

Silika Tozu Tane Boyutu ve Dozajının Kendiliğinden Yerleşen Harçların Dayanım, Durabilite ve Porozite Performansına Etkisi

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 17.02.2024

Kabul/Accepted: 09.06.2024

Yayımlandı/Published: 20.08.2024

Effect of Grain Size and Dosage of Silica Powder on the Strength, Durability and Porosity Performances of Self-Compacting Mortar

Tekin YILMAZ*, 

Madencilik ve Maden Çıkarma Bölümü, Gümüşhane MYO, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

Beyaz-Portland çimentosu (B-PÇ) ile üretilen kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) işlenebilirlik, mekanik, porozite ve istatistiksel özellikleri üzerinde farklı tane boyutuna (mikro: M-ST ve nano: N-ST) sahip silika tozu (ST) ikamesinin etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada, 0,50 ve 0,70 su/çimento oranında kontrol KYH ve B-PÇ yerine %2-4-7 oranlarında M-ST ve N-ST ikame edilerek KYH'ler hazırlanmıştır. Taze karışımlar, yayılma çapı (YÇ) ve V-hunisi (V-H) akış süresi testlerine tabi tutularak EFNARC'a (2005) göre karışımların işlenebilirlik özellikleri değerlendirilmiştir. Sertleşmiş KYH'ler üzerinde 28-56 günlük kür süresi sonunda basınç dayanımı (BD) ve eğilme dayanımı (ED) testleri uygulanırken, donma-çözülme (D-Ç) ve porozite (P) testleri 28 gün sonunda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bulgular arasındaki (BD-ED, P-BD ve P-ED) ilişki modelleri istatistiksel (*t*- ve *F*-testi) olarak incelenmiştir. Taze karışımların test sonuçları, ST miktarı artışının KYH'lerin işlenebilirliklerini (YÇ'de azalma ve V-H süresinde artma) kısmen azalttığını göstermesiyle birlikte tüm karışımlar EFNARC'ın (2005) belirlediği sınır değerleri sağlamıştır. Sertleşmiş KYH'lerin bulguları, B-PÇ'ye yapılan ST ikamesinin, karışım özelliklerinden bağımsız KYH'lerin dayanım performanslarını (BD/ED= %42,8/22,4'e kadar) iyileştirdiğini, D-Ç kaynaklı mukavemet kayıplarını BD/ED için sırasıyla %3,7/5,3'e kadar sınırlandırdığını ve poroziteyi %16,3-17,1'den 14,3-15,5'e azalttığını ortaya koymuştur. KYH'lerin dayanım/porozite performansları konusunda %7 ST (özellikle N-ST) ikamesinin oldukça yüksek katkısının olduğu gözlemlenmiştir. İstatistiksel analiz sonuçları, bulgular arasındaki ilişki modellerinin doğrusal olduğunu ($r \geq 0,845$), ve *t*- ve *F*-testleri sonucunda *r*-değerleri ve eşitliklerin anlamlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro-/Nano-silika tozu; Beyaz-Portland çimentosu; Basınç/eğilme dayanımı; Donma-çözülme; Porozite; İstatistiksel analiz.

Abstract

In this study investigating the effects of silica powder (ST) replacement with different particle sizes (micro: M-ST and nano: N-ST) on the workability, mechanical, porosity and statistical properties of self-compacting mortars (SCMs) manufactured by exploiting white-Portland cement (W-PC), the SCMs were produced by utilizing only W-PC and replacing W-PC with 2-4-7wt.% M-ST/N-ST at 0.50 and 0.70 water/cement ratios. The workability of fresh mixtures was evaluated according to EFNARC (2005) by subjecting them to mini-slump flow (M-SF) and V-funnel (V-F) tests. The compressive-(CS) and flexural-strength (FS) tests were performed on the hardened-SCMs after 28-56 days, while, freeze-thaw (F-T) and porosity (P) tests were applied after 28 days. The relationship (CS-FS, P-CS and P-FS) models between the findings were also examined with statistical analyses (*t*- and *F*-test). The fresh-mixtures test results showed that increasing the ST proportion slightly decreased the SCMs' workability (decrease in M-SF and increase in V-F time), but all mixtures met the limit-values set by EFNARC (2005). The hardened-SCMs' findings revealed that ST replacement to W-PC improved the strength performances (CS/FS= up to 42.8/22.4%), limited the F-T-induced strength-losses up to 3.7/5.3% for CS/FS, and decreased the porosity from 16.3-17.1% to 14.3-15.5%, regardless of mixture traits. The replacement of 7wt.% ST (especially N-ST) were observed to possess a considerably high contribution on the SCMs' strength/porosity performance. The statistical analysis results demonstrated that the relationship models between the findings were linear ($r \geq 0.845$) and the *r*-values and equations were significant as a result of *t*- and *F*-tests.

Keywords: Micro-/nano-silica powder; White-Portland cement; Compressive/flexural strength; Freeze-thaw; Porosity; Statistical analysis.

1. Giriş

Kendiliğinden yerleşen harç (KYH), geleneksel betonun çeşitli performans özelliklerinin (işlenebilirlik, dayanım, durabilite, vb.) geliştirilebilmesi için ilk olarak 1980'li yılların sonunda Japonya'da Okamura tarafından üretilen kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) performans özelliklerinin incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır (Açıkgenç vd. 2013, Quercia vd. 2014, Benli ve Karatas

2019). KYB ile benzer taze (akışkanlık, işlenebilirlik vb.) ve sertleşmiş (mukavemet, durabilite vb.) özellikler gösteren ve onun tasarımı açısından oldukça büyük önem arz eden performans özellikleri KYH'ler kullanılarak kolaylıkla değerlendirilebilmektedir. Bunda karışım bileşenleri (iri agrega hariç) ve test değişkenleri aynı ve/veya benzer olan KYH'nin kontrolünün KYB'ye göre daha kolay olması oldukça etkilidir (Şahmaran vd. 2006, Mohseni vd. 2015,

Benli ve Karatas, 2019, Etili vd. 2024).

Taze ve sertleşmiş performanslar açısından önemli nitelikler barındıran KYB ve/veya KYH'ler içerisinde kimyasal katkı ve dikkate değer miktarlarda bağlayıcı malzeme kullanılmasından kaynaklı olarak en önemli sorun üretim maliyetidir (Açıkgenç vd. 2013, Şahmaran vd. 2006, Al-Oran vd. 2022). Ayrıca, çimento endüstrisinde üretilen klinker miktarı başına neredeyse aynı miktarda karbondioksit gazı (CO₂) emisyonunun açığa çıktığı (0,9 tona kadar CO₂/1,0 ton çimento) düşünüldüğünde bu malzemelerin üretiminde kullanılan çimentodan kaynaklı CO₂ gazı emisyonlarının artması küresel sera etkisi boyutlarının büyümesine yol açmaktadır (Gupta vd. 2021). KYB ve/veya KYH'lerin yeterli işlenebilirlik performansının sağlanabilmesi açısından kimyasal katkı kullanımı olmazsa olmaz bir durum olmasına karşın, beton/harç üretim maliyeti ve CO₂ gazı emisyonu gibi problemleri ortadan kaldırmak veya etkisini azaltabilmek amacıyla KYH karışımlarında bağlayıcı (Portland çimentosu: PÇ) için kısmi ikame olarak puzolanik ve/veya inert özellikteki doğal (metakaolin, kaolin, bazalt tozu, zeolit, volkanik kül, kireçtaşı tozu, pomza, vb.) veya atık ürünlerin (AÜ) (uçucu kül, silika tozu, yüksek fırın cürufu, yer fıstığı kabuğu külü vb.) kullanımı üzerine sayısız deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir (Felekoğlu vd. 2006, Güneş vd. 2009, Mohseni vd. 2015, Karataş vd. 2017, Benli ve Karatas 2019, Karataş vd. 2020, Faheem vd. 2021, Altuncu ve Öcal 2022, Türk vd. 2022, Garg vd. 2023).

KYH'lerin sertleşmiş performanslarını artırmak için yaygın bir şekilde kullanılan puzolanik-AÜ'lerden birisi, mikro ve nano boyutlarda öğütülmüş silika tozudur. Bugüne kadar mikro ve/veya nano ölçekte silika tozunun (ST) KYH'lerin farklı performans özellikleri üzerindeki etkilerine odaklanan çalışmalardan bazıları incelendiğinde, Seifan vd.'nin (2020) uçucu kül esaslı jeopolimer harcın (UKEJH) taze ve sertleşmiş özellikleri üzerinde çimento yerine %5-15 oranlarında mikro (M-ST) ve nano (N-ST) boyutlu silika tozu ikamesinin etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, çimentoya yapılan %5 oranındaki M-ST ve N-ST ikamesi ile tüm kür sürelerinde en yüksek mekanik performansların elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Li vd. (2017a) M-ST ve N-ST'nin harcın mekanik ve mikroyapısı üzerindeki birleşik etkisini değerlendirmiş ve harcın mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin çok küçük ölçekli (%1-2) N-ST kullanılarak önemli ölçüde geliştirildiği sonucuna varmıştır. Çeşitli lif tipi ve dozajları (çelik: %0,25-0,75 ve bazalt: %0,3-0,9) kullanılarak üretilen harçların mukavemet ve porozite değişimlerini incelemek için PÇ'ye kısmi ikame (%10 ve %20) olarak ST'nin etkisine odaklanan diğer bir araştırma

çalışmasında (Koksal vd. 2021), yazarlar, tüm lif türleri ve içeriklerinde ST içeren harçların ST içermeyenlere (kontrol) kıyasla dayanım ve porozite testleri sonuçlarında %44,4 ve %45,7'ye kadar iyileşme ölçüldüğünü bildirmişlerdir. Farklı kürlenme yaşlarında (3, 7 ve 28 gün) M-ST ve N-ST'nin tekli ve ikili kullanımının harcın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştıran Garg vd. (2021) çimento yerine %15 M-ST ve %1,0 N-ST ikamesinin harçların basınç dayanımı (BD) değerlerini sırasıyla %19,1 ve %28'e kadar artırdığını, M-ST ve N-ST'nin ikili ikamesinin (%10 M-ST+1,0 N-ST) ise kürlenme yaşlarından bağımsız olarak harçların BD değerlerinde %53'e kadar bir artış sağladığını belirtmiştir. Benzer sonuçlar, harçların mekanik (mukavemet, durabilite) özelliklerini iyileştirmek için %1,0 N-ST kullanımının neredeyse %10 M-ST kadar katkıda bulunduğunu, ancak bunların birlikte kullanımının tek başına kullanımından daha faydalı olduğunu açıklayan araştırmacıların çalışması (Li vd. (2017b) tarafından da ortaya konmuştur. Başka bir çalışmada, Uygunoğlu vd. (2018) PÇ yerine %10-30 oranında ST ikamesi kullanılarak hazırladığı KYH numunelerini 5 yıl küre tabi tuttukten sonra farklı frekanslarda elektriksel özdirenç testine tabi tutmuştur. Araştırmacılar, KYH karışımları içerisinde ST içeriğinin artmasıyla KYH numunelerinin özdirençlerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Yukarıda bazı çalışmalara atıfta bulunulduğu üzere, bugüne kadar farklı tane boyutuna sahip ST'nin PÇ'ye ikame olarak kullanılmasıyla üretilen KYH'lerin çeşitli mühendislik özelliklerinin incelenmesine odaklanan sayısız çalışma gerçekleştirilmiştir. Fakat ileri teknoloji kullanılarak yüksek saflıkta ve ince taneli olarak üretilen ve estetik ve dekoratif özelliklere sahip olan beyaz-Portland çimentosu (B-PÇ) kullanılarak KYH'lere ait gerçekleştirilen çalışmalar göz ardı edilmiştir.

Bu araştırma çalışması, KYH karışımlarında kullanılan B-PÇ yerine iki farklı tane boyut dağılımına sahip ST'nin (mikro: M-ST ve nano: N-ST) farklı oranlarında ikame edilmesinin dayanım, durabilite ve porozite özelliklerine etkilerinin incelenmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda, KYH numuneleri iki farklı su/çimento oranında (0,50 ve 0,70), 550 kg/m³ bağlayıcı dozajlarında B-PÇ yerine %2-4-7 oranında ayrı ayrı M-ST ve N-ST ikame edilerek üretilmiştir. KYH numuneleri 28 günlük kür işlemi sonrasında 27 gün boyunca donma-çözülme (D-Ç) testine tabi tutulmuştur. Tüm KYH numuneleri üzerinde 28 ve 56 günlük kür sürelerini takiben basınç- (BD) ve eğilme-dayanımı (ED) testleri uygulanmıştır. Ayrıca, bulguların (BD, ED ve P) birbirleri ile olan ilişki düzeyleri ve bunların geçerliliği/güvenilirliği *t*- ve *F*-testleri uygulanarak istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 1. KYH bileşenlerinin fiziksel/kimyasal özellikleri

KYH Bileşenleri	Fiziksel Özellikler					
	Tane boyutu (μm)				Özgül ağırlık (g/cm^3)	Yüzey alanı (m^2/g)
	D ₁₀	D ₃₀	D ₅₀	D ₈₀		
B-PÇ	2,3	9,5	20,3	40,1	3,06	0,45
M-ST	0,4	4,3	11,0	28,7	2,18	23,36
N-ST	-	-	-	-	2,12	150,0
Kum	91,0	372,0	986,0	2350,0	2,63	-

KYH Bileşenleri	Kimyasal Özellikler (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Diğer	Kızdırma Kaybı
B-PÇ	21,06	3,96	0,35	65,28	7,14	3,44
M-ST	94,30	0,72	0,93	0,46	2,80	1,72
N-ST	99,80	-	-	-	-	0,2
Kum	0,89	0,25	0,05	55,18	0,61	43,05

2. Materyal ve Metot/Materials and Methods

2.1. KYH Bileşenleri

KYH numunelerinin hazırlanması esnasında bağlayıcı malzeme olarak ÇİMSA çimento fabrikası tarafından üretilen beyaz-Portland çimentosu (B-PÇ) kullanılırken, B-PÇ'ye ikame olarak kullanılan mikro-silika tozu (M-ST) ve nano-silika tozu (N-ST) sırasıyla Dost Kimyasal (İstanbul) ve Çin'den getirilmiştir. Diğer KYH bileşenlerinden olan kum Tunceli'de yer alan bir taşocağından, su azaltıcı (Sika ViscoCrete-SF 18) ise SİKA yapı kimyasalları'ndan temin edilmiştir. B-PÇ, M-ST, N-ST ve kumun tane boyutu dağılımı (TBD), özgül ağırlık (ÖA) ve yüzey alanı (YA) gibi fiziksel karakterizasyon testleri sırasıyla Malvern Mastersizer model tane boyut ölçer, piknometre ve Atom-CM-BL 101 model yüzey alanı ölçer cihazları

kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Çizelge 1'de sunulmuştur.

KYH bileşenlerinin ÖA ve YA sonuçlarının sırasıyla 2,12-3,06 g/cm³ ve 0,45-150,0 m²/g arasında değiştiği tespit edilmiştir. Ayrıca, malzemelerin tane boyutu dağılımları incelendiğinde, B-PÇ ve M-ST tanelerinin %80'inin (D₈₀) sırasıyla 40,1 ve 28,7 μm 'lik elek açıklığından geçtiği anlaşılmaktadır. Kum için ise D₈₀ tane boyutu 2350 μm olarak ölçülmüştür (Çizelge 1). ICP-AES cihazı vasıtasıyla gerçekleştirilen kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'den incelendiğinde, kum haricindeki KYH bileşenlerinin SiO₂ minerali bakımından oldukça zengin (M-ST ve N-ST'nin neredeyse tamamı) olduğu saptanmıştır. Ayrıca, B-PÇ ve kumun yüksek miktarda CaO içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2. KYH karışım reçeteleri

KYH Kodu	KYH Bileşenleri (kg/m^3)				Su	Su azaltıcı	s/ç oranı
	B-PÇ	M-ST	N-ST	Kum			
Kontrol	550	0	0	1410			
2M-ST	539	11	0	1410			
4M-ST	528	22	0	1406			
7M-ST	511,5	38,5	0	1400	275	7	0.50
2N-ST	539	0	11	1408			
4N-ST	528	0	22	1405			
7N-ST	511,5	0	38,5	1399			
Kontrol	550	0	0	1108			
2M-ST	539	11	0	1105			
4M-ST	528	22	0	1102			
7M-ST	511,5	38,5	0	1097	385	12	0.70
2N-ST	539	0	11	1105			
4N-ST	528	0	22	1102			
7N-ST	511,5	0	38,5	1096			

2.2 KYH Numunelerinin Üretimi

EFNARC (2005) ve ASTM C305-20 (2020) standartları çerçevesinde standart KYH bileşenlerinden (B-PÇ, kum, su azaltıcı ve şebeke suyu) oluşan kontrol KYH karışımları iki farklı su/çimento (s/ç) oranında (0,50 ve 0,70) 550 kg/m³ B-PÇ kullanılarak üretilmiştir. M-ST ve N-ST ikameli KYH

karışımlarının hazırlanması sırasında ise aynı bağlayıcı içeriğinde B-PÇ yerine ayrı ayrı ağırlıkça %2-4-7 oranlarında M-ST ve N-ST ikame edilmiştir. Karışım reçetelerinin detaylı bir şekilde paylaşıldığı Çizelge 2'den anlaşılacağı üzere KYH karışımları ikame malzeme tipi ve ikame oranına bağlı olarak "Kontrol, 2M-ST, 4M-ST, 7M-ST, 2N-ST, 4N-ST ve 7N-ST" olarak kodlanmıştır. Hobart

mikseri kullanılarak titizlikle karıştırılan kendiliğinden yerleşen harç karışımları, farklı testlerin (D-Ç, BD ve ED) uygulanması için üstü açık kübik (5×5×5 cm) ve prizmatik (4×4×16 cm) kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 1a). Kalıplarda 24 saat bekletilen KYH'ler daha sonra kalıptan çıkarılmış ve önceden belirlenmiş test sürelerine kadar (28 ve 56 gün) 20±2°C sıcaklıktaki kirece doymuş kür havuzunda kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 1b).

2.3. Yayılma ve V-hunisi Testleri

KYH karışımları, Hobart mikserinde titizlikle karıştırılarak hazırlandıktan sonra, işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesi için, EFNARC'ın (2005) önerdiği yayılma çapı (YÇ) ve V-hunisi (V-H) akış testlerine tabi tutulmuştur. YÇ testi, düz bir yüzey üzerine yerleştirilmiş kesik koni (üst çap/alt çap/yükseklik= 70/100/60 mm) içerisine her bir taze KYH karışımının doldurulmasını ve koninin sabit bir hızla dikey yukarı kaldırılması sonucu karışımın yayılma çapının ölçülmesini içermektedir. V-H testi ise, iç yüzeyi tamamen ıslatılmış huni içerisine taze karışımın sıkıştırılmadan huninin üst seviyesine kadar doldurulması ve ardından huninin alt kapağının açılması suretiyle karışımın tamamen boşalmasına kadar geçen sürenin ölçülmesini kapsamaktadır. YÇ ve V-H testlerine ait sonuçlar EFNARC (2005) tarafından belirlenen sınır değerler çerçevesinde değerlendirilmiştir.

2.4. Donma-çözülme Testi

KYH numunelerinin (Kontrol, %2, %4 ve %7 M-ST/N-ST) donma-çözülme etkisine karşı davranışını açıklığa kavuşturmak için D-Ç testine tabi tutulan 28 günlük numunelerin D-Ç testi uygulanmayan 56 günlük KYH'lerin BD ve ED sonuçları ile kıyaslanması amacıyla 28 günlük kür süresini tamamlayan numuneler (Şekil 1c) 27 gün (54 döngü) boyunca ASTM C666M (2015) uygun olarak D-Ç testine tabi tutulmuştur. Her bir karışım ve test tipi (BD ve ED) için 3 adet olmak üzere toplam 30 adet kübik/prizmatik numune kullanılmıştır. D-Ç kabininin -20°C'de biten donma döngüsü 8 saat/döngü sürerken, çözülme döngüsü 4 saat sonra +4°C'ye ulaşarak tamamlanmıştır. D-Ç testleri tamamlanan numuneler üzerinde 56. günde BD ve ED testleri gerçekleştirilmiştir.

2.5. Basınç/Eğilme Dayanımı Testleri

İlgili standartlara (ASTM C109-16 2016, ASTM C348-21 2021) uygun olarak 28 ve 56 güne kadar kürlenen KYH'lerin basınç (BD) ve eğilme dayanımı (ED) testlerinin gerçekleştirilmesi için bilgisayar kontrollü hidrolik beton/harç presi kullanılmıştır (Şekil 1d). Kübik KYH'lerin BD testinde 2000 kN yüklem kapasitesi ve 1,0 kN/s sabit basınç hızına sahip pres kullanılırken, prizmatik KYH numuneleri üzerinde gerçekleştirilen ED testlerinde yüklem kapasitesi ve sabit basınç hızı sırasıyla 100 kN ve 0,5 kN/s olarak uygulanmıştır. Tüm testlerde 3 adet numunenin kullanıldığı ve nihai sonuçların bu 3 numunenin ortalaması alınarak belirlendiği unutulmamalıdır.

2.6. Porozite Testleri

Bu bölümde, B-PÇ yerine kısmen ikame olarak kullanılan M-ST ve N-ST'nin KYH'lerin porozitesi üzerindeki etkisi, sertleştirilmiş KYH numunelerine porozite (P) testleri uygulanarak ortaya konmuştur. 28 günlük kür süresini tamamlayan toplam 15 adet küp şeklindeki KYH numunesi, her bir karışım tipinde 3 adet olacak şekilde ASTM C642-13 (2022) tarafından önerilen koşullara uygun olarak porozite testine tabi tutulmuştur. Test kapsamında her karışım tipi için 3 adet numunenin doymuş kuru yüzey ağırlığı (W_{DKY}), tamamen suya doymuş haldeki ağırlığı (W_{TSD}) ve etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı (W_{EK}) ölçülerek kaydedilmiştir. Daha sonra, farklı karışım türlerine sahip her bir KYH'nin porozite sonucu Eşitlik (1)'den yararlanılarak hesaplanmış ve sonuçların ortalamaları alınmıştır. Eşitlik (1)'de sunulan terimler denklemin hemen altında ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Porozite testleri için hazırlanan KYH numuneleri, diğer testlerde (BD, ED ve D-Ç) kullanılan numunelerle aynı karışım özellikleriyle üretilmiş ve numuneler üzerinde herhangi bir tahribatlı test yapılmamıştır. Ayrıca, P-testleri öncesinde ve sırasında, ilgili standartta (ASTM C642-13 2022) belirtilen analiz uygulama koşulları eksiksiz olarak yerine getirilmiştir.

$$P (\%) = (W_{DKY} - W_{EK}) \div (W_{DKY} - W_{TSD}) \quad (1)$$



Şekil 1. KYH'lerin kalıplara yerleştirilmesi (a), kür işlemi (b), testler öncesi numuneler (c) ve BD/ED testleri (d)

Eşitlikte verilen W_{EK} , W_{TSD} ve W_{DKY} sırasıyla numunenin sabit bir sıcaklıkta etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığını, tamamen suya doygun haldeki ağırlığını ve suya doyurulduktan sonra yüzeylerinin kurutulmuş haldeki ağırlığını ifade etmektedir.

2.7. İstatistiksel Analiz

Bu çalışmada, edinilen bulguların (BD, ED ve P) birbirleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için ED-BD, P-BD ve P-ED grafikleri hazırlanmıştır. Hazırlanan grafiklerde; farklı eğilim yaklaşımları (deneysel eşitlikler) kullanılarak bulgular arasındaki en uygun ilişki ortaya konmuştur. Ardından, Microsoft Excel programı kullanılarak bu grafiklerden elde edilmiş deneysel eşitliklerin korelasyon katsayıları (r) hesaplanmıştır. Ayrıca, iki değişken (ED-BD, P-BD ve P-ED) arasındaki ilişki düzeyinin güvenilirliğini (önemli/uyumlu olup olmadığını) araştırmak için %95 güven aralığında ($\alpha < 0,05$) regresyon analizleri (t -test: korelasyon katsayılarının (r) güvenilirliği için ve F -test: deneysel eşitliklerin güvenilirliği için) gerçekleştirilmiştir. Tüm verilere ait her iki test için ayrı ayrı hipotezler kurulmuştur (H_0 = Korelasyon anlamsızdır, H_1 = Korelasyon anlamlıdır). Bu hipotezlerin birine karar verebilmek için program tarafından hesaplanan t - ve F - değerleri (t_{hesap} ve F_{hesap}) ile kritik t - ve F - değerlerinin (t_{tablo} ve F_{tablo}) karşılaştırılması gerekmektedir (Tüysüz ve Yaylalı-Abanuz 2012).

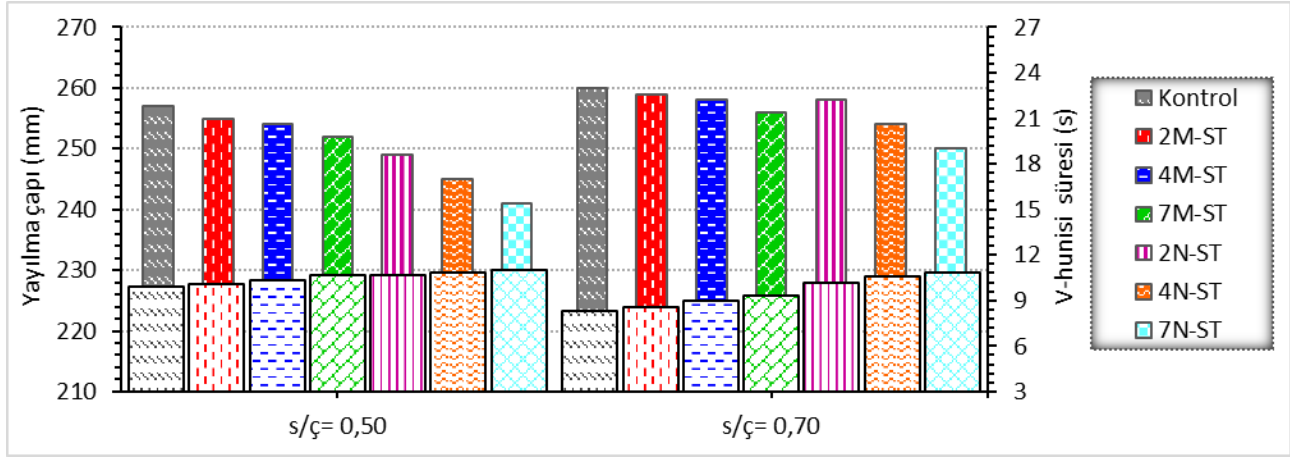
3. Bulgular ve Tartışma/Results and Discussions

3.1. Yayılma çapı ve V-hunisi sonuçları

KYH numunelerinin taze özelliklerini incelemek için gerçekleştirilen yayılma çapı (YÇ) ve V-hunisi (V-H) akış süresi ölçümlerinin sonuçları Şekil 2'de gösterilmiştir. KYH karışımlarının (Kontrol, 2M-ST, 4M-ST, 7M-ST, 2N-ST, 4N-ST ve 7N-ST) YÇ değerleri 0,50 ve 0,70 s/ç oranları için sırasıyla 257-260, 255-259, 254-258, 252-256, 249-258, 245-254 ve 241-250 mm olarak ölçülmüştür. s/ç oranının artışıyla birlikte KYH karışımlarının YÇ değerlerinin arttığı Şekil 2'den açıkça görülmektedir. Bu artışın sebebi olarak karışımlarda kullanılan su (0,50 ve 0,70 için sırasıyla 275 ve 385 kg/m³) ve su azaltıcı kimyasal (0,50 ve 0,70 için sırasıyla 7 ve 12 kg/m³) miktarlarının artırılması gösterilebilir (Çizelge 2). Harç karışımlarında B-PC'ye ikame olarak kullanılan farklı tane boyutuna sahip silika tozu (M-ST ve N-ST) miktarının artışı KYH karışımlarının akışkanlıklarının azalmasına (YÇ değerlerinde azalma) yol açmıştır. M-ST ve N-ST ikameli KYH karışımlarında meydana gelen daha düşük yayılma çapı (akışkanlıkta azalma) değerleri; iki farklı tane boyutuna sahip ST'nin B-PC'ye kıyasla daha ince tanelere ve daha yüksek yüzey alanına (23,36 ve 150,00m²/g > 0,45m²/g) sahip olması ile ilişkilendirilebilir. Böylece karışım için daha yüksek

miktarda suya ihtiyaç duyulduğu bildirilmiştir (Güneyisi vd. 2015). Bu çalışmada elde edilen YÇ değerleri ile uyumlu sonuçların elde edildiği başka bir çalışmada, Benli ve Karataş (2019) KYH karışımlarında PC'ye ikame olarak %6-10-14 oranlarında silis dumanı eklemiş ve bu ikame oranlarına sahip karışımların YÇ değerlerinin kontrol karışımlarına kıyasla azaldığını tespit etmişlerdir. Kendiliğinden yerleşen polimerik harçların reolojik performansları üzerinde farklı mineral katkıların etkilerinin incelendiği bir çalışmada, yazarlar polimer bağlayıcı malzeme olarak kullanılan epoksi reçinesi yerine %60'a kadar ağırlıkça silis dumanı (SD) ikame etmişler ve YÇ testlerini yapmışlardır. Sonuçlar, %40 SD ikamesine kadar YÇ değerlerinin azaldığını, yani SD ikameli karışımların akışkanlıklarının azaldığını göstermiştir (Uygunoğlu vd. 2017). Daha önce yapılan çalışmalar ışığında, özellikle N-ST'nin karışım içerisinde filler etkisi göstererek karışım da daha güçlü sıkıştırma etkisi sağladığını, çimento matrisini iyileştirdiğini ve işlenebilirlikten etkilenen bazı önemli parametreler (segregasyon, kanama, vb.) üzerinde olumlu bir katkı sunduğunu bildirmişlerdir (Senff vd. 2010, Hani vd. 2018, Garg vd. 2021). Dahası, tüm KYH karışımlarının yayılma çapı değerlerinin EFNARC (2005) tarafından belirlenen alt ve üst sınırlar (240-260 mm) içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

KYH karışımlarının V-H sonuçları değerlendirildiğinde (Şekil 2), karışımların s/ç oranının artması tüm KYH karışımlarının V-Hunisiinden daha kısa sürede boşalmasına yol açmıştır. Ayrıca, ST tane boyutu ve s/ç oranından bağımsız olarak karışım içerisine ikame edilen ST'nin miktarının artması, YÇ değerlerinin azalması ile uyumlu olarak V-H değerlerini (viskoziteyi) arttırmıştır. Sonuçlara bakıldığında, kontrol karışımlarının V-H değerlerinin 0,50 ve 0,70 s/ç oranlarında 9,9 s ve 8,3 s iken, M-ST içeren karışımlarının aynı s/ç oranlarında sırasıyla 10,1-10,7 s ve 8,6-9,3 s sonunda V-hunisiinden tamamen boşaldığı belirlenmiştir. N-ST içeren KYH karışımlarının V-hunisiinden tamamen boşalma süreleri ise 0,50 ve 0,70 s/ç oranları için sırasıyla 10,7-11 s ve 10,2-10,8 s arasında değişmiştir (Şekil 2). Farklı tane boyutlu silika tozu (M-ST ve N-ST) kullanımıyla, karışımların viskozitesinin artışıyla sonuçlanan V-H değerlerinin artışı ikame olarak kullanılan malzemelerin paketleme (sıkıştırma) özelliklerine atfedilebilir (Bernal vd. 2018). Bu çalışmada üretilen KYH karışımlarının V-H değerleri, ST dozajının artmasıyla V-H değerlerinin arttığını bildiren geçmiş çalışmalarla uyum göstermiştir (Güneyisi vd. 2016, Naniz vd. 2018). Dahası, tüm KYH karışımlarının EFNARC (2005) tarafından tanımlanan V-Hunisi akış süresi alt-üst limitlerini (7-11 s) karşıladığı görülmektedir.



Şekil 2. ST tane boyutu (mikro: M ve nano: N) ve dozajının (%2-4-7) KYH'lerin YÇ ve V-H sonuçlarına etkisi

3.2. Basınç dayanımı sonuçları

Şekil 3, B-PC'ye kısmi ikame olarak farklı tane boyutları (M-ST ve N-ST) ve dozajlarda (%2-4-7) kullanılan ST'nin 0,50 ve 0,70 s/ç oranlarında üretilen KYH numunelerinin 28-56 günlük kür süresi boyunca BD değişimine olan etkilerini göstermektedir. Daha önce gerçekleştirilen sayısız çalışmada ulaşılan sonuçlarla uyumlu olarak (Çakır ve Aköz 2008, Benli vd. 2017, Li vd. 2017a, Garg vd. 2021, Türk vd. 2022), ST tane boyutu, dozajı ve s/ç oranından bağımsız olarak kür süresinin 28 günden 56 güne ilerlemesi ile KYH'lerin basınç dayanımları artmıştır. Kür süresi artışının çimentolu malzemelerin mukavemetini artırması; ilerleyen kür süresiyle birlikte çimento fazındaki hidratasyon süreci boyunca katı ürünlerin (CH, Ca(OH)₂, C-S-H, vb.) miktarının artması ile açıklanabilir. Böylece, çimento hamuru-agrega taneleri arasındaki gözeneklerin dolması ve daha düşük poroziteye sahip daha yoğun bir mikroyapının oluşması sağlanabilir (Yılmaz vd. 2014). Öte yandan, çimentolu malzemelerin (yani KYB, KYH, çimento hamuru, macun dolgu) mekanik özelliklerinin (BD, ED, vb.) s/ç oranı tarafından yönetildiği gerçeğine dayanarak (Ercikdi vd. 2014, Yılmaz ve Ercikdi 2016, Li vd. 2017a), KYH karışımlarının s/ç oranlarındaki artışın, 28-56 günlerde tüm KYH'lerin BD davranışları için olumsuz bir etkiye neden olduğu ifade edilebilir.

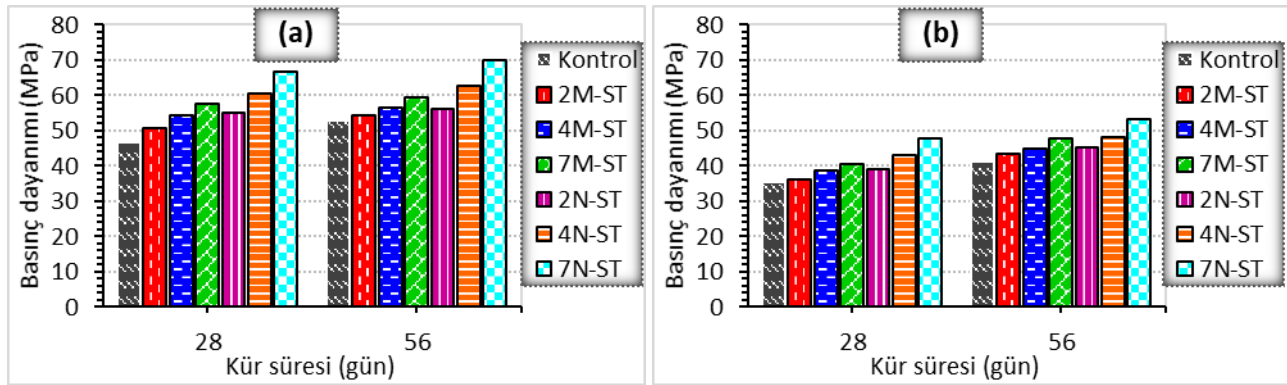
Basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, B-PC yerine %7 N-ST ikame edilerek 0,50 s/ç oranında üretilen KYH numunesi (7N-ST), 28 ve 56 gün sonunda 66,75 ve 69,93 MPa ile en yüksek basınç dayanımlarını üretirken, en düşük BD değerleri (35,25 ve 41,22 MPa); aynı kür sürelerinde 0,70 s/ç oranında hazırlanan Kontrol KYH numunelerinde ölçülmüştür (Şekil 3a ve b). Daha yüksek s/ç oranına sahip KYH numunelerinde gözlemlenen daha düşük BD değerleri, KYH karışımlarında daha yüksek miktarda karışım suyu kullanılmasına (Çizelge 2) bağlı olarak daha az ve/veya daha zayıf çimentolama bağlarına atfedilebilir (Galaa vd. 2011, Yılmaz vd. 2014). Bu

sonuçlarla oldukça tutarlı olarak daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda, karışımlarda kullanılan ve s/ç oranını belirleyen karışım suyu miktarının çimento hidratasyonunu ve dolayısıyla çimentolu malzemelerin dayanımını etkilediği rapor edilmiştir. Dahası, daha yüksek s/ç oranı sonucunda çimento esaslı malzemelerde (beton, harç, dolgu, vb.) daha zayıf sıkıştırma (paketleme) etkisi, daha düşük katı içeriği ve daha gözenekli bir yapı oluştuğu ve dolayısıyla dayanım gelişiminde düşüş meydana geldiği bildirilmiştir (Yılmaz vd. 2014, Sun vd. 2022).

Silika tozunun (M-ST ve N-ST) KYH'lerin basınç dayanımı üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, KYH'lerin BD değerleri tüm kürleme süreleri ve s/ç oranlarında karışımlardaki ST (M-ST ve N-ST) dozajlarının artmasıyla artmıştır. Kontrol KYH numunelerinin tüm karışım özelliklerinden bağımsız olarak 35,25-52,84 MPa BD ürettiği belirlenirken, %2-4-7 oranlarında ST içeren KYH'lerin BD değerleri 36,04-59,58 MPa (M-ST) ve 39,12-69,93 MPa (N-ST) arasında değişmiştir. Yani, M-ST ve N-ST içeren KYH numuneleri kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %23,03 ve %42,84'e kadar daha yüksek BD üretmişlerdir (Şekil 3). ST'nin KYH'lerde B-PC'ye kısmen ikame edilmesinin BD gelişimi üzerindeki pozitif etkisi, ST'nin puzolanik karakterinden kaynaklı olarak bağlayıcının hidratasyonunu hızlandırması ve hidratasyon sürecinde oluşan Ca(OH)₂ ile ST bünyesindeki aktif silisleri birleştirerek ilave bağlayıcı fazlar (kalsiyum silika hidrat: C-S-H) üretilmesini sağlamasına atfedilebilir (Schwarz vd. 2008, Benli vd. 2017, Omran vd. 2017, Öz 2017, Hani vd. 2018, Benli 2019, Benli ve Karatas 2019, Türk vd. 2022). Ayrıca, literatürde gözenek doldurma (filler) etkisi olarak bilinen kaba harç partikülleri arasındaki gözenek boşluklarının daha ince ST taneleri ile doldurulması, KYH'lerin ara yüzey geçiş bölgesinin daha yoğun ve kompakt bir mikroyapıya sahip olmasını sağlamış ve böylece KYH'lerin BD gelişimine katkıda bulunmuştur (Çizelge 1) (Benli vd. 2017, Du ve Tan 2017, Öz 2017, Benli

ve Karatas 2019, Etlı vd. 2024). Bu bulgular, farklı beton türlerinin (KYB, KYH, vb.) çeşitli kür yaşlarındaki (1, 3, 7, 28, 90 ve 91 gün) BD'lerinin çimento yerine ST (M-ST ve/veya N-ST) ikame veya ilave edilerek iyileştirildiği önceki birçok araştırmacı (Bernal vd. 2018, Hani vd. 2018, Kara ve Durmuş 2019, Nasr vd. 2019, Garg vd. 2021) tarafından ortaya konan sonuçlarla tutarlı görünmektedir. ST'nin tane boyutunun etkisi incelendiğinde, Şekil 3'te gösterildiği üzere, nano boyutlu ST'nin (N-ST) B-PÇ'ye kısmi ikame (ağırlıkça %2-4-7) olarak kullanılmasının KYH'lerin BD'lerini mikro boyutlu ST'ye (M-ST) kıyasla belirgin bir şekilde iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Şöyle ki, 7N-ST numuneleri s/ç oranından bağımsız olarak 28 ve 56.

günlerde Kontrol numunelerine göre sırasıyla %43 ve %32 daha yüksek BD üretirken, 7M-ST'deki BD artışlarının aynı kürlenme yaşlarında sırasıyla %23 ve %13'te kaldığı tespit edilmiştir (Şekil 3a ve b). Bu çalışmada tespit edilen bulgular, Nili ve Ehsani'nin (2015) çalışmasında ortaya konan sonuçlarla oldukça uyumludur. Araştırmacılar dayanım özelliklerini araştırmak amacıyla ürettikleri beton ve çimento hamuru içerisinde bağlayıcı yerine ağırlıkça mikro (%5 ve 7,5) ve nano (%1,5-3-5-7,5) boyutlu ST kullanmışlar ve çimentonun nano boyutlu ST (ağırlıkça %3-5) ile ikame edilmesinin, mikro boyutlu ST kullanımına kıyasla tüm numunelerin basınç dayanımlarında kayda değer bir artışa neden olduğunu rapor etmişlerdir.



Şekil 3. ST tane boyutu ve dozajının (%2-4-7) 0,50 (a) ve 0,70 (b) s/ç oranında üretilen KYH'lerin BD sonuçlarına etkisi

Çimentoya farklı oranlarda (%5-20 M-ST ve %0,5-1,25 N-ST) M-ST ve N-ST ikame edilerek üretilen harç numunelerinin 3, 7 ve 28 günlük mekanik özelliklerinin incelendiği bir başka çalışmada (Garg vd. 2021), N-ST ikameli harçların 28 güne kadar kontrole numunelerine kıyasla 1,15-1,24 kat daha yüksek dayanım ürettiği, buna karşın harç karışımlarında çok daha fazla miktarda M-ST kullanılmasına rağmen elde edilen dayanım artışının 1,03-1,18 kat ile sınırlı kaldığı bildirilmiştir.

Hem geçmiş araştırmalarda hem de bu çalışmada ortaya konan sonuçlar ışığında, N-ST'nin KYH'lerin basınç dayanımı gelişimine daha fazla etki etmesi; M-ST'ye kıyasla N-ST'nin çok daha ince tane boyutuna sahip olması (Çizelge 1) sayesinde puzolanik reaksiyon gösterme konusunda M-ST'den çok daha üstün olması ve böylece hem bağlayıcının hidrasyonunu hızlandırmasına hem de ilave hidrasyon ürünleri (CH, C-S-H jeli, vb.) üretilmesine katkı sağlamasına atfedilebilir (Du vd. 2014, Li vd. 2014, Nili ve Ehsani 2015, Omran vd. 2017, Öz 2017, Hani vd. 2018, Kara ve Durmuş 2019). Ayrıca, tane boyutu M-ST'den çok daha küçük olan (yüzey alanı= 150,00 m²/g > 23,36 m²/g) N-ST'nin BD artışı konusundaki daha yüksek katkısı; N-ST'nin boşluk (gözenek) doldurma kabiliyeti sonucunda KYH'nin ara yüzey iç bölgesi mikroyapısı, paketlenme yoğunluğu ve homojenliğindeki iyileşmeye

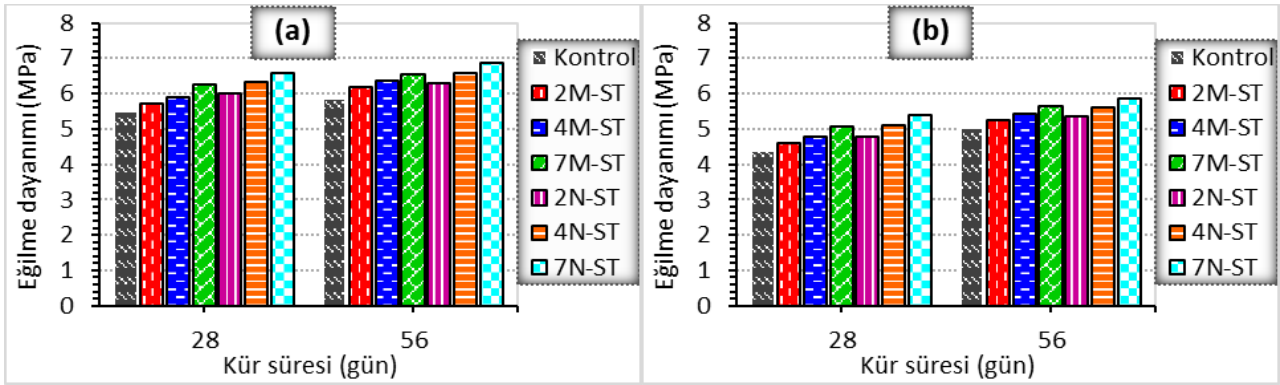
bağlanabilir (Güneyisi vd. 2016, Du ve Tan 2017, Li vd. 2017a, Öz 2017, Garg vd. 2021).

3.3. Eğilme dayanımı sonuçları

ST'nin farklı tane boyutları (M-ST ve N-ST) ve dozajlarda (%2-4-7) B-PÇ yerine ikame edilmesiyle 0,50 ve 0,70 s/ç oranlarında üretilen KYH numunelerinin 28-56 günlük kür süresi boyunca eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4'te sunulmuştur. Tüm karışım özelliklerinden bağımsız olarak bütün KYH numunelerinin eğilme dayanımları kür süresi artışıyla artmıştır. Tüm KYH numunelerinin 28 ve 56 günlük yaştaki eğilme dayanımı değerleri 0,50 ve 0,70 s/ç oranları için sırasıyla 5,50-6,58 ve 5,87-6,85 MPa ve 4,38-5,36 ve 5,03-5,82 MPa aralığında olup, en düşük değer 0,70 s/ç oranındaki 28 günlük Kontrol numunelerinde (4,38 MPa), en yüksek ED değeri ise 0,50 s/ç oranında üretilen 56 günlük 7N-ST (6,85 MPa) numunelerinde ortaya çıkmıştır. Basınç dayanımında meydana gelen değişimlerle uyumlu olarak KYH karışımları içerisindeki ST (M-ST ve N-ST) ikame dozajının artması tüm kür süreleri ve s/ç oranlarında numunelerin ED değerlerini arttırmıştır. Kontrol KYH numunelerinin 0,50 s/ç oranındaki 28 ve 56 günlük ED değerleri sırasıyla 5,50 ve 5,87 MPa iken, B-PÇ %2, %4 ve %7 oranlarında M-ST ile değiştirildiğinde, ED sırasıyla 5,72, 5,90 ve 6,25 MPa (28 gün) ve 6,20, 6,38 ve 6,53 MPa (56 gün) olarak

kaydedilmiştir. Aynı oranlarda N-ST ikameleri için ED değerleri ise 28 günde 6,02, 6,31 ve 6,58 MPa olarak ölçülürken, 56 günlük kür süresi sonunda 6,30, 6,57 ve 6,85 MPa değerlerine ulaşmıştır. 0,70 s/ç oranı ile üretilen numunelerin ED değerleri ise 0,50 s/ç oranındaki numunelere nazaran daha düşük olmakla birlikte, Kontrol numuneleri 28 ve 56 günde sırasıyla 4,38 ve 5,03 MPa seviyesinde ED üretmiştir. Aynı s/ç oranında %2, %4 ve %7 oranlarında M-ST ikameli numunelerin 28 ve 56 günde ölçülen ED değerleri sırasıyla 4,60-5,05 MPa ve 5,25-5,63 MPa aralığında seyretmiştir. Aynı ikame oranlarında N-ST kullanıldığında ise eğilme dayanımları 4,76-5,36 MPa (28 gün) ve 5,35-5,82 MPa aralığında (56 gün) gerçekleşmiştir (Şekil 4). Şekil 4a ve b'den görülebileceği üzere, tane boyutundan bağımsız olarak ST ikame oranının %7'ye kadar artırılması ile tüm s/ç oranlarında hazırlanan KYH numunelerinin ED değerleri Kontrol KYH numunelerine kıyasla %4,0-22,4 aralığında daha yüksek olarak tespit

edilmiştir. Ayrıca, KYH karışımları içerisinde B-PÇ'ye ikame edilen ST'nin oranı %4 ve %7 olduğunda ED gelişimi üzerindeki olumlu katkısı daha belirgin hale gelmiştir. ST bazlı KYH'deki eğilme dayanımı gelişiminin daha üstün olması, çimento hamurunun hidrasyonu sırasında üretilen kalsiyum hidroksit ($\text{Ca(OH)}_2 = \text{C-H}$) ile ST içerisindeki reaktif silikanın puzolanik reaksiyonu sonucunda kimyasal bağ yaparak ilave amorf bağlayıcı fazların (kalsiyum silika hidrat: C-S-H) üretilmesine bağlanabilir. Ayrıca, B-PÇ'ye kıyasla daha ince tane boyutuna yani daha yüksek yüzey alanına sahip olan ST partiküllerinin daha iri boyutlu çimento ve agrega (kum) taneleri arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun ve daha az gözenekli bir mikroyapı oluşturması da ED gelişiminin muhtemel nedenleri arasında gösterilebilir (Omran vd. 2017, Öz 2017, Benli 2019, Benli ve Karatas 2019, Amin vd. 2022, Türk vd. 2022, Fattouh vd. 2023, Saraç vd. 2023).



Şekil 4. ST tane boyutu ve dozajının 0,50 (a) ve 0,70 (b) s/ç oranında üretilen KYH'lerin ED sonuçlarına etkisi

Silika tozu tane boyutunun KYH'lerin eğilme dayanımı performansı üzerindeki etkisi değerlendirilecek olursa, kür süresi, s/ç oranı ve ikame dozajından bağımsız olarak N-ST içeren KYH numunelerinin M-ST'li numunelerden daha yüksek ED ürettiği belirlenmiştir. Örnek vermek gerekirse; 0,50 s/ç oranında üretilen %2-7 M-ST ikameli numuneler 28 ve 56 günlük kür süreleri sonunda sırasıyla 5,72-6,25 MPa ve 6,20-6,53 MPa eğilme dayanımı üretirken, aynı ikame dozajlarına sahip N-ST içeren KYH numunelerinin aynı kür sürelerindeki dayanımlarının 6,02-6,58 MPa ve 6,30-6,85 MPa aralığında olduğu gözlemlenmiştir. 0,50 s/ç oranında hazırlanan mikro (M-ST) ve nano (N-ST) boyutlu ST içeren numunelerin Kontrol numunelerine kıyasla ED sonuçları karşılaştırıldığında, kür süresinden bağımsız olarak sırasıyla 1,04-1,14 kat ve 1,07-1,20 kat daha yüksek eğilme dayanımı değerlerinin elde edildiği görülmüştür (Şekil 4a). Öte yandan 0,70 s/ç oranında imal edilen KYH numunelerinde daha düşük ED değerlerinin ortaya çıkmasıyla birlikte Kontrole kıyasla N-ST ikameli numunelerinin ED'leri M-ST'lilerden daha

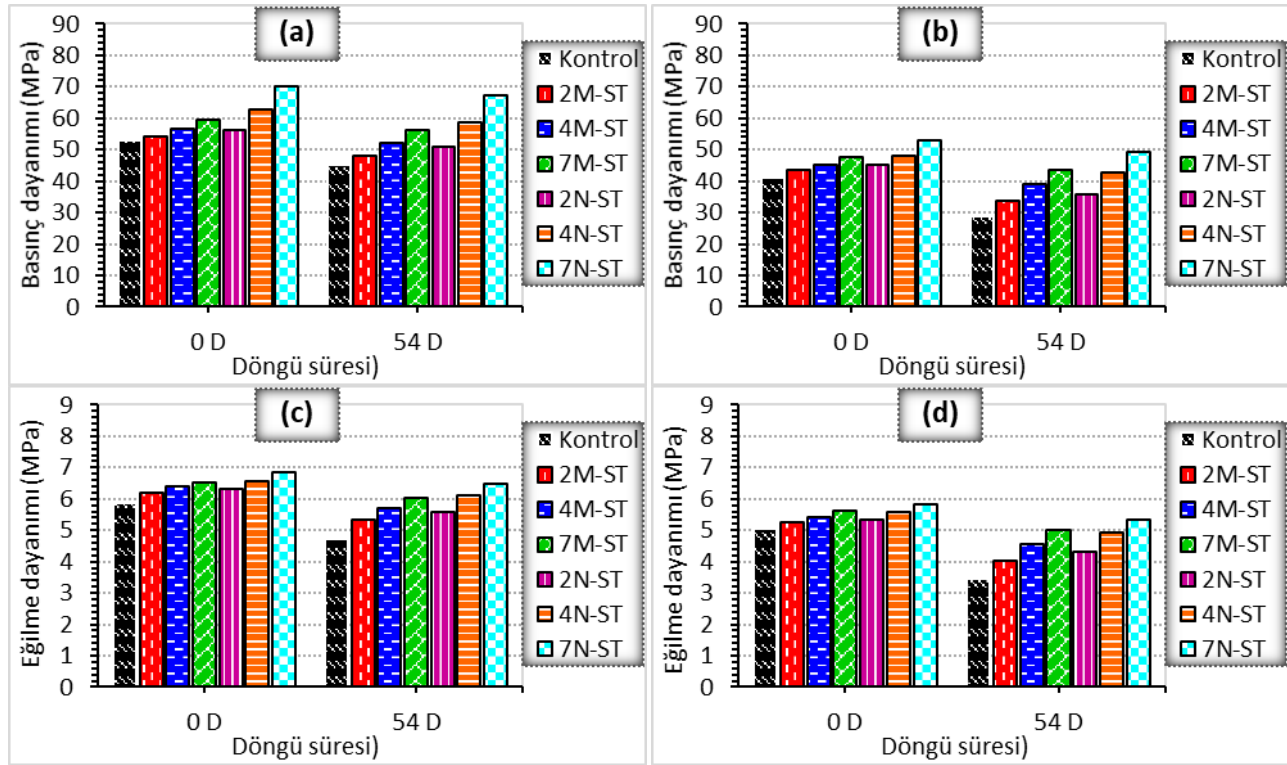
yüksektir (Şekil 4b). N-ST'nin KYH'lerde daha yüksek ED üretilmesini sağlaması, N-ST'nin M-ST'ye nazaran daha yüksek puzolanik etkiye sahip olması ve N-ST içeren KYH karışımlarının daha düşük yayılma çapı ve daha yüksek V-hunisi akma süresi (Şekil 2) sonuçlarıyla uyumlu olarak daha yüksek doldurma kabiliyeti göstermesi ile ilişkilendirilebilir (Kara ve Durmuş 2019, Nandhini ve Ponmalar 2021). Ayrıca, bu olumlu gelişimin sebepleri arasında N-ST içeren harçların daha homojen bağlayıcı yapısına, daha az gözeneğe ve çimento pastası-ince agrega (kum) ara yüzey bölgesinde daha fazla yapışmaya sahip olması gösterilebilir (Kara ve Durmuş 2019, Nandhini ve Ponmalar 2021). Mevcut çalışmayla benzer şekilde, geçmiş araştırmalarda betonlarda çimentonun N-ST ile değiştirilmesinin 7-28-90 günlerde M-ST'ye göre daha yüksek ED değerleri elde edilmesini sağladığı bildirilmiştir (Bhagat ve Gahir 2018, Nandhini ve Ponmalar 2021). Bhagat ve Gahir (2018) bağlayıcı yerine %7-9 oranlarında mikro silika ikame ederek hazırladıkları KYB numunelerinin 7 ve 28 gün sonunda sırasıyla 2,59-2,83

MPa ve 4,30-4,59 MPa eğilme dayanımı ürettiklerini, buna karşın, %1-3 oranlarında nano silika ikameli KYB numunelerinin aynı kür süreleri sonunda 2,84-3,36 MPa ve 4,13-5,06 MPa ED değerleri sağladığını bildirmişlerdir. Bir diğer önemli bulgu; KHY karışımları içerisindeki ST (M-ST ve N-ST) ikame dozajındaki artışın, numunelerin eğilme dayanımını basınç dayanımına kıyasla daha düşük oranda iyileştirmiş olmasıdır. Şöyle ki, KYH içerisinde B-PÇ yerine %2-7 oranında ST ikamesi karışım özellikleri ve kür süresinden bağımsız olarak numunelerin BD değerlerini %42,8'e varan oranlarda arttırırken, ED değerlerindeki iyileşme %22,4 civarında kalmıştır (Şekil 3 ve 4).

3.4. Donma-çözülme Sonuçları

Çimentolu malzemelerin (beton, harç, dolgu, vb.) hizmet ömrünü etkileyen önemli bir faktör olan D-Ç etkisi, malzeme bünyesindeki suyun D-Ç olayları sırasında donması sonucu genişleyen hacmi sebebiyle malzemede

çatlama ve kabuklanmaya yol açabilir. Bundan dolayı, bu malzemelerin donmaya karşı direnç kabiliyetlerinin anlaşılmasında malzemelerin D-Ç testleri sonrası mekanik performansları oldukça önemli bir parametredir (Wang vd. 2020, Jiao vd. 2021, Etlı vd. 2024). Bu bağlamda, Şekil 5, 28 günlük kür süresinin hemen ardından 27 gün (54 döngü) boyunca D-Ç testine tabi tutulan kübik ve prizmatik KYH numunelerinin (Kontrol, M-ST ve N-ST ikameli) 56 günlük BD ve ED sonuçlarını göstermektedir. Tüm KYH numunelerinin 54 döngülük D-Ç testi sonrası mekanik (BD ve ED) performanslarının azaldığı tespit edilmiştir. 56 günlük normal numunelerin mekanik performansları ile karşılaştırıldığında, 54 döngülük D-Ç testine maruz bırakılan farklı s/ç oranlarına sahip KYH numunelerinin (Kontrol, M-ST ve N-ST ikameli) sırasıyla 28,91-45,04 MPa, 33,87-56,30 MPa ve 35,95-67,34 arasında değişen BD'leri ürettiği belirlenmiştir (Şekil 5a ve b).



Şekil 5. ST tane boyutu ve dozajının 0,50 (a) ve 0,70 (b) s/ç oranında üretilen KYH'lerin D-Ç testleri sonrası BD ve ED sonuçlarına etkisi

Aynı numunelerin ED değerlerinin sırasıyla 3,46-5,03 MPa, 4,01-6,04 MPa ve 4,30-6,49 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir (Şekil 5c ve d). Bu sonuçlar ışığında, D-Ç testi uygulanan tüm KYH'lerin BD ve ED'lerinin D-Ç testi uygulanmayan KYH'lere kıyasla 56 gün sonunda azaldığı görülmüştür. Tüm KYH'lerin BD ve ED'lerinde D-Ç testinin neden olduğu düşüşün, s/ç oranının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 5). Öte yandan, KYH karışımlarında B-PÇ yerine ST (M-ST ve N-ST) kullanılması, BD ve ED değerlerinde D-Ç testi kaynaklı meydana gelen kayıpları azaltmıştır. 54 döngülük D-Ç testi sonunda Kontrol KYH

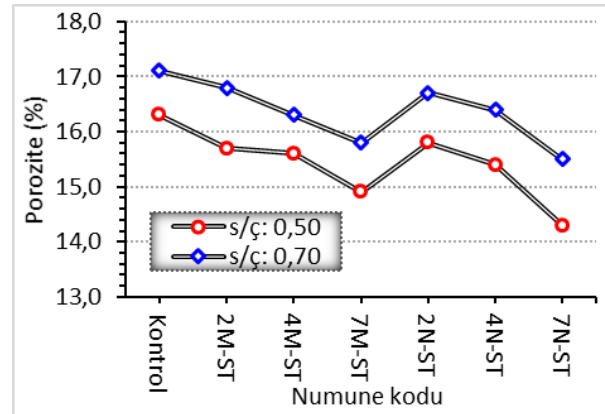
numunelerinin BD değerlerinde %14,8 (0,50 s/ç) ve %29,9 (0,70 s/ç) oranlarında kayıp yaşanırken, aynı s/ç oranları için ED değerlerinde hesaplanan düşüş oranı %19,3 ve %31,2 olarak gerçekleşmiştir. Kontrol KYH'lerin mekanik performanslarında yaşanan nispeten yüksek kayıpların aksine, karışımlarda B-PÇ yerine %2-4-7 oranlarında M-ST ve N-ST ikamesi ile birlikte s/ç oranından bağımsız olarak BD değerlerinde sırasıyla %21,8-5,51 ve %20,7-3,7 oranlarına karşılık gelen daha düşük kayıplar meydana gelmiştir. Benzer bulguların edinildiği ED kayıpları incelendiğinde, M-ST'li numunelerde %14,0-7,5 (0,50) ve

%23,6-11,2 (0,70) oranlarında düşüş belirlenirken, N-ST'li KYH'lerde nispeten daha düşük (0,50: %11,1-5,26 ve 0,70: %19,6-8,1) kayıplar gözlenmiştir (Şekil 5a-d). Bu olumlu etki, puzolanik özelliklere ve daha küçük boyutlu tanelere sahip ST'nin; Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek ilave C-S-H üretebilmesi ve gözenek doldurma (filler) etkisi nedeniyle gözenek sayısını azaltması veya gözenek boyutlarını küçültmesi ile açıklanmaktadır (Gesoglu vd. 2016, Güneyisi vd. 2016, Li vd. 2017a, Omran vd. 2017, Öz 2017, Hani vd. 2018, Garg vd. 2021, Fattouh vd. 2023, Saraç vd. 2023). Böylece, D-Ç döngüleri sırasında, suyun potansiyel donması nedeniyle harca zarar verebilecek suyun harca nüfuz etmesi önlenebilir veya kısıtlanabilir (Zhang ve Li 2013, Almohammad-Albakkar ve Behfarnia 2021). Bu çalışmayla uyumlu olarak, çimentonun ST ile değiştirilmesinin harcin D-Ç testi sonrası BD performansları üzerindeki etkisini araştıran Mardani-Aghabaglou vd. (2014), 300 döngü D-Ç testinden sonra kontrole (%26) kıyasla ST içeren harçta daha düşük BD kaybı (%7,0) olduğunu bildirmiştir. Dahası, KYH karışımlarında B-PÇ yerine kullanılan N-ST ikamesinin D-Ç kaynaklı mekanik performans sorunlarına karşı en faydalı etkiyi sağladığı gerçeğiyle özellikle 7N-ST'nin KYH'lerde meydana gelen BD (%3,7-7,0) ve ED kayıplarını (%5,3-8,1) büyük ölçüde sınırladığı açıktır.

3.5. Porozite Sonuçları

KYH karışımlarında B-PÇ yerine %2, %4 ve %7 oranında ikame edilen M-ST ve N-ST'nin iki farklı s/ç oranında (0,50 ve 0,70) hazırlanan 28 günlük KYH numunelerinin P değişimleri üzerindeki etkisi Şekil 6'da sunulmuştur. 28 günlük KYH'lerin 0,50 ve 0,70 s/ç oranlarında sırasıyla %14,3-16,3 ve %15,5-17,1 aralığında P-değerleri ürettiği belirlenmiştir. KYH karışımlarında ikame olarak kullanılan silika tozu (M-ST ve N-ST) miktarındaki artışın KYH'lerin P-değerlerinde azalma sağladığı Şekil 6'dan açıkça anlaşılmaktadır. Kontrol ile karşılaştırıldığında, tane boyutundan bağımsız olarak ST ikamesinin KYH'lerin P-değerlerini 0,50 ve 0,70 s/ç oranları için sırasıyla %16,3'ten %15,8-14,3'e ve %17,1'den %16,8-15,5'e düşürdüğü ve bunların %3,1-12,3 ve %1,8-9,4'lük düşüş oranlarına karşılık geldiği görülmüştür. Porozite değerlerindeki bu düşüşler %7 oranında M-ST ve N-ST ikameli KYH numunelerinde nispeten daha belirgin olarak gerçekleşmiştir (Şekil 6). ST ikameli KYH'lerin porozitelerinde meydana gelen iyileşme, B-PÇ'ye nazaran daha ince boyutlu (daha yüksek yüzey alanı) (Çizelge 1) ST tanelerinin çimento pastası-ince agrega arasındaki boşlukları doldurması (filler etkisi) ve puzolanik özelliği bulunan ST'nin hidrasyon hızını arttırması/ilave hidrasyon ürünleri oluşumuna katkı sağlaması ve böylece daha yoğun (düşük boşluklu) ve kompakt bir mikroyapı ortaya çıkması ile bağlantılandırılabilir (Du vd.

2014, Güneyisi vd. 2016, Benli vd. 2017, Li vd. 2017a, Hani vd. 2018, Garg vd. 2021).



Şekil 6. ST tane boyutu ve dozajının KYH'lerin P sonuçlarına etkisi

ST tane boyutunun KYH'lerin porozite gelişimine olan etkisi ele alındığında, Şekil 6'dan açıkça fark edileceği üzere, genel olarak N-ST ikamesi M-ST'ye kıyasla KYH numunelerinin porozite değerlerinin azalmasına daha fazla katkı sağlamıştır. Porozitedeki iyileşme özellikle daha düşük s/ç oranında (0,50) ikame oranının %7'ye artırılması ile daha belirgin hale gelmiştir. Şöyle ki, 0,50 s/ç oranında hazırlanan KYH karışımlarında %7 N-ST ikamesi kullanıldığında kontrole göre porozitede sağlanan azalma %12,3 iken, M-ST ikame edildiğinde porozitede %8,6 azalma sağlanmıştır (Şekil 6). N-ST'nin çok daha yüksek yüzey alanı nedeniyle daha yüksek puzolanik özelliği ve gözenek doldurma kabiliyeti, 7N-ST'de neden oldukça düşük gözenekliliğe sahip daha yoğun bir mikroyapı ve dolayısıyla diğer KYH'lerden nispeten daha yüksek mekanik performans gözlemlendiğini açıklamaktadır (Du vd. 2014, Nili ve Ehsani 2015, Gesoglu vd. 2016, Güneyisi vd. 2016, Li vd. 2017a, Omran vd. 2017, Öz 2017, Hani vd. 2018, Kara ve Durmuş 2019, Garg vd. 2021, Fattouh vd. 2023, Saraç vd. 2023).

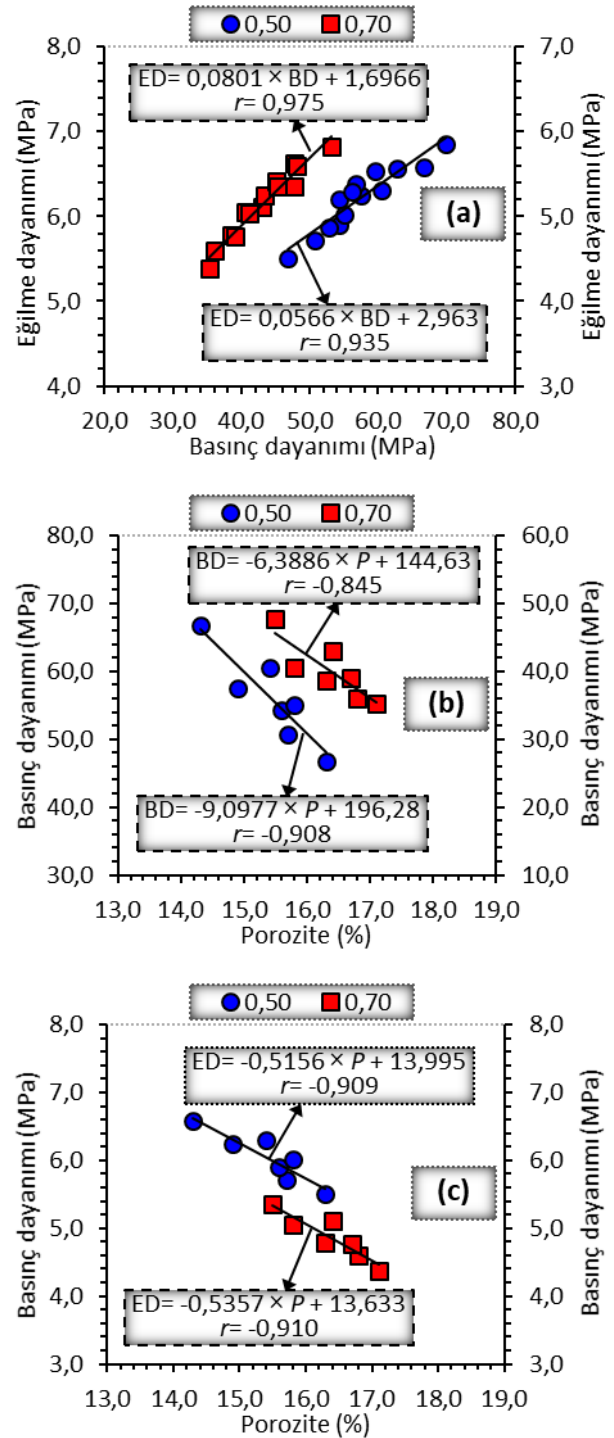
3.6. İstatistiksel analiz sonuçları

KYH numuneleri üzerinde gerçekleştirilen testlerden edinilen bulguların birbirleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek için hazırlanan ED-BD, P-BD ve P-ED grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. Ayrıca, ED-BD, P-BD ve P-ED ilişkilerinin incelendiği grafiklerin (Şekil 7a-c) korelasyon katsayıları (r) ve eşitlikleri Çizelge 3'te özetlenmiştir. Bulgular (ED-BD, P-BD ve P-ED) arasındaki ilişkiyi doğrusal (lineer) ilişki metodunun oldukça iyi bir şekilde yansıttığı grafikler incelendiğinde, s/ç oranından bağımsız olarak ED-BD arasında pozitif yönlü oldukça güçlü bir korelasyon ($r=0,935$; 0,50 s/ç ve $r=0,975$; 0,70 s/ç) olduğu belirlenmiştir (Şekil 7a). Bir başka deyişle, KYH numunelerinin tüm karışım özelliklerinde ve kür sürelerinde basınç dayanımı arttıkça eğilme dayanımları artmıştır. Bu çalışmada elde edilen istatistiksel bulgularla

uyumlu olarak, ultra yüksek performanslı beton numunelerinin BD-ED arasındaki ilişkiyi araştıran Amin vd. (2022) iki dayanım parametresi arasında oldukça güçlü ($R^2 = 0,966$) doğrusal bir korelasyon olduğunu bildirmiştir. Başka bir çalışmada, ayrı ayrı ham ve genleştirilmiş vermikülit içeren KYH numunelerinin BD ve ED sonuçları arasında sırasıyla 0,82 ve 0,78 korelasyon katsayılarına sahip güçlü ilişkiler tespit edilmiştir (Benli vd. 2020). Buna karşın, P 'nin BD (Şekil 7b) ve ED (Şekil 7c) ile olan ilişkisinin oldukça yüksek korelasyon katsayılarına sahip negatif yönlü olduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum, numunelerin porozite değerlerinin azalmasıyla paralel olarak BD ve ED değerlerinin arttığını göstermektedir. P -BD ilişkisine ait korelasyon katsayıları (r) sırasıyla -0,908 ($s/\zeta = 0,50$) ve -0,845 ($s/\zeta = 0,70$) olarak belirlenirken, P -ED arasındaki r -değerleri 0,50 ve 0,70 s/ζ oranları için sırasıyla -0,909 ve 0,910 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 3). P -BD ve P -ED arasındaki ilişkilere ait korelasyon katsayılarının eksi (-) çıkmasının sadece veriler arasındaki ilişkilerin yönünü (negatif) ifade ettiği bilinmelidir.

Şekil 7a-c ve Çizelge 3'te sunulduğu üzere, KYH numuneleri üzerinde uygulanan BD, ED ve P -testleri sonucunda ED-BD, P -BD ve P -ED ilişki modellerine ait korelasyon katsayılarının (r) oldukça yüksek çıkması bulgular arasındaki ilişki düzeyinin güvenilirliğini (önemli/uyumlu olup olmadığını) tam olarak yansıtmayabilir. Bundan dolayı, ED-BD, P -BD ve P -ED verileri arasındaki ilişkilere ait r -değerlerinin ve eşitliklerin/denklemelerin ($y = ax \pm b$) anlamlı (önemli) olup olmadığını tespit etmek için Microsoft Excel programı kullanılarak regresyon analizleri (t - ve F -testi) uygulanmıştır. Analiz sonuçları Çizelge 3'te açıklanmıştır.

%95 güven aralığında ($\alpha < 0,05$) hipotezler kurularak ($H_0 =$ Korelasyon anlamsızdır, $H_1 =$ Korelasyon anlamlıdır) gerçekleştirilen t -testleri sonrası bulunan t_{Hesap} değerleri incelendiğinde s/ζ oranından bağımsız 13 serbestlik derecesine sahip BD-ED değerleri arasındaki ilişkinin t_{Hesap} değerleri 9,104 ve 15,098 olarak bulunmuştur. Bu değerler t_{Tablo} ($\pm 1,77$) değerinden büyük olduğu için H_1 hipotezi (korelasyon anlamlıdır) kabul edilir.



Şekil 7. Bulgulara (ED-BD; a, P -BD; b ve P -ED; c) ait ilişki modelleri

Çizelge 3. t - ve F -testi sonuçları

Eşitlik No	Korelasyon Katsayısı (r)	Serbestlik Derecesi (S_d)	t_{Hesap}	t_{Tablo}	F_{Hesap}	F_{Tablo}
BD-ED (0,50)	0,935	13	9,104	$\pm 1,77$	82,888	2,58
BD-ED (0,70)	0,975		15,098		227,961	
P -BD (0,50)	(-)0,845	6	(-)4,849	$\pm 1,94$	23,514	4,28
P -BD (0,70)	(-)0,908		(-)3,528		12,445	
P -ED (0,50)	(-)0,909		(-)4,863		23,652	
P -ED (0,70)	(-)0,910		(-)4,916		24,166	

Porozitenin mekanik performanslarla olan ilişkilerine (P -BD ve P -ED) ait t -testlerinin sonuçlarına bakıldığında ise, hesaplanan t -değerleri S_d ve güven aralığına (%95) bağlı olarak tablodan belirlenen değerden ($S_d=6$ için $t_{Tablo}=\pm 1,94$) daha büyük olduğu için tüm karışım özelliklerinde elde edilen P -BD ve P -ED bulguları arasındaki ilişkilerin korelasyonları anlamlı/uyumlu çıkmıştır. Ayrıca, bazı t_{Hesap} değerlerinin eksi (-) çıkması ilişkinin negatif yönlü olduğunun göstergesidir (Çizelge 3). Şekil 7a-c'de gösterilen eşitliklerin anlamlı olup olmadığını belirlemek için %95 güven aralığında hipotezler (H_0 = Eşitlik anlamsızdır, H_1 = Eşitlik anlamlıdır) kurulmuştur. Ardından yapılan F -testi sonuçları değerlendirildiğinde, BD-ED bulgularına ait F_{Hesap} değerleri 82,888 ve 227,961 olarak belirlenirken, P -BD ve P -ED bulgularına ait eşitliklerin 12-445-24,166 arasında değişen F_{Hesap} değerlerine sahip olduğu ortaya konmuştur (Çizelge 3). Tüm ilişki grafiklerine ait eşitliklerin F_{Hesap} ve F_{Tablo} değerleri Çizelge 3'ten karşılaştırıldığında, daha büyük F_{Hesap} değerleri ($F_{Hesap}>F_{Tablo}$) elde edildiği için eşitliklerin güvenilir/anlamlı olduğu ortaya çıkmıştır.

4. Sonuçlar

Bu deneysel çalışmada, B-PÇ'ye kısmi ikame olarak M-ST ve N-ST'nin ağırlıkça %2-4-7 oranlarında kullanımının 0,50 ve 0,70 s/ç oranlarına sahip KYH'lerin işlenebilirlik (YÇ ve V-H), mekanik (BD ve ED), durabilite (D-Ç) ve porozite (P) özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, elde edilen bulguların birbiri ile olan ilişkileri (ED-BD, P -BD ve P -ED) istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen bulgulara dayanarak, bazı dikkate değer sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- © Tüm karışım özelliklerinde M-ST ve N-ST'nin KYH karışımları içerisinde %2-7 oranlarında ikame edilmesi karışımlarının işlenebilirlik performanslarını nispeten azalttığı sonuçlarıyla birlikte tüm KYH karışımlarının YÇ ve V-H değerlerinin EFNARC (2005) tarafından belirlenen alt-üst sınır değerler içerisinde kaldığı tespit edilmiştir.
- © M-ST ikameli numuneler, tüm s/ç oranları, ST ikame dozajları ve kür sürelerinde, kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %2,2-23,0 ve %4,0-15,3 arasında değişen oranlarda daha yüksek basınç ve eğilme dayanımı üretirken, aynı koşullardaki N-ST ikameli KYH'lerin BD ve ED performanslarında sırasıyla %42,8 ve %22,4'e kadar artış kaydedilmiştir. Ayrıca, N-ST'nin M-ST ve B-PÇ'ye nazaran çok daha fazla ince boyutlu tane içermesi ve böylece daha yüksek yüzey alanına sahip olmasından dolayı oldukça yüksek puzolanik karakter ve gözenek doldurma kabiliyeti sergilemesi

mekanik özelliklerdeki (BD ve ED) gelişim konusunda N-ST'li numunelere (özellikle 7N-ST) belirgin bir üstünlük sağlamıştır.

- © Kontrol KYH'lerin basınç ve eğilme dayanımlarında 54 döngülük D-Ç testi kaynaklı olarak sırasıyla %29,9 ve %31,2 oranlarında dayanım kaybı meydana gelirken, KYH karışımlarında B-PÇ yerine ikame edilen ST oranının (%2'den %7'ye) artırılması D-Ç testinin sebep olduğu dayanım kayıplarını ST tane boyutu ve s/ç oranından bağımsız olarak %3,7 (BD) ve %5,3'e (ED) kadar sınırlandırmıştır. Donma-çözülme kaynaklı basınç ve eğilme dayanımındaki kayıplara karşı reaksiyon gösterme konusunda 7N-ST'nin diğer KYH karışımlarından belirgin bir biçimde ayrıştığı gözlemlenmiştir.
- © 28 günlük KYH numuneleri üzerinde gerçekleştirilen porozite testi bulguları, karışım içerisinde ST ikamesinin numunelerin P -değerlerini kontrol numunelerine göre azalttığı (0,5 ve 0,7 s/ç için sırasıyla %14,3-15,8<%16,3 ve %15,5-16,8<%17,1), P -değerlerinde tespit edilen düşüş miktarlarında ise M-ST'ye nazaran puzolanik özelliği ve boşluk doldurma kabiliyetinin belirgin biçimde yüksek olması neticesinde N-ST ikameli numunelerin M-ST'li numunelere kıyasla daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir.
- © ED-BD, P -BD ve P -ED verileri arasındaki ilişki modellerinin istatistiksel analiz sonuçları s/ç oranından bağımsız olarak bulgular arasında oldukça yüksek korelasyon (r) katsayılarına sahip doğrusal bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, ilişki modellerine ait korelasyon katsayıları ve eşitliklerin anlamlı/güvenilir/uyumlu olup olmadıklarının tespiti için gerçekleştirilen t - ve F -testleri sonucunda KYH'lere ait tüm r -değerleri ve eşitliklerin güvenilir ilişki düzeylerine sahip olduğu anlaşılmıştır.

Etik Standartlar Bildirgesi/ Declaration of Ethical Standards

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı/Credit Authorship Contribution Statement

Yazar 1: Araştırma, Deneysel tasarım, Yazma-örjinal taslak, Analiz ve yorumlama, İnceleme ve düzenleme, Görselleştirme, Kaynaklar.

Çıkar Çatışması Beyanı/Declaration of Competing Interest

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği/Data Availability

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

5. Kaynaklar/References

- Açıkgöç, M., Karataş, M. ve Ulucan, Z.Ç., 2013. Elazığ yöresine ait atık tuğla ve kireç taşı tozunun kendiliğinden yerleşen harcın mühendislik özelliklerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **19(6)**, 249-255. <https://doi.org/10.5505/pajes.2013.24633>
- Almohammad-Albakkar, M. and Behfarnia, K., 2021. Effects of the combined usage of micro and nano-silica on the drying shrinkage and compressive strength of the self-compacting concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, **10(2)**, 92-110. <https://doi.org/10.1080/21650373.2020.1755382>
- Al-Oran, A.A.A., Safiee, N.A. and Nasir, N.A.M., 2022. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete using metakaolin and GGBS as cement replacement. *Journal of Environmental and Civil Engineering*, **26**, 379-392. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1663268>
- Altuncı, Y.T. ve Öcal, C., 2022. Yer fıstığı kabuğu külünün SIFCON'un bazı mühendislik özelliklerine etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, **10(3)**, 869-877. <https://doi.org/10.21923/jesd.888538>
- Amin, M., Zeyad, A.M., Tayeh, B.A. and Agwa, I.S., 2022. Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, **320**, 126233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126233>
- ASTM C109-16, 2016. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM C305-20, 2020. Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM C348-21, 2021. Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM C642-13, 2022. Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- ASTM C666M, 2015. Standard test method for resistance of concrete to rapid freezing and thawing. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA.
- Benli, A., Karataş, M. and Bakir, Y., 2017. An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume. *Construction and Building Materials*, **144**, 552-562. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.228>
- Benli, A., 2019. Mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing binary and ternary mixes of fly ash and silica fume. *Structural Concrete*, **20(3)**, 1096-1108. <https://doi.org/10.1002/suco.201800302>
- Benli, A. ve Karataş, M., 2019. Uçucu kül ve silis dumanı ikameli üçlü karışımlardan üretilen kendiliğinden yerleşen harçların durabilite ve dayanım özellikleri. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, **10(1)**, 335-345. <https://doi.org/10.24012/dumf.474074>
- Benli, A., Karatas, M. and Toprak, H.A., 2020. Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, **239**, 117895. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117895>
- Bernal, J., Reyes, E., Massana, J., León, N. and Sánchez, E., 2018. Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures. *Construction and Building Materials*, **160**, 196-210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.048>
- Bhagat, N.K. and Gahir, J.S., 2018. Effect of micro-silica and nano-silica on mechanical properties of concrete. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, **9**, 1-7.
- Çakır, Ö. And Aköz, F., 2008. Effect of curing conditions on the mortars with and without GGBFS. *Construction and Building Materials*, **22(3)**, 308-314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.08.013>
- Du, H., Du, S. and Liu, X., 2014. Durability performances of concrete with nano-silica. *Construction and Building Materials*, **73**, 705-712. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014>
- Du, H. and Tan, K.H., 2017. Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, **75**, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>
- EFNARC, 2005. Specification and guidelines for self-compacting concrete. The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC).
- Etlı, S., Yılmaz, T. and Hansu, O., 2024. Effect of White-Portland cement containing micro and nano silica on the mechanical and freeze-thaw properties of self compacting mortars. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, **50**, 101614. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101614>

- Faheem, A., Rizwan, S.A., Bier, T.A., 2021. Properties of self-compacting mortars using blends of limestone powder, fly ash, and zeolite powder. *Construction and Building Materials*, **286**, 122788. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122788>
- Fattouh, M.S., Tayeh, B.A., Agwa, I.S. and Elsayed, E.K., 2023. Improvement in the flexural behaviour of road pavement slab concrete containing steel fibre and silica fume. *Case Studies in Construction Materials*, **18**, e01720. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01720>
- Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A. and Uyulgan, B., 2006. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and Concrete Research*, **36(9)**, 1719-1726. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>
- Galaa, A.M., Thompson, B.D., Grabinsky, M.W. and Bawden, W.F., 2011. Characterizing stiffness development in hydrating mine backfill using ultrasonic wave measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, **48(8)**, 1174-1187. <https://doi.org/10.1139/t11-026>
- Garg, R., Garg, R., Bansal, M. and Aggarwal, Y., 2021. Experimental study on strength and microstructure of mortar in presence of micro and nano-silica. *Materials Today: Proceedings*, **43**, 769-777. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.167>
- Garg, R., Garg, R., Eddy, N.O., Khan, M.A., Khan, A.H., Alomayri, T. and Berwal, P., 2023. Mechanical strength and durability analysis of mortars prepared with fly ash and nano-metakaolin. *Case Studies in Construction Materials*, **18**, e01796. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01796>
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Asaad, D.S. and Muhyaddin, G.F., 2016. Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica. *Construction and Building Materials*, **102**, 706-713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.020>
- Gupta, N., Siddique, R. and Belarbi, R., 2021. Sustainable and greener self-compacting concrete incorporating industrial by-products: a review. *Journal of Cleaner Production*, **284**, 124803. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124803>
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and Özbay, E., 2009. Effects of marble powder and slag on the properties of self compacting mortars. *Materials and Structures*, **42(6)**, 813-826. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9426-2>
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., Al-Goody, A. and İpek, S., 2015. Fresh and rheological behavior of nano-silica and fly ash blended self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, **95**, 29-44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.142>
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O.A. and Öz, H.Ö., 2016. Effect of nano silica on the workability of self-compacting concretes having untreated and surface treated lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, **115**, 371-380. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.055>
- Hani, N., Nawawy, O., Ragab, K.S. and Kohail, M., 2018. The effect of different water/binder ratio and nano-silica dosage on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, **165**, 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.045>
- Jiao, Z., Li, X. and Yu, Q., 2021. Effect of curing conditions on freeze-thaw resistance of geopolymer mortars containing various calcium resources. *Construction and Building Materials*, **313**, 125507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125507>
- Kara, İ.B. and Durmuş, Ö.F., 2019. Effect of nano silica on cement mortars containing micro silica. *Concrete Research Letters*, **10(2)**, 42-49. <https://doi.org/10.20528/cjcr.l.2019.02.003>
- Karataş, M., Benli, A. and Ergin, A., 2017. Influence of ground pumice powder on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, **150**, 467-479. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.220>
- Karatas, M., Benli, A. and Arslan, F., 2020. The effects of kaolin and calcined kaolin on the durability and mechanical properties of self-compacting mortars subjected to high temperatures. *Construction and Building Materials*, **265**, 120300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120300>
- Koksal, F., Yıldırım, M.S., Benli, A. and Gencil, O., 2021. Hybrid effect of micro-steel and basalt fibers on physico-mechanical properties and durability of mortars with silica fume. *Case Studies in Construction Materials*, **15**, e00649. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00649>
- Li, H., Xiao, H.G., Yuan, J. and Ou, J., 2004. Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, **35(2)**, 185-189. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0)
- Li, L.G., Huang, Z.H., Zhu, J., Kwan, A.K.H. and Chen, H.Y., 2017a. Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. *Construction and Building Materials*, **140**, 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.115>
- Li, L.G., Zhu, J., Huang, Z.H., Kwan, A.K.H. and Li, L.J., 2017b. Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar. *Construction and Building Materials*, **157**, 337-347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.105>

- Mohseni, E., Miyandehi, B.M., Yang, J. and Yazdi, M.A., 2015. Single and combined effects of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-TiO₂ on the mechanical, rheological and durability properties of self-compacting mortar containing fly ash. *Construction and Building Materials*, **84**, 331-340.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.006>
- Nandhini, K. and Ponmalar, V., 2021. Effect of blending micro and nano silica on the mechanical and durability properties of self-compacting concrete. *Silicon*, **13(3)**, 687-695.
<https://doi.org/10.1007/s12633-020-00475-5>
- Naniz, O.A. and Mazloom, M., 2018. Effects of colloidal nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete. *Journal of Building Engineering*, **20**, 400-410.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.08.014>
- Nasr, D., Behforouz, B., Borujeni, P.R., Borujeni, S.A. and Zehtab, B., 2019. Effect of nano-silica on mechanical properties and durability of self-compacting mortar containing natural zeolite: Experimental investigations and artificial neural network modeling. *Construction and Building Materials*, **229**, 116888.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116888>
- Nili, M. and Ehsani, A., 2015. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume. *Materials & Design*, **75**, 174-183.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.03.024>
- Omran, A.F., Etienne, D., Harbec, D. and Tagnit-Hamou, A., 2017. Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. *Construction and Building Materials*, **135**, 43-58.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.218>
- Öz, H.Ö., 2017. Atık cam tozu ve yüksek fırın cürufunun içeren kendiliğinden yerleşen harçların taze, mekanik ve durabilite özellikleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **20(4)**, 9-22.
<https://doi.org/10.17780/ksujes.356752>
- Quercia, G., Spiesz, P., Hüsken, G. and Brouwers, H.J.H., 2014. SCC modification by use of amorphous nano-silica. *Cement and Concrete Composites*, **45**, 69-81.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.001>
- Saraç, S., Karatas, M. and Benli, A., 2023. The effect of dunite powder and silica fume on the viscosity, physico-mechanical properties and sulphate resistance of self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, **375**, 130970.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130970>
- Schwarz, N., Cam, H. and Neithalath, N., 2008. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. *Cement and Concrete composites*, **30(6)**, 486-496.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001>
- Seifan, M., Mendoza, S. and Berenjian, A., 2020. Mechanical properties and durability performance of fly ash based mortar containing nano-and micro-silica additives. *Construction and Building Materials*, **252**, 119121.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119121>
- Senff, L., Hotza, D., Repette, W.L., Ferreira, V.M. and Labrincha, J.A., 2010. Effect of nanosilica and microsilica on microstructure and hardened properties of cement pastes and mortars. *Advances in Applied Ceramics*, **109(2)**, 104-110.
<https://doi.org/10.1179/174367509X12502621261659>
- Sun, M., Bennett, T. and Visintin, P., 2022. Plastic and early-age shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): Experimental study of the effect of water to binder ratios, silica fume dosages under controlled curing conditions. *Case Studies in Construction Materials*, **16**, e00948.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00948>
- Şahmaran, M., Christianto, H.A. and Yaman, İ.Ö., 2006. The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars. *Cement and concrete composites*, **28(5)**, 432-440.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.003>
- Türk, E., Karataş, M. and Dener, M., 2022. Rheological, mechanical and durability properties of self-compacting mortars containing basalt powder and silica fume. *Construction and Building Materials*, **356**, 129229.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129229>
- Tüysüz, N. ve Yaylalı-Abanuz, G., 2012. Jeostatistik; Kavramlar ve Bilgisayarlı Uygulamalar, KTÜ Matbaası, 382 s.
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B., Şimşek, B. ve Çınar, E., 2018. Kendiliğinden yerleşen harçların elektriksel öz direnci üzerine mineral katkıların etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **22(2)**, 986-992.
<https://doi.org/10.19113/sdufbed.46877>
- Uygunoğlu, T., Güneş, İ., Ersoy, B. ve Evcin, A., 2017. Kendiliğinden yerleşen polimerik harçlarda mineral katkının reolojik özelliklere etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, **32(4)**, 1365-1378.
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.369858>
- Wang, W., Wang, S., Yao, D., Wang, X., Yu, X. and Zhang, Y., 2020. Fabrication of all-dimensional superhydrophobic mortar with enhanced waterproof ability and freeze-thaw resistance. *Construction and Building Materials*, **238**, 117626.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117626>

Zhang, P. and Li, Q.F., 2013. Effect of silica fume on durability of concrete composites containing fly ash. *Science and Engineering of Composite Materials*, **20(1)**, 57-65.
<https://doi.org/10.1515/secm-2012-0081>