilme dayanımı (MPa)



Şekil 5. Farklı molariteye sahip geopolimer numunelerinin ortalama eğilme dayanımı (MPa)

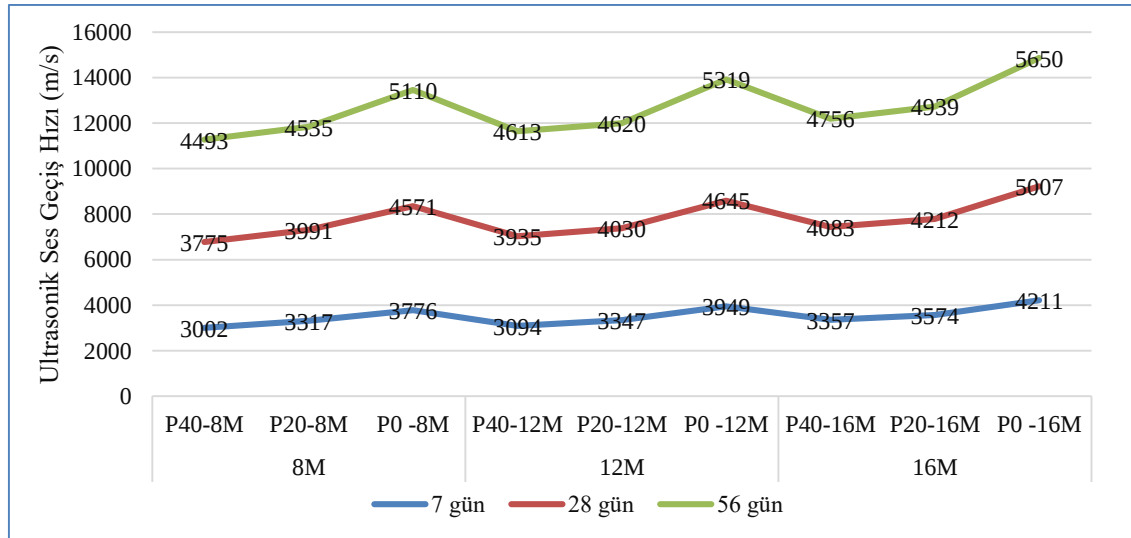
3.4. Ultrasonik Geçiş Hızı Sonuçları

Yapılan çalışma kapsamında bazaltik pomza katkılı geopolimer harç numunelerinin ultrasonik geçiş hızı (UPV) değerleri de elde edilmiştir. Deneyde TS EN 12504-4'te belirtilen ultrases geçiş hızının tayini deneyi uygulanmıştır. Deneyde, 0,1 μ s duyarlıklı ultrases aleti ile t, μ s ses geçiş süreleri ve ultrasonik geçiş hızı (m/s) değerleri ölçülmüştür. Çizelge 6'da bazaltik pomza katkılı geopolimer harç numunelerin UPV sonuçları gösterilmiştir. Neville [30] çalışmasında UPV değerlerine göre betonun mükemmel, iyi, orta ve kötü olarak sıralamıştır. UPV değerleri < 3000 m/s ise kötü, 3000-3500 m/s arası ise orta, 3500-4500 m/s arası ise iyi, >4500 m/s ise mükemmel olarak sıralamıştır.

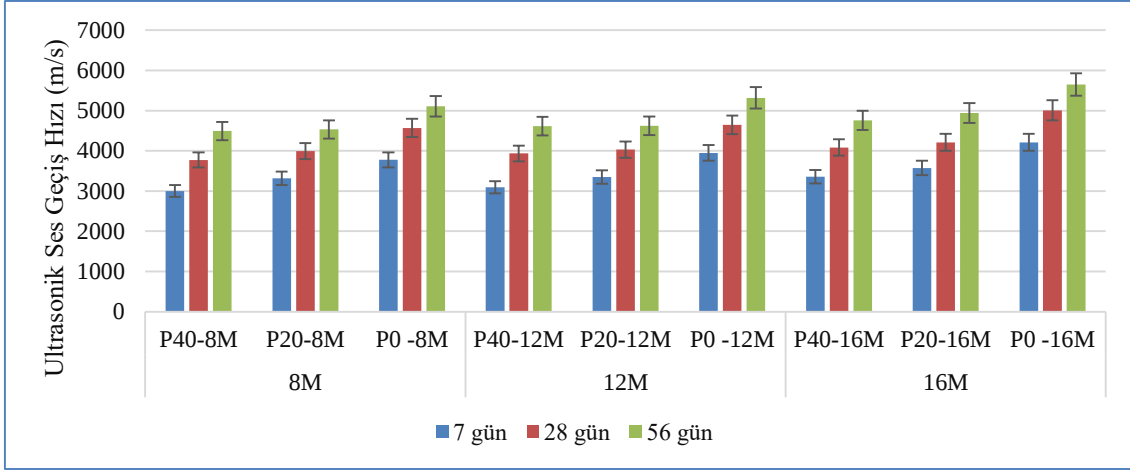
Çizelge 6. Pomza katkılı numunelerinin farklı günlerdeki ultrasonik ses geçiş hızı (UPV) (m/s)

		Ultrasonik ses geçiş hızı (UPV) (μ s)		
Numune adı		7 gün	28 gün	56 gün
8M	P40-8M	3002	3775	4493
	P20-8M	3317	3991	4535
	P0 -8M	3776	4571	5110
12M	P40-12M	3094	3935	4613
	P20-12M	3347	4030	4620
	P0 -12M	3949	4645	5319
16M	P40-16M	3357	4083	4756
	P20-16M	3574	4212	4939
	P0 -16M	4211	5007	5650

Şekil 6'da 7., 28. ve 56. günlerde UPV sonuçları gösterilmektedir. 7 günlük UPV sonuçları irdelendiğinde geopolimer harç numuneleri orta, 28 günlük UPV verilerine göre iyi, 56 günlük UPV sonuçlarına göre mükemmel olarak yorumlanabilir. UPV verilerinin düşük olması boşluklu bir iç yapıya ve düşük yoğunluğa işaret ederken, UPV verilerinin yüksek olması için boşluksuz ve yoğun bir iç yapıyı ve yüksek yoğunluğu göstermektedir. Şekil 7'de ise farklı molariteye sahip bazaltik pomza katkılı geopolimer harç numunelerin UPV değerleri gösterilmektedir. Pomza kullanım oranının artması geopolimer harç numunelerde UPV değerlerini düşürmüştür. UPV sonuçları basınç dayanımı sonuçları ile kıyaslandığında benzer sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla UPV sonuçları ile basınç dayanımı sonuçları arasında bir ilişki vardır. UPV değerlerinin yüksek olması geopolimer harç numunelerinde basınç dayanımının yüksek olacağına işaret etmektedir. Literatürde de UPV değerleri ile basınç dayanım değerleri arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu rapor edilmiştir [31].



Şekil 6. Bazaltik pomzalı geopolimer numunelerinin ortalama ultrasonik ses geçiş hızı (m/s)



Şekil 7. Farklı molariteye sahip geopolimer numunelerinin ultrasonik ses geçiş hızı (m/s)

4. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada %20 ve %40 oranlarında F-tipi uçucu kül ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu yerine kullanılan bazaltik pomza ile üretilmiş geopolimer numunelerin 7., 28., ve 56. günlerde basınç ve eğilme dayanımları ve ultrasonik ses geçiş hızı (UPV) sonuçları irdelenmiştir. Ayrıca farklı sodyum hidroksit (NaOH) molaritelerinin (8 M, 12 M ve 16 M) bazık pomza ikameli geopolimer harçların mekanik dayanımına olan etkisi de araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre;

Üretilen bazaltik pomzalı geopolimer harçların taze birim hacim ağırlığı, pomzasız karışımlara göre azalmıştır. Özellikle %40 ve %20 pomza içeren karışımlar, %0 pomza içeren karışımlara kıyasla daha düşük birim hacim ağırlığı değerlerine sahiptir. Bu durum, pomza kullanım oranı arttıkça geopolimer harçların ağırlığında azalma olduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, pomza kullanımı geopolimer harçlarla daha hafif yapıların elde edilmesi sayesinde inşaat uygulamalarında önemli avantajlar sağlayabilir.

Basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarına göre, pomza kullanım oranındaki artışın dayanım sonuçlarında bir düşüşe neden olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen dayanım sonuçlarına göre, en yüksek basınç ve eğilme dayanımları P0-16M numunelerinde elde edilirken, en düşük basınç ve eğilme dayanımları ise P40-8M geopolimer harç numunelerinde elde edilmiştir. Sonuçlara göre, geopolimer numunelere 65 °C 48 saat ısı kürü uygulanmasına rağmen, basınç ve eğilme dayanımlarındaki artışın zamanla devam ettiği görülmektedir. Bu da geopolimer numunelerde geopolimerizasyon reaksiyonlarının uzun süre devam ettiğini kanıtlamaktadır.

Basınç ve eğilme dayanım değerleri ultrasonik ses geçiş hızı değerleri ile ilişkili olup, elde edilen UPV değerlerine göre 7 günlük pomza katkılı numuneler orta, 28 günlük numuneler iyi, 56 günlük numuneler ise mükemmel olarak sınıflandırılmaktadır. Hem dayanım hem de UPV sonuçlarına göre yüksek fırın cürufu ve uçucu kül yerine %40 oranlarında bazaltik pomza bağlayıcı olarak geopolimer numunelerin üretiminde kullanılabilir.

8M, 12M ve 16M sodyum hidroksit molaritesinin dayanım sonuçlarına etkisi incelendiğinde, artan sodyum hidroksit molaritesi pomza katkılı geopolimer numunelerin dayanım değerlerini artırmıştır. Molaritenin artmasıyla beraber pomzadaki silisin çözünmesini daha kolay hale gelmekte, bu da dayanım artışına katkı sağlayan N-A-S-H, C-A-S-H ve C-S-H geopolimerizasyon ürünlerinin oluşumunu sağlayarak dayanıma katkıda bulunmaktadır.

5. KAYNAKLAR

1. Munir, Q., Abdulkareem, M., Horttanainen, M. & Kärki, T. (2023). A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of geopolimer concrete produced from industrial side streams in comparison with traditional concrete. *Science of the Total Environment*, 865, 161230.

2. Qureshi, L.A., Ali, B. & Ali, A. (2020). Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 263, 120636.
3. Çevik, A. & Niş, A. (2023). Introduction to fiber-reinforced alkali-activated composites. In *Advanced Fiber-Reinforced Alkali-Activated Composites*, 1-21, Elsevier.
4. Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E. ve Gönen, T. (2003). Pomza taşının kullanım alanları ve ekonomiye etkisi, *Fırat Üniversitesi DAUM Dergisi*, 1, 118-123.
5. Öz, E. (2007). Nevşehir dolaylarında yüzeylenen asidik pomzanın hafif beton agregası olarak kullanılabilirliği. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 71.
6. Dolgun, O. (2010). Kendiliğinden yerleşen betonlarda öğütülmüş pomza kullanılabilirliğinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 88.
7. Pınarcı, İ. & Kocak, Y. (2022). Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder. *Construction and Building Materials*, 335, 127528.
8. Elmastaş, N. (2012). Türkiye ekonomisi için önemi giderek artan bir maden: Pomza (sünger taşı). *Journal of International Social Research*, 5(23), 197-206.
9. Aksay, E.K. (2005). İzmir-Menderes yöresi pomza cevherinin kullanımına yönelik teknolojik özelliklerinin araştırılması. *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 289.
10. Yıldırım, A.N. (2007). Pomza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen hafif betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 118.
11. Khandaker, M. & Hossain, A. (2002). Properties of volcanic pumice-based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 2478.
12. Yasar, E., Atis, C.D., Kilic, A. & Gulsen, H. (2003). Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash. *Materials Letters*, 57(15), 2267-2270.
13. Gülşen, H. (2004). Bazaltik pomzanın hafif yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği. *Yüksek Lisans Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 73.
14. Türkel, S. & Kadiroğlu, B. (2007). Pomza agregali taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 353-359.
15. Zeyad, A.M., Tayeh, B.A. & Yusuf, M.O. (2019). Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder based high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 216, 314-324.
16. Tahwia, A.M., Aldulaimi, D.S., Abdellatif, M. & Youssf, O. (2024). Physical, mechanical and durability properties of eco-friendly engineered geopolimer composites. *Infrastructures*, 9(11), 191.
17. Yadollahi, M.M., Benli, A. & Demirboğa, R. (2015). The effects of silica modulus and aging on compressive strength of pumice-based geopolimer composites. *Construction and Building Materials*, 94, 767-774.
18. Safari, Z., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mahmood, F. & Tapan, M. (2020). Mechanical characteristics of pumice-based geopolimer paste. *Resources, Conservation and Recycling*, 162, 105055.
19. Tahwia, A.M., Abdellatif, M., Salah, A. & Youssf, O. (2025). Valorization of recycled concrete powder, clay brick powder, and volcanic pumice powder in sustainable geopolimer concrete. *Scientific Reports*, 15(1), 11049.
20. Vafaei, M. & Allahverdi, A. (2016). Influence of calcium aluminate cement on geopolimerization of natural pozzolan. *Construction and Building Materials*, 114, 290-296.
21. Kurtoglu, A.E., Alzebaree, R., Aljumaili, O., Nis, A., Gulsan, M.E., Humur, G. & Cevik, A. (2018). Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolimer concrete. *Advances in Concrete Construction*, 6(4), 345.
22. Erol, F., Al-mashhadani, M.M., Aygörmmez, Y. & Niş, A. (2023). Effect of ceramic waste powder content and sodium hydroxide molarity on the residual mechanical strength of alkali-activated mortars. *Materials Chemistry and Physics*, 309, 128403.
23. Olivia, M. & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolimer concrete designed by Taguchi method. *Materials & Design*, 36, 191-198.
24. Balun, B. & Karataş, M. (2021). Influence of curing conditions on pumice-based alkali activated composites incorporating Portland cement. *Journal of Building Engineering*, 43, 102605.
25. Kabay, N., Mert, M., Miyan, N. & Omur, T. (2021). Pumice as precursor in geopolimer paste and mortar. *Journal of Civil Engineering and Construction*, 10(4), 225-236.
26. Bakharev, T. (2005). Geopolimeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224-1232.
27. Palomo, A., Grutzeck, M.W. & Blanco, M.T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329.

28. Thunuguntla, C.S. & Rao, T.G. (2018). Effect of mix design parameters on mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete. *Construction and Building Materials*, 193, 173-188.
29. Al-Antaki, T.S.W. & Niş, A. (2025). The influences of sulfuric acid and magnesium sulfate attacks on pumice powder incorporated alkali-activated mortars with different sodium hydroxide molarities. *Construction and Building Materials*, 493, 143136.
30. Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. 4th Edition, Addison Wesley Longman Ltd., Essex.
31. Mehmetoğlu, M. (2023). Strength investigation of slag-based geopolymer composites incorporating different amounts of colemanite waste and silica fume under different exposure conditions. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38(3), 841-849.
32. Gündüz, L. & Kalkan, Ş.O. (2022). Anhidrit III katkısının çimento esaslı harcın performansına etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(4), 959-972.

