



Melek Akgül

Munzur University, melekakgul@munzur.edu.tr, Tunceli-Türkiye

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2025.20.4.1A0498
ORCID ID	0000-0001-8815-3762
Corresponding Author	Melek Akgül

YAPAY HAFİF AGREGA İLE MODİFİYE EDİLMİŞ, Na₂SO₄ VE NaCl ETKİSİNDEKİ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARDA BASINÇ VE EĞİLME DAYANIMINA NANO SİLİKA KULLANIMININ ETKİSİ

ÖZ

Harç ve türevlerinin üretiminde agregaya ikame ürün arayışında yapay hafif agregaya önemli bir alternatififtir. Ayrıca çimento miktarını azaltmak için ikame ürün arayışında nano silika kullanımı son yılların önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmada agregaya %0, 5, 10 ve 15 oranında yapay hafif agregaya ve çimentoya %1, 2, 3, 4 oranında nano silika ikame edilmiştir. Üretilen numuneler 3 gruba ayrılmış ve 28 gün süresince 1. grup standart su küründe 2. grup 100 ml/L Na₂SO₄ derişimli çözeltide, 3. grup ise %4 NaCl derişimli çözeltide bekletilmiştir. 28 günün sonunda tüm grupların eğilme ve basınç dayanımı verileri kıyaslanmıştır. Artan nano silika miktarı %3 mertebesine kadar porozite, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı üzerinde pozitif etkiye sahiptir. Artan yapay hafif agregaya miktarı ise %10 mertebesine kadar kabul edilebilir eğilme ve basınç dayanımı değerleri sunmaktadır. Bu hali ile çalışma yapay hafif agregaya kullanımına bağlı basınç ve eğilme dayanımı kayıplarında iyileştirici nano silika oranlarının tespiti anlamında veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden Yerleşen Harç, Nano Silika, Yapay Hafif Agregaya, Basınç Dayanımı, Eğilme Dayanımı

THE EFFECT OF NANO SILICA USE ON COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH IN SELF-COMPACTING MORTARS MODIFIED WITH ARTIFICIAL LIGHT AGGREGATE UNDER THE INFLUENCE OF Na₂SO₄ AND NaCl

ABSTRACT

Artificial lightweight aggregate is an important alternative in the search for substitute products for aggregate in the production of mortar and its derivatives. Furthermore, the use of nano silica in the search for substitute products to reduce the amount of cement has been an important research topic in recent years. In this study, 0, 5, 10 and 15% of the aggregate was replaced with artificial lightweight aggregate, and 1, 2, 3, and 4% of the cement was replaced with nano silica. The produced samples were divided into 3 groups and kept for 28 days: group 1 in standard water curing, group 2 in a solution with a concentration of 100 ml/L Na₂SO₄, and group 3 in a solution with a concentration of 4% NaCl. At the end of 28 days, the flexural and compressive strength data of all groups were compared. Increasing nano silica content up to 3% has a positive effect on porosity, compressive strength, and flexural strength. Increasing the amount of artificial lightweight aggregate up to 10% provides acceptable flexural and compressive strength values. In this context, the study provides data for determining the optimal nano silica ratio to mitigate compressive and flexural strength losses associated with the use of artificial lightweight aggregate.

Keywords: Self-compacting Mortar, Nano Silica, Artificial Lightweight Aggregate, Compressive Strength, Flexural Strength

How to Cite:

Akgül, M., (2025). Yapay hafif agregaya ile modifiye edilmiş, Na₂SO₄ ve NaCl etkisindeki kendiliğinden yerleşen harçlarda basınç ve eğilme dayanımına nano silika kullanımının etkisi. Engineering Sciences, 20(4):84-95, DOI: 10.12739/NWSA.2025.20.4.1A0498.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Servis ömrünü tamamlamış birçok yapının yerine yenilerinin yapılması, inşaat sektörüne ve sektörünün temel bileşenlerine olan ihtiyacının da her geçen yıl olan artması anlamına gelmektedir [1]. İnşaat sektörünün en temel bileşenleri beton ve harç türevlerinden oluşmaktadır. Bu sebeple doğal kaynaklardan sağlanan agrega ihtiyacı ve sera gazı salınımına sebep olduğu bilinen çimento üretimi, çevreci yaklaşımlar ile sınırlandırılmaya çalışılmaktadır [2]. Sektörün çevreci süreçler ile yönetilmediği anlayışının temel sebebi; doğal kaynakların büyük oranda tüketilmesi ve yapıların servis ömrü sonrası bertarafı ve depolaması zor olan büyük hacimli inşaat yıkıntı atığına evrilmesidir [3]. Hızlı kentleşme ve artan nüfustan kaynaklandığı kabul edilen çok sayıda atık türü vardır ve bu atıkların yönetiminde tüm paydaşlara önemli roller yüklenmiştir. İnşaat yıkıntı atıkları bu atık türleri içinde büyük bir orana sahiptir [4]. Atıkların miktarı, bertarafı ve sürdürülebilir yaklaşımlar ile geridönüşümü; nüfus, kentleşme, gayri safi yurtiçi hasıla ve atık yönetimi politikaları ile şekillenmektedir [5]. Bu sebeple ülkeler ve yönetimler sürdürülebilir olmayan süreçleri sınırlandıran örnek yasal düzenlemeler uygulamaktadır [3 ve 6].

Sanayi yan ürünü ve inşaat yıkıntı atıklarının sektörde geridönüşüm süreçleri sonrası verimli şekilde kullanımı büyük önem arz etmektedir. Doğal kaynaklardan sağlanan agrega ihtiyacı kaynakların sınırlı olması ve sürdürülebilir olmaması sebebiyle yeni arayışları da beraberinde getirmiştir [7 ve 8]. Agregaya ikame ürünlerden bir tanesi de Yapay Hafif Agregası (YHA)'dır. YHA ile üretilen yapısal elamanların basınç dayanımındaki kayıplar çimento ile ikame ürün arayışı ya da çimento miktarındaki artışını gerekli kılmaktadır. Bu sebeple iyileştirme çalışmaları çerçevesinde mineral katkıların çeşitliliği ve oranı üzerinde çalışmalar optimum fayda ve kullanıma dayalı veriler sunmaktadır [9].

Geçtiğimiz on yılda, 1-100nm ölçeğindeki nanopartiküller diğer alanlarda olduğu gibi harç ve beton elemanların üretiminde birçok iyileştirici özelliğinden dolayı tercih edilmektedir [10]. Bu nanopartiküller arasında, nanosilika (NS) genellikle geçirimsizliği, modülü ve durabiliteyi iyileştirmek ve polimeri güçlendirmek amacıyla kullanılmaktadır [11 ve 12]. Çimento ile ikame bir ürün olarak NS, özellikle su geçirgenlik direncini iyileştirici ve dayanıklılığı arttırıcı bir etkiye sahiptir. Ayrıca NS'nin geleneksel puzolanik malzemelere kıyasla çimento hamurunun dayanımını, dayanıklılığını ve mikro yapısal davranışını iyileştirdiği de araştırma verileri ile sabittir [7, 13, 14 ve 15].

NS kullanımı çimento esaslı elemanlarda hem kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşumunu destekler hem de harç matrisi-agrega arayüzündeki geçiş bölgelerinin nano boyutlu boşluklarını doldurur. Bu durumun bir sonucu olarak çimento esaslı ürünlerde mukavemet, dayanıklılık, büzülme ve aderans gibi özelliklerde belirgin farklar meydana gelir. NS parçacıkları, nano dolgu maddesi olarak işlev görerek C-S-H jel parçacıkları arasındaki boşlukları doldurabilir. Ayrıca, kalsiyum hidroksit ile puzolanik reaksiyonla C-S-H miktarı artar ve bu da daha yüksek yoğunluklu bir matrisin elde edilmesini sağlar. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) verileri de göstermektedir ki NS yalnızca mikro yapıyı iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda puzolanik reaksiyonu teşvik eder [11 ve 16]. Gözenek boyutu dağılımına dair benzer veriler hem erken yaş hem de 28 günlük numunelerde gözlemlenmiştir [11, 12 ve 16]. Çimento ile ikame edilen %2.5 oranında NS miktarı işlenebilirlik gibi belirleyici taze hal özellikleri üzerinde etkilidir [10]. Bunun yanı sıra artan NS miktarı aşınma direnci üzerinde belirgin farklar oluşturmaktadır [17].

Harç ya da betonun bünyesindeki mevcut boşluklardan nüfuz eden sıvı ve gazlar zamanla istenmeyen fiziksel veya kimyasal reaksiyonlara

neden olur. Reaksiyonların sonucu olarak meydana gelen çatlaklar yeni reaksiyonlara da zemin hazırlar. Elemanların bünyesini bozan agresif ortamlar mevcut çevresel faktörlere bağlı olarak çeşitlilik gösterir. Ortamdaki Na_2SO_4 ve NaCl konsantrasyonu, bu aşındırıcı süreçlerde önemli rol oynar. Aşındırıcı ortam etkisini en aza indirmek için daha az geçirimli üretimler hedeflenir ve NS kullanımı bu süreçte önemli bir seçenektir [9].

Kendiliğinde Yerleşen Harç (KYH) genellikle bir veya daha fazla mineral katkı maddesi kullanımının yanı sıra kimyasal katkı maddesiyle oranlanmış karmaşık bir dizi prosedür içerir. Yalnızca sertleşmiş hal özellikleri değil taze hal özellikleri de bileşenlerin miktarı ve türü ile ilişkilendirilir [18]. Son on yıllarda inşaat alanındaki sayısız trend ve gelişme arasında KYH'nin kullanımı; ana bileşenlere alternatif ve geridönüşüm ürünleri sunmasının yanı sıra farklı mineral katkı maddelerinin kullanılması bağlamında dikkat çekicidir [18, 19 ve 20]. Başarılı bir formülasyon ile üretilen bu sistemlerde yeterli reolojik özelliklere sahip olmak birçok kriteri etkileyen önemli bir faktördür. Çimento ve mineral katkı maddelerinin miktarı ve türündeki değişimin yanı sıra agrega türündeki değişimler de taze KYH'ların özellikleri üzerinde etkilidir [21].

NS ve YHA'nın farklı oranlarda agresif ortamlarda bir arada gösterecekleri mekanik performansın belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada; iki tür ikame durum değerlendirilmiştir. NS PÇ'ye %0, 1, 2, 3 ve 4 oranında ikame edilirken aynı tasarımlar için agregaya %0, 5, 10 ve 15 oranında YHA ikame edilmiştir. Elde edilen deney sonuçları YHA kullanımına bağlı basınç ve eğilme dayanımı kayıplarının NS kullanımı ile telafi edilebileceği oranları tespit etmesi bakımından önem taşır. Bu hali ile çalışma hem sınırlı doğal kaynaklardan sağlanan agreganın hem de çimento miktarının azaltılması için optimum NS ve YHA oranına vurgu yapmaktadır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Na_2SO_4 ve NaCl derişimli agresif ortamlara maruz kalan yapay hafif agrega ikameli KYH'larda NS kullanımının mekanik performansa etkisini sunmaktadır.

Önemli Noktalar (Highlights):

- Yapay hafif agrega içeren kendiliğinden yerleşen harçların fiziksel özellikleri belirlendi.
- Agresif kürlenme koşullarına maruz kalan kendiliğinden yerleşen harçlarda nano silika kullanımının katkısı değerlendirildi.
- Na_2SO_4 ve NaCl derişimli kür şartlarının yapay hafif agrega ikameli kendiliğinden yerleşen harçlarda basınç ve eğilme dayanımına etkisi değerlendirildi.

3. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

Çimentoya NS; kırma kum (KK)'a YHA ikame edilme durumlarının bir arada karşılaştırıldığı ve farklı kür şartlarının değerlendirildiği deneysel çalışmada kapsamında KYH'ların üretim süreci ve kullanılan malzemeler bu bölümde alt başlıklar ile verilmiştir.

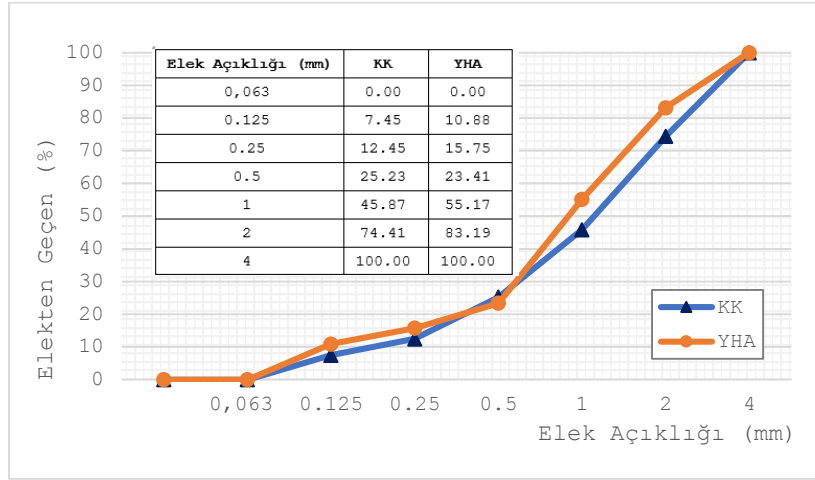
3.1. Materyal (Materials)

20 farklı tasarım ile üretilen KYH'larda CEM-I 42.5R çimento (PÇ) ve çimentoya kütlece %0, 1, 2, 3, 4 oranında ikame edilen NS kullanılmıştır. PÇ'nin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [22]. Kullanılan KK Tunceli ili sınırlarındaki taşocaklarından temin edilmiştir. KK'ya hacimce %0, 5, 10 ve 20 oranında YHA ikame edilmiştir.

Tablo 1. PÇ'nin Özellikleri
(Table 1. Properties of PC)

Kimyasal Bileşim (%)	CaO	63.57
	SiO ₂	19.34
	Al ₂ O ₃	3.75
	Fe ₂ O ₃	4.15
	MgO	2.90
	SO ₃	3.15
	K ₂ O	0.81
	Na ₂ O	0.41
Kızdırma Kaybı		1.92
Blaine (cm ² /g)		3804

YHA üretim sürecinde ağırlıkça %10 Tip I PC ve %90 uçucu kül kullanılmış ve hazırlanan kuru karışım, ıslatma yöntemi ile benzer çalışmalarda uygulanan yöntem ile paralellik gösterir şekilde peletlenmiştir [23]. KK ve YHA 4 mm kare gözlü elekten elenmiş ve elek altı malzeme çalışma kapsamında kullanılmıştır. KK ve YHA'ya ait elek analizi Şekil 1'de verilmiştir [24].



Şekil 1. Elek analizi ve granülometri eğrisi
(Figure 1. Sieve analysis and granulometry curve)

KYH'ların hazırlanmasında karışım suyu olarak TS EN 1008'e [25] uygun şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Üretilen 20 farklı KYH tasarımı TS EN 934-2+A1'e [27] uygun akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. PÇ, NS ve KK ve YHA ve HRWR'nin özgür ağırlığı sırasıyla 3.15, 2.2, 2.55, 1.72, 1.06'dır. KYH'ların 28 gün süre ile bekletildiği Na₂SO₄ ve NaCl çözeltilerinde sanayi tipi NaCl ve Na₂SO₄ kullanılmıştır.

3.2. Metot (Methods)

KYH'lerin tasarımı NS'nin PÇ'ye; YHA'nın KK'ya kısmi ikamesi esas alınmıştır. Bu değişim esasları ile 20 farklı KYH üretilmiştir. Referans karışımında kullanılan çimento ve su miktarı sırasıyla 500 kg/m³ ve 210 kg/m³'tür. S/B oranı sabit ve 0.42'dir. Su miktarının sabit olmasına bağlı olarak; amaçlanan EFNARC'ın [26] vizkozite ve taze hal kriterlerinin tahsisi, akışkanlaştırıcı katkı maddesinin farklı miktarda kullanımı ile sağlanmıştır. Karışımların hazırlanması laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş ve 3 dm³ kapasiteli laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır. KYH'ların karışım tasarımı mutlak hacim yaklaşımı uygulanmıştır.

KYH'lar vibrasyon ve sıkıştırma yapılmaksızın 40x40x160 mm ayrıtlı prizma kalıplara yerleştirilmiştir. 24 saat kalıplanma süresini tamamlayan numuneler 3 gruba ayrılmıştır. Her grup 20 seriden her seride 3 adet prizma numuneden oluşmaktadır. Her grup 20 KYH serisinin temsil edecek şekilde kodlanmıştır. Numuneler kodlanırken karışımda kullanılan NS ve KYH oranı belirleyicidir. Örneğin; H1-N0-Y0 kodlu numuneler referans serisine aittir ve NS ve YHA içermez. H10-N4-Y5 serisi ise %4 NS, %5 YHA içeren numuneleri temsil etmektedir. 1. grup numuneler kirece doymuş su küründe; 2. grup numuneler 100 g/L Na₂SO₄ derişimli su küründe; 3. grup numuneler ise %4 NaCl derişimli su küründe 28 gün boyunca kesintisiz bekletilmiştir. Tüm gruplardaki numunelere 28 günlük kür sonrası, etüv kurusu birim hacim ağırlık, porozite, eğilme ve basınç deneyi uygulanmıştır.

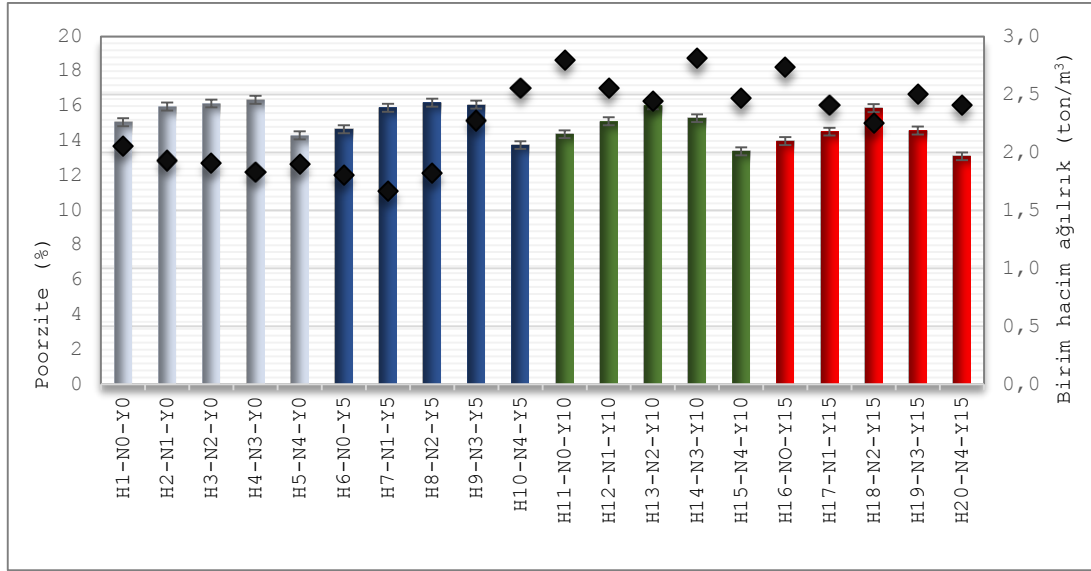
Numunelerin fiziksel özellikleri tespit edilirken; su kürü sonrası Arşimet prensibi ile çalışan tartıda "su içindeki asılı numune ağırlığı", "yüzeyi kuru suya doymuş numune ağırlığı" ve 110±2°C'de hava sirkülasyonlu fırında 24 saat sabit ağırlığa gelinceye kadar kuruma sonrası "etüv kurusu numune ağırlığı" belirlenmiştir. Veriler ve ilgili denklemler kullanılarak, porozite ve etüv kurusu birim hacim ağırlık tespit edilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerinin tespitinde eğilme ve ardından eksenel basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır [28 ve 29]. Tüm veriler 3'er adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSIONS)

4.1. Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Sonuçları

(Unit Volume Weight and Porosity Results)

28 gün standart su kürü uygulanan numuneler ile gerçekleştirilen etüv kurusu birim hacim ağırlık ve porozite sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. En yüksek birim hacim ağırlık H4 serisine aittir ve 2.45 ton/m³'tür. En düşük birim hacim ağırlık ise H20 serisinde 1.96 ton/m³ olarak hesaplanmıştır. NS miktarındaki artış tüm serilerde benzer birim hacim ağırlık ve porozite etkisi sunmamaktadır. NS miktarı aynı, YHA miktarı farklı olan seriler kıyaslandığında; benzer çalışma sonuçlarına olduğu gibi, YHA miktardaki artış birim hacim ağırlık üzerinde negatif ve anlamlı etkiye sahiptir. Kullanılan YHA oranını arttırmak birim hacim ağırlığı düşürürken, NS miktarını arttırmak tüm serilerde benzer eğilim sunmaz. %2-3 mertebesine kadar NS kullanımı; porozite oranını azaltıcı etkiye sahiptir. Ancak %4 oranında NS kullanımı genel olarak poroziteyi arttırmaktadır. Bu durum benzer çalışma sonuçlarında olduğu gibi açıklanmaktadır. Sınırlı miktarda (%1, 2, 3) NS kullanımı hidratlı çimento hamuru ile agregalar arasındaki bağı iyileştirir, aynı zamanda daha yüksek özgül yüzey alanı ve çimentoya göre çok daha küçük boyutları sayesinde numunelerin sıkılığını artırır ve gözenekliliğini azaltır [30]. En yüksek porozite oranı H14 serisine aittir ve yaklaşık 18.8'dir. Kullanılan YHA miktarı %0'dan %5'e; %10'dan %15'e hareketle porozitenin artışı ile ilişkilidir. Artan YHA miktarı poroziteyi arttırmaktadır. Artan NS miktarının porozite üzerindeki etkisi benzer çalışma sonuçları ile paralellik sergilemektedir [10 ve 14].



Şekil 2. Birim hacim ağırlık (ton/m³) ve porozite (%) sonuçları
(Figure 2. Unit volume weight (ton/m³) and porosity (%) results)

4.2. Eğilme ve Basınç Dayanımı Sonuçları

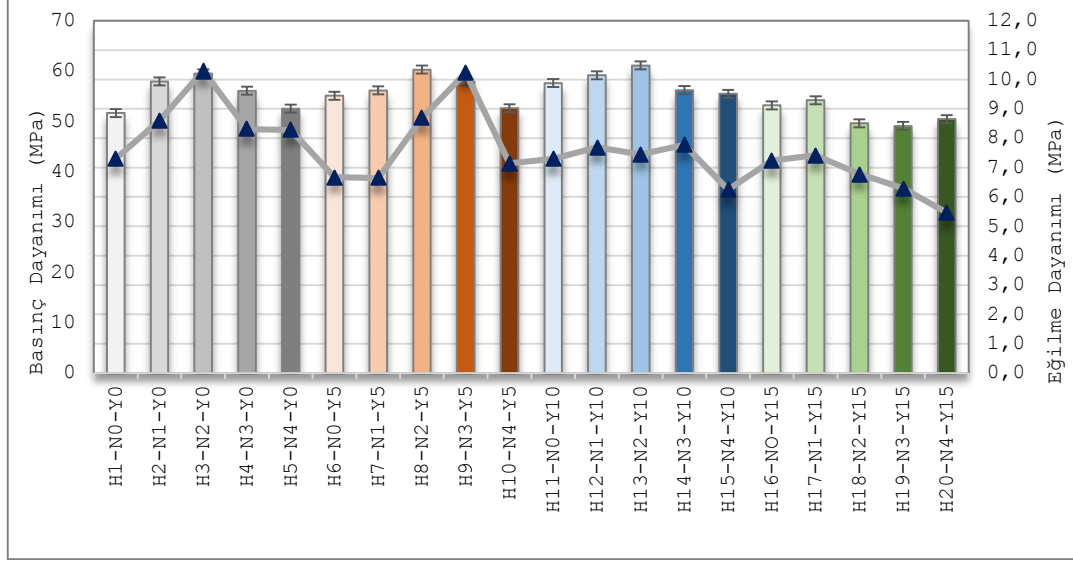
(Flexural Strength and Compressive Strength Results)

28 gün kirece doymun su küründe bekletilen numuneler ile gerçekleştirilen eğilme ve basınç dayanımı deneyi sonuçları Şekil 3'te verildiği gibidir.

Tüm serilerin basınç dayanımı referans serisi (H1)'nden daha fazladır. En fazla basınç dayanımının kaydedildiği seri H13 serisidir ve basınç dayanımı 61.12 MPa'dır. En düşük basınç dayanımı ise H19 serisine aittir ve 49.10 MPa olarak kaydedilmiştir.

%0 YHA kullanılarak üretilen serilerde (H1-H5) %2 NS ikame durumuna kadar basınç dayanımında artış vardır. Benzer artış %5 YHA içeren serileri (H6-H10) için %2 NS ikame durumunu karşılarken, %10 YHA içeren serilerde (H11-H15) %2, %15 YHA içeren serilerde (H16-H20) ise %1 mertebesindedir. Verilerden anlaşılabacağı üzere %10 mertebesine kadar YHA ikame edilen KYH'larda NS kullanımı %2 mertebesine kadar basınç dayanımındaki artışı destekler.

H1-H5 aralığında %2 NS, H6-H10 aralığında %3 NS, H11-H15 aralığında %3 NS, H16-H20 aralığında %1 oranında NS kullanımı en yüksek eğilme dayanımı vermiştir. NS kullanımının sağladığı eğilme dayanımındaki artış kendi setleri içinde değerlendirildiğinde en fazla artış 3.5 MPa'dır ve bu fark H6-H10 serileri arasındadır. Eğilme dayanımı özellikle %15 YHA kullanılan serilerde artan NS miktarı ile (%1 NS hariç) azaltıcı etkiye sahiptir. Sonuçlar; %3 oranına kadar NS kullanımının referans serilerine nazaran basınç dayanımındaki artışın vurgulandığı benzer çalışma [11, 16, 30, 31 ve 32] verileri ile paralellik sergilemektedir. Faydalı eşiğin üzerinde NS kullanımı hidrasyon sırasında reaksiyona girecek ve CSH jeli üretecek yeterli ürün olmaması ile ilişkilendirilmektedir [33]. Bu çalışmada NS'nin faydalı eşik düzeyi tüm seriler için %2-3 mertebesindedir.



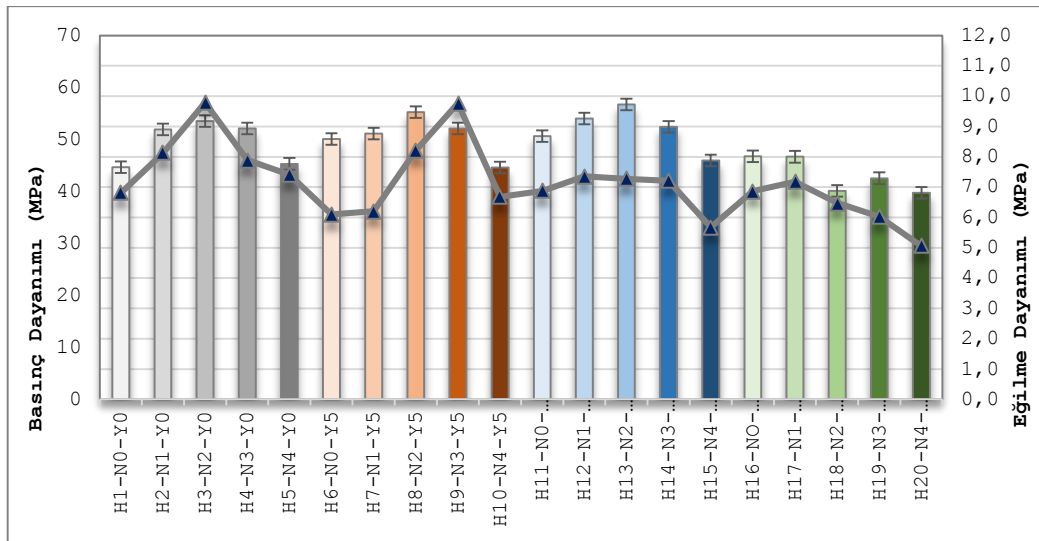
Şekil 3. Basınç ve eğilme dayanımı (Grup 1, MPa) sonuçları
(Figure 3. Compressive and flexural strength (Group 1, MPa) results)

28 gün süresince 100 g/L Na₂SO₄ derişimli su küründe bekletilen numuneler ile gerçekleştirilen eğilme ve basınç dayanımı deneyi sonuçları Şekil 4'te verildiği gibidir.

H1 serisinin basınç dayanımı 44.67 MPa'dır. En yüksek ve en düşük basınç dayanımı sırasıyla H13 ve H20 serilerine aittir. H13 serisinde 56.76 MPa olarak kaydedilen basınç dayanımı H20 serisinde 39.77 MPa'dır.

En yüksek eğilme dayanımı H3 serisine aittir ve 9.78 MPa'dır. En düşük eğilme dayanımı ise H20 serisinde 5.05 MPa olarak hesaplanmıştır.

%0, %5 ve %10 YHA ikame edilmiş seriler kendi serileri ile kıyaslandığında %10 mertebesine kadar NS kullanımı basınç ve eğilme dayanımında pozitif etkiye sahiptir. Ancak %15 YHA ile üretilen serilerde en yüksek basınç ve eğilme dayanımı %1 NS kullanılan serilere aittir. Bu durum optimum düzeyde NS kullanımın agresif ortama maruziyet sonrası basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki katkısı ile açıklanabilir. Sonuçlar benzer çalışmalar ile paralellik sergilemektedir [9].



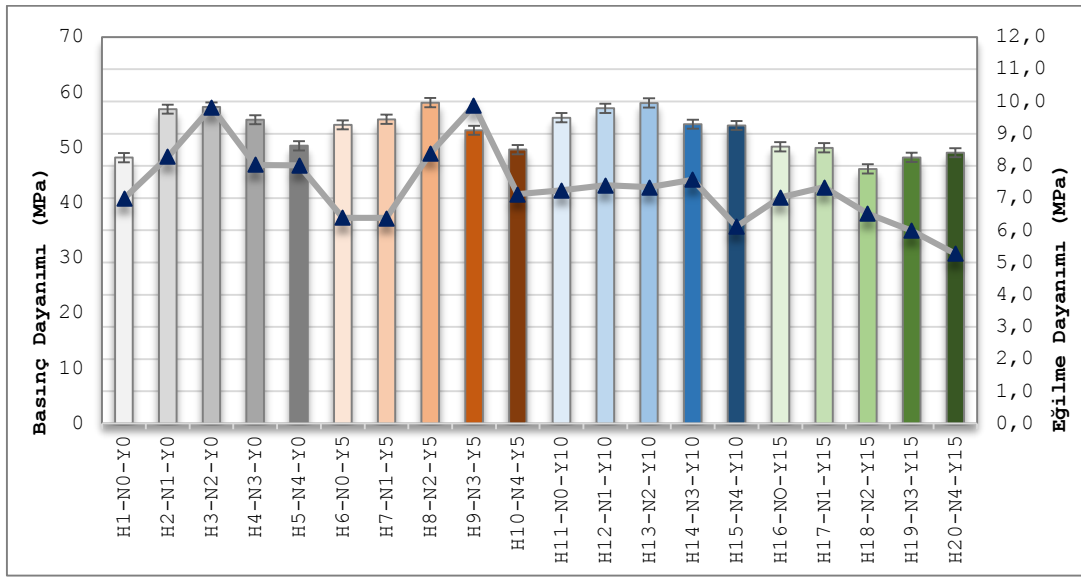
Şekil 4. Basınç ve eğilme dayanımı (Grup 2, MPa) sonuçları
(Figure 4. Compressive and flexural strength (Group 2, MPa) results)

28 gün süresince %4 NaCl derişimli su küründe bekletilen numuneler ile gerçekleştirilen eğilme ve basınç dayanımı deneyi sonuçları Şekil 5'te verildiği gibidir.

H1 serisinin basınç dayanımı 48.17 MPa'dır. En yüksek ve en düşük basınç dayanımı sırasıyla H8 ve H18 serilerine aittir. H8 serisinde 58.12 MPa olarak kaydedilen basınç dayanımı H18 serisinde 46.11 MPa'dır.

En yüksek eğilme dayanımı H9 serisine aittir ve 9.88 MPa'dır. En düşük eğilme dayanım ise H20 serisinde ve 5.28 MPa olarak kaydedilmiştir.

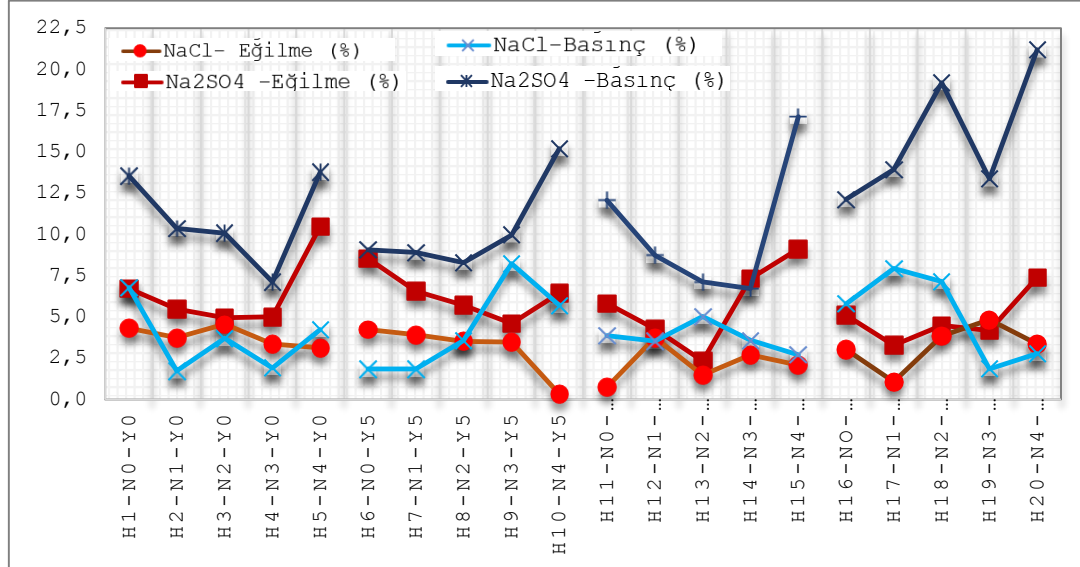
%0, %5 ve %10 YHA ikame edilmiş seriler kendi serileri ile kıyaslandığında %10 mertebesine kadar NS kullanımı basınç ve eğilme dayanımında pozitif etkiye sahiptir. NS'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi benzer çalışma verileri ile benzerlik içermektedir [11]. Ancak %15 YHA ile üretilen serilerde basınç ve eğilme dayanımı düzenli bir etkileşim sergilememektedir. Tüm serilerde NaCl'nin azaltıcı etkisi eğilme dayanımı için max. %4.83 ve basınç dayanımı için %8.23 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Basınç ve eğilme dayanımı (Grup 3, MPa) sonuçları
(Figure 5. Compressive and flexural strength (Group 3, MPa) results)

100 g/L Na_2SO_4 derişimli su kürü ve %4 NaCl derişimli su küründe 28 gün süresince bekletilen numunelerin standart su küründe bekletilen numunelere kıyasla eğilme ve basınç dayanımındaki değişimlerin verildiği grafiksel gösterim Şekil 6'da sunulmuştur. Na_2SO_4 ve NaCl derişimli ortamda bekletilen numunelerin tamamı standart su küründe bekletilen numunelerden daha düşük basınç ve eğilme dayanımına sahiptir. Buna göre 100 g/L Na_2SO_4 derişimli su küründe bekletilen numuneler de max. eğilme ve basınç dayanım kaybı sırasıyla %10.5, 21.18'dir. %4 NaCl derişimli su küründe bekletilen numunelerde bu oran eğilme ve basınç dayanımı için sırasıyla %4.83, 8.23'tür. Na_2SO_4 'nin KYH numunelerinin mekanik performansı üzerindeki negatif etkisi NaCl'nin etkisinden daha fazladır. Artan NS miktarı çözeltilerde bekletilen numunelerin mekanik performansı üzerinde etkilidir. Çimento yerine kısmi bir ikame olarak NS kullanımı, hidrasyonun erken yaşlarında C-S-H jel oluşumunu hızlandırabilir [33]. Bu oluşum agresif dış ortama karşı durabilite üzerinde pozitif etki sunmaktadır. Bu çalışmada %3'ün üzerinde NS kullanımı literatürdeki benzer çalışma [33] sonuçlarının yorumlarına benzer şekilde harç matrisinde nanopartiküllerin uygunsuz dağılımı ile ilişkilendirilebilir. NS parçacıkları matris içinde dahili dolgu maddesi olarak faydalı çalışma kabiliyeti sergiler ve NS gözenek yapısını

etkileyerek geçirgenliği azaltmak için kullanılabilir [34]. Çünkü NS kullanımı agrega-çimento arayüzündeki fiziksel yapışmayı arttırır ve mevcut gözeneklilikte kayda değer bir azalma sağlar [35, 36, 37 ve 38].



Şekil 6. Basınç ve eğilme dayanımı değişimi (%)
(Figure 6. Change in compressive and flexural strength (%))

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

PÇ'ye %0, 1, 2, 3 ve 4 oranında NS ve KK'ya %0, 5, 10 ve 15 oranında YHA ikame edilerek üretilen 20 farklı KYH serisi 28 gün boyunca standart su kürü, 100 g/L Na₂SO₄ derişimli su kürü ve %4 NaCl derişimli su küründe kesintisiz şekilde bekletilmiştir.

Deneysel çalışma sonuçları; farklı kür şartlarının YHA ile modifiye edilmiş KYH'ların NS ikame durumlarına bağlı olarak değerlendirmesini içermektedir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre;

NS kullanımı birim hacim ağırlık, porozite, eğilme ve basınç dayanımı sonuçları üzerinde etkilidir.

Standart su kürü sonrası; %0, %5 ve %10 YHA ikameli serilerde %2 oranına kadar NS kullanımı basınç dayanımı üzerinde pozitif etkiye sahiptir. Ancak %15 YHA ikameli serilerde bu oran sadece %1 mertebesine kadar tespit edilmiştir. Benzer şekilde eğilme dayanımına pozitif katkı sağlayan NS kullanım oranı %5, %10 ve %15 YHA ikame durumları için sırasıyla %3, %1 ve %1'dir. Artan YHA kullanımı %15 mertebesine kadar eğilme ve basınç dayanımı üzerinde kabul edilebilir değerler sunmaktadır.

Na₂SO₄ ve NaCl derişimli kür uygulanan numunelerin tamamında basınç ve eğilme dayanımı standart su kürü uygulanan serilerin basınç ve eğilme dayanımından düşüktür. Na₂SO₄'nin basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki olumsuz etkisi NaCl'den daha fazladır. Artan NS miktarı agresif ortamdan etkilenme düzeyini azaltır. %2-3 bandında NS kullanımı agresif kür şartları için en iyi ikame durumunu sunmaktadır. NS kullanımı YHA ikameli KYH'ların basınç ve eğilme dayanımı kayıplarını telafi edecek ikame oranlarına sahiptir. Bu oranlar elde edilen sonuçlara göre %2-3 mertebesinde.

Agresif sülfat Na₂SO₄ ve klorür NaCl içeren ortamlarda kullanılacak YHA ikameli KYH dayanım kayıplarını en aza indirmek için, çimento ağırlığının %2 ila %3'ü oranında NS kullanılması şiddetle tavsiye edilir; çünkü bu banttaki NS ikamesi, harçların agresif kür şartlarından etkilenme düzeyini önemli ölçüde azaltarak dayanım kaybını telafi etmektedir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Yazar bu çalışma için herhangi bir mali destek almadığını beyan etmiştir.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarı bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akgül, M. ve Doğan, O., (2022). Determination of reinforcement adherence loss by accelerated corrosion test for normal and 4% NaCl solubility cured flat and ribbed reinforced concretes with different strengths. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(2):691-704, doi: 10.29137/umagd.1092523.
- [2] Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., and Bahadori, A., (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *J Clean Prod*, 51:142-161, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- [3] Zheng, L., Wu, H., Zhang, H., Duan, H., Wang, J., Jiang, W., Dong, B., Liu, G., Zuo, J., and Song, O., (2017). Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Constr Build Mater*, 136:405-413, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.055.
- [4] Shi, C., Li Y., Zhang J., Li, W., Chong, L., and Xie, Z., (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *J Clean Prod*, 112:466-472, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.057.
- [5] Aslam, M.S., Huang, B., and Cui, L., (2020). Review of construction and demolition waste management in China and USA. *J Environ Manage*, 264:110445, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110445.
- [6] Kahhat, R., Kim, J., Xu, M., Allenby, B., Williams, E., and Zhang, P., (2008). Exploring e-waste management systems in the United States. *Resour Conserv Recycl*, 52(7):955-964, doi: 10.1016/j.resconrec.2008.03.002.
- [7] Akgül, M., (2025). Polipropilen lifli mikro betonlarda nano silika kullanımının etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2):721-731, doi: 10.17780/ksujes.1607363.
- [8] Akgül, M., Doğan, O., and Etli, S., (2020). Investigation of mechanical properties of granulated waste rubber aggregates substituted self-compacting concrete mortar produced with different cement. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. 12(2):787-798, doi: 10.29137/umagd.734614.
- [9] Başaran, M., (2022). Nano silika ve mikro silika katkılı harçlarda durabilite ve mekanik özellikler. *Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul*.
- [10] Senff, L., Labrincha, J.A., Ferreira, V.M., Hotza, D., and Repette, W.L., (2009). Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Constr Build Mater*, 23(7):2487-2491, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.005.
- [11] Shih, J.Y., Chang, T.P., and Hsiao, T.C., (2006). Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite. *Materials Science and Engineering: A*, 424(1-2):266-274, doi: 10.1016/j.msea.2006.03.010.
- [12] Li, G., (2003). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO2. *Cem Concr Res*, 34(6):1043-1049,

- doi: 10.1016/j.cemconres.2003.11.013.
- [13] Ghafari, E., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., and Durães, L., (2014). The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete. *Mater Des*, 59(1-9), doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.051.
- [14] Ji, T., (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cem Concr Res*, 35(10):1943-1947, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.07.004.
- [15] Lee, J., Mahendra, S., and Alvarez, P.J.J., (2010). Nanomaterials in the construction industry: a review of their applications and environmental health and safety considerations. *ACS Nano*, 4(7):3580-3590, doi: 10.1021/nn100866w.
- [16] Jo, B.W., Kim, C.H., Tae, G., and Park, J.B., (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Constr Build Mater*, 21(6):1351-1355, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.12.020.
- [17] Li, H., Zhang, M., and Ou, J., (2006). Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. *Wear*, 260(11-12):1262-1266, doi: 10.1016/j.wear.2005.08.006.
- [18] Akgül, M., (2024). Effect of curing conditions on cement based self-compacting mortar produced with mortar waste aggregate. *Heliyon*, 10(16):e36423, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36423.
- [19] Asteris, P.G. and Kolovos, K.G., (2019). Self-compacting concrete strength prediction using surrogate models. *Neural Comput Appl*, 31(S1):409-424, doi: 10.1007/s00521-017-3007-7.
- [20] Akgül, M., (2024). Wood ash effect on cement based self-compacting mortars. *Civil Engineering Beyond Limits*, 5(2):1-8, doi: 10.36937/cebel.2024.1945.
- [21] Domone, P.L., Jin, J., and Chai, H.W., (1999). Optimum Mix proportioning of self-compacting concrete. Emerald Publishing Limited.
- [22] TS EN 197-1. (2011). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [23] Güneyisi, E., Gesoğlu, M., and Booya, E., (2012). Fresh properties of self-compacting cold bonded fly ash lightweight aggregate concrete with different mineral admixtures. *Mater Struct*, 45(12):1849-1859, doi: 10.1617/s11527-012-9874-6.
- [24] TS EN 933-1. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. Ankara, Türkiye.
- [25] TS EN 1008. (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. Ankara, Türkiye.
- [26] The European Project Group. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, EFNARC, no. May, p. 63.
- [27] TS EN 934-2+A1. (2014). Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- [28] ASTM C348-02. (2002). ASTM C348-02 Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars. p.7.
- [29] ASTM C349-08. (2008). Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). ASTM International, pp:1-4.
- [30] Fallah, S. and Nematzadeh, M., (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric

- and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Constr Build Mater*, 132:170-187, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100.
- [31] Lin, D.F., Lin, K.L., Chang, W.C., Luo, H.L., and Cai, M.Q., (2007). Improvements of nano-SiO₂ on sludge/fly ash mortar. *Waste Management*, 28:6, pp:1081-1087, doi: 10.1016/j.wasman.2007.03.023.
- [32] Roy, C., Mohanty, T., and Kumar Bera, D., (2023). Effectiveness of nano silica on properties of self-compacting concrete. *Mater Today Proc*, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.273.
- [33] Nazari, A. and Riahi, S., (2010). Microstructural, thermal, physical and mechanical behavior of the self compacting concrete containing SiO₂ nanoparticles. *Materials Science and Engineering: A*, 527(29-30):7663-7672, doi: 10.1016/j.msea.2010.08.095.
- [34] Balapour, M., Joshaghani, A., and Althoey, F., (2018). Nano-SiO₂ contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review. *Constr Build Mater*, 181:27-41, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266.
- [35] Arel, H.Ş. and Thomas, B.S., (2017). The effects of nano- and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks. *Results Phys*, 7:843-851, doi: 10.1016/j.rinp.2017.02.009.
- [36] 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. *Constr Build Mater*, 229:116888, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116888.
- [37] Faraj, R.H., Ahmed, H.U., Rafiq, S., Sor, N.H., Ibrahim, D.F., and Qaidi, S.M.A., (2022). Performance of self-compacting mortars modified with nanoparticles: a systematic review and modeling. *Cleaner Materials*, 4:100086, doi: 10.1016/j.clema.2022.100086.
- [38] Al-Hagri, M.G. and Döndüren, M.S., (2022). Effect and optimization of incorporation of nano-SiO₂ into cement-based materials a review. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, 13(1):36, doi: 10.20528/cjcrl.2022.01.004.