



Farklı oranlarda nano silika ilavesinin çimento esaslı harçların dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi

Influence of nano silica addition at different ratios on strength and durability properties of cement-based mortars

Didem Oktay^{1,*} 

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34220, İstanbul Türkiye

Öz

Bu çalışmada, son yıllarda yapı malzemeleri üretiminde sıklıkla kullanılan nano silikanın çimento esaslı harçların dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. %1, %2 ve %4 oranlarında nano silika ilavesi ile çimento harçları üretilmiş; yayılma, kılcal su emme, basınç dayanımı gelişimi ve klorür geçirimsizliği incelenmiştir. Nano silikalı karışımların zamana bağlı davranışını ortaya koymak için testler 28. ve 90. günlerde tekrar edilmiştir. Çalışma sonucunda, nano silikanın işlenebilir özelliklerini olumsuz etkilediği ancak sertleşmiş hal özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. Artan nano silika miktarı ile boşluk oranı ve klorür geçirimsizliği azalırken basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir. Nano malzemenin, çimento matrisi içerisinde homojen dağılmasının sağlanması koşulu ile %4 gibi yüksek bir oranda nano silika ilavesinin mümkün olduğu ve dayanıklılık özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Nano silika, Klorür geçirimsizliği, Çimento harcı, Basınç dayanımı gelişimi

1 Giriş

Nano teknoloji, günümüzde bilim ve teknolojinin en hızlı gelişen disiplinler arası sektörlerinden biridir. Nano malzemeler, son yıllarda yapılan çalışmalar ile çimento esaslı malzemelerin özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan malzemeler haline gelmiştir [1,2]. Bu malzemeler sadece boşlukları doldurmakla kalmayıp, aynı zamanda çimento hidratasyonunu hızlandırır, çimento ve agrega ara yüzeyini güçlendirir ve böylece çimento esaslı malzemelerin dayanıklılığını ve dayanımını artırır [3,4], [5]. Yapı malzemeleri alanında, nano lifler, nano karbon tüpler, nano-TiO₂ ve nano-SiO₂ gibi nano parçacıklar önemli ölçüde dikkat çekmiş ve araştırılmıştır. Bu maddeler öncelikle çimento esaslı matrisi güçlendirmek için kullanılmakta, bu da hem yüksek performanslı hem de çok işlevli çimento kompozitlerinin elde edilmesini sağlamaktadır.

Nano-silika (NS), erken yaşta belirgin aktivitesi sayesinde diğer nano malzemelerden ayrılmaktadır. Yapılan araştırmalara göre NS, diğer mineral katkılarına kıyasla daha

Abstract

In this study, the influence of nano silica, used in the production of construction materials in recent years, on the durability properties of cement-based mortar has been investigated. Mortars with nano silica additions at 1%, 2%, and 4% ratios were produced; workability, water absorption, compressive strength development, and chloride permeability were examined. Tests were repeated on the 28th and 90th days to reveal the time-dependent behavior of nano-silica-containing mixtures. As a result of the study, it was observed that nano silica adversely affected the workability properties but improved the hardened state properties of mortars. It was determined that with increasing nano silica content, the void ratio and chloride permeability decreased while the compressive strength increased. It was emphasized that with the condition of ensuring the homogeneous distribution of the nano material within the cement matrix, a high addition of nano silica such as 4% is possible and significantly improves the durability properties.

Keywords: Nano silica, Chloride permeability, Cement based mortar, Compressive strength development

ince tane yapısına ve daha yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. Bu avantajları sayesinde diğer mineral katkılarına kıyasla çimento esaslı sistemlerde daha rahat kullanılabilir [6-8]. Puzolanik aktivitesi ve ince tane boyutu sayesinde NS taneleri, hidratlı kalsiyum silikat (CSH) jel partikülleri arasındaki boşlukları etkili bir şekilde doldurarak çimentolu karışımlarda nano dolgu maddesi olarak kullanılabilir [9,10]. Ayrıca, çalışmalar NS ilavesinin çimento esaslı malzemelerin basınç dayanımı artışına önemli ölçüde katkıda bulunduğunu ve mikro yapının yoğunlaşmasına yardımcı olduğunu göstermiştir [5,8,10].

Betonun dayanımının yanı sıra maruz kalacağı çevresel etki ve dayanıklılık özellikleri de malzemenin servis ömrünü etkilemektedir. Betonun dayanıklılığı söz konusu olduğunda, ele alınması gereken en önemli parametrelerden biri beton yapılarına yönelik klorür saldırısıdır. Başka bir deyişle, klorür saldırısı tüm beton yapı arızalarının %40'undan sorumludur. Donatı korozyonu, klorür saldırısının birincil sonucudur ve yapının dayanımında önemli bir azalmaya neden olur [11]. Betonun agresif iyonların

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dyasar@yildiz.edu.tr (D. Oktay)

Geliş / Received: 03.04.2024 Kabul / Accepted: 20.05.2024 Yayınlanma / Published: xx.xx.20xx

doi: 10.28948/ngumuh.1464677

girişine karşı direnci, dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir [12]. Bu nedenle, betonun geçirgenliği incelenmeli ve iyileştirilmek için önlem alınmalıdır.

Yapılan çeşitli çalışmalarda NS ilavesinin klor penetrasyonuna etkisi incelenmiştir. Diaz-Peña ve diğerleri [13] ve Şulic ve diğerleri [14]'nin yaptıkları çalışmalarda %2 NS ilavesi ile en düşük penetrasyon değerine ulaşıldığı ve kapiler gözeneklerin azaldığı belirtilmiştir. Bai ve diğerleri [15] yaptıkları çalışmada ise %0,6, %0,9 ve %1,2 oranında NS ilave ederek farklı su/çimento oranına sahip harçlar üretmiştir. Klorür penetrasyon derinliği değerlerinin artan NS ile birlikte azaldığı görülmüştür. Düşük (0,3) ve yüksek (0,4) su/çimento oranına sahip numunelerde yapılan testlerde, NS'nin düşük su/çimento oranında boşluk oranını değiştirmeden boşluk yöneliminde kıvrımlılığı artırdığı, yüksek su oranında ise boşlukların birbiri ile bağlantısının azalttığı vurgulanmıştır. NS'nin daha yüksek oranda (%3) kullandığı farklı bir çalışmada ise klorür penetrasyon katsayısının kontrol seriyeye kıyasla %18 azaldığı ancak daha yüksek oranlarda nano malzemenin topraklanmasından kaynaklı olarak penetrasyon katsayısının arttığı görülmüştür [16].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde nano silikanın genel olarak boşluk yapısı ve mikro yapıyı iyileştirdiği bu sayede de betonun dayanım ve dayanıklılık performansını iyileştirdiği belirtilmiştir. Buradaki önemli nokta uygun nano malzeme miktarının belirlenmesi ve malzemenin matris içinde homojen olarak dağılmasını sağlamaktır. Çalışmalar ideal NS oranının %1-%2 mertebelerinde olduğunu vurgulamıştır. Ancak homojen dağılmanın sağlanması koşulu ile daha yüksek oranlarda NS kullanımının çimento esaslı malzemelerin dayanım ve dayanıklılığını artıracakları görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, %1, %2 ve %4 NS ilavesi ile sabit su/çimento oranına sahip çimento harçları üretilmiştir. 28 ve 90 günlük harçlarda yapılan kılcal su emme ve klorür geçirimsizlik deneyleri ile harçların dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. 3, 7, 28 ve 90 günlük numunelerde yapılan basınç testi ile de NS ilavesinin basınç dayanımı gelişimine etkisi ortaya konmuştur. Çimento ile yer değiştirmeli olarak kullanılan NS'nin puzolanik özelliği de basınç dayanımı sonuçları ile incelenmiştir. Literatürde önerilen NS oranlarına ek olarak %4 gibi yüksek bir NS içeri ile de deneyler yapılarak NS miktarının dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Kullanılan malzemeler

Karışımlarda bağlayıcı olarak Akçansa Çimento'dan temin edilen TS EN 197-1'e uygun CEM I 42,5R sınıfı Portland çimentosu kullanılmıştır. Üretimlerde farklı oranlarda kullanılan nano silika (NS) amorf yapıdadır ve %99,5 safsızlık (SiO₂) içermektedir. Nano silikanın ortalama tane boyutu 15-35 nm'dir. Çimento ve nano silikaya ait XRF analizinden elde edilen kimyasal kompozisyon Tablo 1'de verilmiştir. Çimento harçlarında işlenebilirlik sağlamak amacıyla ile tüm karışımlara CRYSO Fluid Optima 287 polikarboksilat esaslı akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiştir. Agregata olarak, doğal kum ve kırma kum olmak

üzere iki farklı tip ince agrega eşit oranlarda kullanılmıştır. Agregaların özgül ağırlıkları sırasıyla 2,66 g/cm³ ve 2,70 g/cm³'tür.

Tablo 1. Çimento ve nano silikaya ait kimyasal özellikler

Malzeme	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	MgO	SO ₃	LOI
Çimento	62.2	19.9	4.7	4.0	1.2	3.7	2.2
NS	0.3	97.7	-	0.5	-	-	-

2.2 Harç üretimi ve karışım oranları

Deneysel çalışma kapsamında bir tanesi referans seri olmak üzere toplamda 4 farklı harç üretimi yapılmıştır. Harçlar ASTM C 305 esas alınarak üretilmiştir. NS, çimento ağırlığının %1, %2 ve %4 oranında çimento ile yer değiştirilmiştir. Çimento ve nano silika mikserde 2 dakika kuru olarak karıştırıldıktan sonra su ilave edilmiştir. Su eklendikten sonra düşük hızda 30 s karıştırılmış sonrasında kum ilave edilmiştir. Tüm malzemeler birlikte 30 s daha karıştırıldıktan sonra mikser durdurulup sıyırma işlemi yapılmıştır. Son olarak yüksek hızda 60 s daha karışım yapılarak üretim tamamlanmıştır. Tüm üretimlerde standart çimento mikseri kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı tüm serilerde 0,5 olarak sabit tutulmuştur. İşlenebilmeyi sabit tutmak için, serilerdeki kimyasal katkı oranları değiştirilmiştir. Referans seriyeye de düşük miktarda kimyasal katkı ilave edilmiş ve tüm serilerde yayılma değerinin 17±2 cm aralığında olması hedeflenmiştir. Karışımlar kullanılan nano silika oranlarına göre isimlendirilmiştir. "NS" kodu nano silika kullanıldığını, kod sonunda yazan 1, 2 ve 4 ise nano silika oranını temsil etmektedir. Sadece çimento ile üretilen seri "R" ile isimlendirilmiştir. Serilere ait karışım oranları ve kodları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Karışım oranları

Malzemeler	R	NS1	NS2	NS4
Çimento (g)	450	445.5	441	432
Nano silika (g)	-	4.5	9	18
Su (g)	225	225	225	225
Doğal kum (g)	675	675	675	675
Kırma kum (g)	675	675	675	675
Kimyasal katkı (%)	0.3	0.4	0.5	0.6

2.3 Yayılma deneyi

Harçların taze hal özelliklerini incelemek amacıyla ile ASTM C 1437'ye göre yayılma testi yapılmıştır. Üretimden hemen sonra gerçekleştirilen testlerde iki kademe doldurulan kalıbın her bir kademesi 20 defa tokmaklanmış ve kalıp kaldırıldıktan sonra 25 defa sarsılarak birbirine dik iki doğrultuda yayılma çapı ölçülmüştür. Ortalama yayılma çapı değerleri harçların yayılma değeri olarak kaydedilmiştir.

2.4 Kılcal su emme deneyi

Harçların su emme özellikleri ASTM C1585 esas alınarak belirlenmiştir. Deneyler, Φ100/200 mm boyutlarında üretilen silindir numunelerden kesilen 3 adet 50±3 mm yüksekliğindeki disk numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler 28 ve 90 günlük numunelerde yapılmıştır.

Hazırlanan numuneler öncelikle ilk 3 gün boyunca 50°C ve %80 bağıl nem ortamında bekletilmiştir. Daha sonra kapalı kaplara alınan numuneler 15 gün sürecinde 23°C'de saklanmıştır. Ön koşullandırma işlemi sonrasında kaplardan çıkarılan numunelerin dış çevreleri parafin film ile kaplanmıştır. Su emme değerlerinin belirlenebilmesi için ilk 6 saatte daha sık olmakla birlikte 8 gün boyunca ölçüm alınmıştır. Birincil ve ikincil su emme miktarları aşağıdaki **Denklem (1)** yardımıyla hesaplanmıştır.

$$I = \frac{m_t}{a \times d} \quad (1)$$

I = Su emme miktarı

m_t = t sürede numune kütleindeki gram cinsinden değişim

a = mm² cinsinden numunenin su emmeye maruz kalan alanı

d = Suyun yoğunluğu (g/mm³)

Serilerin su emme katsayıları (K) **Denklem (2)** kullanılarak hesaplanmıştır. Burada birincil su emme katsayıları ilk 6 saatlik ölçümler dikkate alınarak, ikincil su emme katsayıları ise 1 ile 8 gün arasındaki değerler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Minimum kareler yöntemi kullanılarak verilere en uygun olan doğrunun eğimi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$K = \frac{I}{\sqrt{t}} \quad (2)$$

2.5 Basınç deneyi

Nano silika ilaveli harçların basınç dayanımı gelişimini incelemek amacıyla 50x50x50 mm boyutların üretilen küp numunelerde 3., 7., 28. ve 90. günlerde ASTM C 109'a uygun olarak basınç testi yapılmıştır. Her bir deney günü için en az 3 adet numune kırılarak ortalama basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır.

2.6 Klorür geçirimsizlik deneyi

Klorür geçirimsizlik testi NT Build 492 dikkate alınarak yapılmıştır. Kılcal su emme deneyine benzer şekilde silindirik numunelerden kesilerek hazırlanan parçalar 28. ve 90. günde teste tabii tutulmuştur. Serilerin başlangıç akımına göre uygun voltaj ayarları yapılmış ve teste başlanmıştır. Deney sonunda iki parçaya bölünen numunelere 0.1M gümüş nitrat çözeltisi (AgNO₃) püskürtülmüş ve klor geçirimsizlik derinlikleri ölçülmüştür. Buna göre **Denklem (3)** kullanılarak klorür penetrasyon katsayısı hesaplanmıştır.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 (273 + T)L}{(U - 2)t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)Lx_d}{U - 2}} \right) \quad (3)$$

D_{nssm} : Klorür penetrasyon katsayısı $\times 10^{-12}$ m²/s

U: Uygulanan voltajın mutlak değeri, V

T: Başlangıç ve son sıcaklıkların ortalama değeri, °C

L: numunenin kalınlığı, mm

x_d : penetrasyon derinliklerinin ortalama değeri, mm

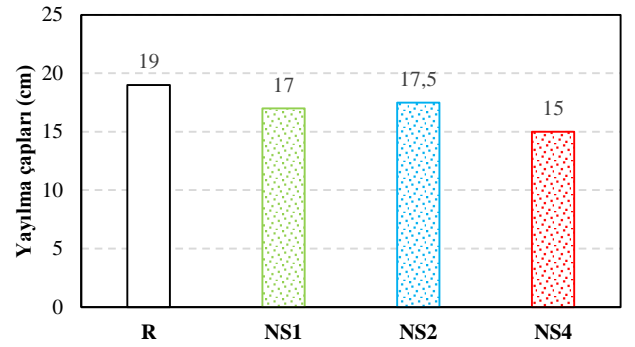
t: test süresi, saat

Sertleşmiş hal özelliklerinin belirlenmesi için üretilen tüm numuneler deney gününe kadar 20±2°C'deki kirece doygun suda bekletilmiştir. Deney gününde havuzdan çıkarılan numuneler, kuruması beklendikten sonra ilgili teste tabii tutulmuştur.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Yayılma

Taze haldeki harçların işlenebilme özelliklerinin incelenmesi için yapılan yayılma testi sonuçları **Şekil 1**'de verilmiştir. NS kullanımı ile değişecek yayılma değerlerini 17±2 cm aralığında tutmak için harç kıvamına bağlı olarak farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ilave edilmiştir. Referans seride %0,3 oranında ilave edilen katkı ile 19 cm elde edilen yayılma değerinin NS içeren serilerde de benzer değerlerde olması için NS1, NS2 ve NS4 serilerinde sırasıyla %0,4, %0,5 ve %0,6 oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kimyasal katkı oranı artmasına rağmen artan NS oranı ile yayılma değeri 15 cm'ye kadar gerilemiştir. NS1 ve NS2 serilerinde yayılma çapı değeri 17 cm olarak ölçülürken, en düşük değer NS4 serisinde elde edilmiştir. Bu durum, nano malzemelerin ince tane yapılarının harcın su ihtiyacını artırması ve işlenebilirliği olumsuz etkilemesi ile ilişkilendirilmiştir [17].



Şekil 1. Yayılma deneyi sonuçları

3.2 Kılcal su emme

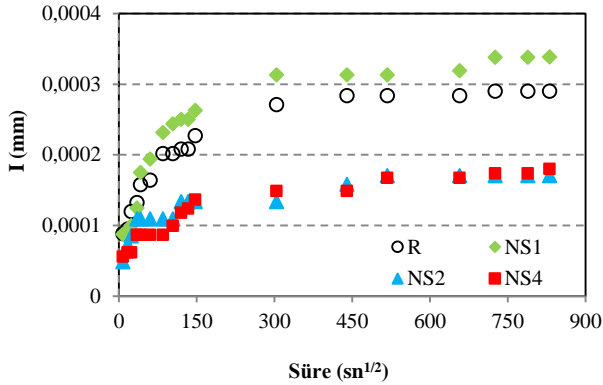
Tüm karışımların başlangıç ve ikincil su emme değerleri ile birlikte birincil ve ikincil kılcal su emme katsayıları **Tablo 3**'te verilmiştir. Su emme değerlerinin ilk saatlerde daha yoğun olması ve sonrasında numune yüzeyinin doygunluğa erişmesinden dolayı, çalışmada ilk 6 saatteki veriler dikkate alınmıştır. 4 farklı serinin zamana bağlı su emme özelliklerinin incelenmesi için 28 ve 90 günlük numunelerde ölçümler tekrarlanmıştır.

28 günlük sonuçlar incelendiğinde, başlangıç su emme değerleri ($I_{baş}$) 22.72×10^{-5} ile 13.66×10^{-5} arasında değişirken, ikinci su emme değerleri (I_{iki}) 29.02×10^{-5} ile 18.00×10^{-5} arasında değişmektedir. NS ilavesinin artması ile başlangıç ve ikincil su emme değerlerinin azaldığı net bir şekilde

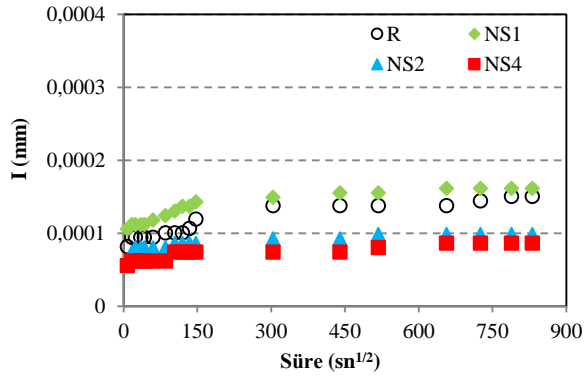
görülmektedir (Şekil 2). Kılcal su emme katsayıları da su emme değerlerine paralellik göstermektedir. %1 NS ilavesi ile yaklaşık %50 oranında artan başlangıç ve ikinci kılcal su emme katsayıları, %4 NS kullanılan serilerde özellikle başlangıç kılcal su emme katsayısı ($K_{baş.}$) değeri için %35 oranında azalmıştır.

Numunelerin zamana bağlı olarak su emme kapasitelerini incelemek için 90. günde yapılan ölçümlerde, 28 güne benzer şekilde, artan NS ilavesi su emme değerlerinin azalmasına sebep olmuştur (Şekil 3). 28 günlük NS4 serisine kıyasla 90. günde başlangıç su emme ($I_{baş.}$) %45, ikinci su emme ($I_{iki.}$) %50, başlangıç kılcal su emme katsayısı ($K_{baş.}$) %80 ve ikinci kılcal su emme katsayısı ($K_{iki.}$) değeri ise %50 oranında azalmıştır. %1 NS ilavesinde beklenenin tersine artan su emme değerleri elde edilmesine rağmen, artan NS içeriğinin su emme sonuçlarını iyileştirdiği ve harcın su emme kapasitesini azalttığı görülmüştür.

Bu durum, nano malzemenin filler etkisi ve puzolanik reaksiyona katkısı ile açıklanmaktadır. Çimento matrisi içerisinde boşlukların ve kılcal boşlukların bu etkiler sayesinde kapanması geçirimsizliği azalmaktadır [18]. Yapılan çeşitli çalışmalarda %0.5 ila %3 aralığında değişen NS miktarlarında genel olarak boşluk yapısının iyileştiği ve kılcal boşlukların azaldığı vurgulanmıştır [19-22].



Şekil 2. 28 günlük numunelerin kılcal su emme grafiği



Şekil 3. 90 günlük numunelerin kılcal su emme grafiği

Tablo 3. Kılcal su emme deneyi sonuçları

	$I_{baş.}$ (mm) $\times 10^{-5}$	$I_{iki.}$ (mm) $\times 10^{-5}$	$K_{baş.}$ (mm/s ^{1/2}) $\times 10^{-7}$	$K_{iki.}$ (mm/s ^{1/2}) $\times 10^{-8}$
R-28	22.72	29.02	9.00	3.00
NS1-28	26.30	33.88	12.60	4.86
NS2-28	11.74	14.80	6.13	7.02
NS4-28	13.66	18.00	5.81	5.88
R-90	11.91	15.04	2.00	3.00
NS1-90	14.28	16.15	3.00	2.00
NS2-90	8.60	9.83	1.00	1.00
NS4-90	7.41	8.65	1.00	3.00

3.3 Basınç dayanımı

Tüm serilerin basınç dayanımı gelişimi sonuçları Tablo 4 ve Şekil 4'te verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde artan NS oranı ve zamanla basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmektedir.

Erken yaş (3.gün) dayanımları incelendiğinde referans karışımın basınç dayanımı 26.24 MPa olarak ölçülmüştür. %1, %2 ve %4 NS ilavesi ile basınç dayanımı değerleri artmış ve en yüksek dayanım (30.46 MPa) NS1 serisinde elde edilmiştir. 7. günden itibaren, referans seriye kıyasla NS ilaveli karışımlarda basınç dayanımı artarken, %4 NS ilavesinin basınç dayanımına katkısının daha belirgin olduğu görülmektedir. Sadece NS2 serisinde görülen basınç dayanımındaki %7'lik azalmanın kimyasal katkının dolayı olabileceği düşünülmektedir. Artan NS içeriği ile 28 ve 90 günlük numunelerde basınç dayanımı değerleri NS2 ve NS4 serileri için sırasıyla %10 ve %20 artmıştır. NS1 serisinde ise 28.günde dayanımda bir değişiklik olmazken, 90.günde %6'lık bir artış olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %2 ve %4 NS ilavesi ile erken yaşlardan itibaren basınç dayanımında artış olduğu, %4 NS kullanımı ile en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği görülmüştür.

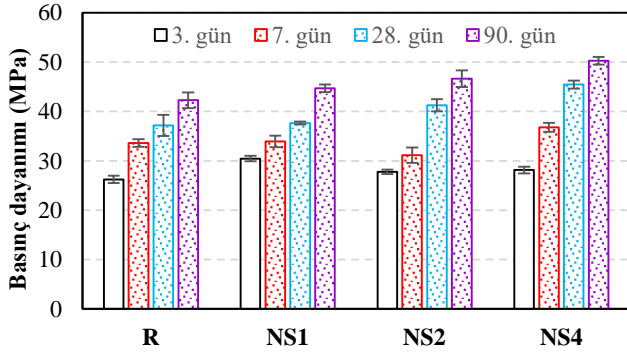
Nano silikanın basınç dayanımı gelişimi üzerindeki olumlu etkisi farklı durumlarla açıklanmaktadır. Bunlardan ilki toplam boşluk oranını azaltması ile ilişkilidir. Özellikle çimento hamuru içindeki kılcal porozite ve jel porozitesi, betonun dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [23,24]. NS kullanmak, çimento hamurunun toplam porozitesini azaltarak mekanik özellikleri iyileştirebilir. İkincisi ise NS tanelerinin ultra ince tane boyut yapıları ve yüksek SiO₂ içerikleri ile malzemeye yüksek pozolanik özellik katmalarıdır [25,26]. Bu nano partiküller, çimento hidratasyonu (birincil reaksiyon) sonucu oluşan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girer ve ikincil bir Kalsiyum-Silikat-Hidrat (C-S-H) jelini üretir [27-29]. Bu jel, betonun sertleşmesine katkıda bulunarak, basınç dayanımı artırmaktadır. Ca(OH)₂ kristalleri nano silika tarafından emilebilir. Bu da kristallerin hem boyutunu hem de miktarını azaltır ve agrega-çimento ara yüzeyinin iyileşmesini sağlar. Ara yüzeyi iyileşen betonun mekanik ve dayanıklılık özellikleri de zamanla iyileşir [30]. Hatta NS'nin düşük dozlarda kullanılmasının bile, erken yaşlarda basınç dayanımında önemli bir artışa neden olabileceği yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur [31-33].

Bu çalışma kapsamında elde edilen ve literatürde yer alan birçok çalışmanın aksine, artan NS içeriği ile basınç

dayanımının azaldığı da belirtilmektedir [34]. Basınç dayanımında azalma görülen çalışmalarda, nano malzemelerin matriks içerisinde homojen olarak dağılmadan topraklanmasının bu sonuca sebep olduğu vurgulanmıştır. Bu nedenle optimum oranda NS kullanılarak ve nano malzemenin homojen şekilde dağılmasını sağlayarak en iyi performans elde edilebilir.

Tablo 4. Basınç dayanımı sonuçları

	Basınç Dayanımı (MPa)			
	R	NS1	NS2	NS4
3.gün	26.24	30.46	27.75	28.15
7.gün	33.61	33.91	31.13	36.79
28.gün	37.16	37.64	41.25	45.46
90.gün	42.27	44.71	46.64	50.27

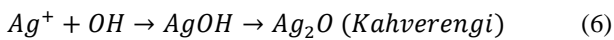
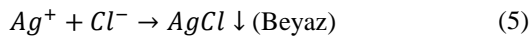


Şekil 4. Basınç dayanımı sonuçları

3.4 Klorür geçirirliği

Klorür geçirirliği, klorür iyonlarının beton ortamına nüfuz yeteneği olarak tanımlanabilir. Betonarme bir yapıdaki donatılar klorür kaynaklı korozyon nedeniyle ciddi şekilde hasar görebileceğinden, betonun en önemli dayanıklılık özelliklerinden biri klorür geçirimsizliğidir. Yapılan birçok çalışma nano malzeme ilavesi ile çimento sistemlerin bu etki altında daha iyi performans sergilediğini göstermiştir [13-15, 35].

NS ilaveli harçların klorür penetrasyon katsayıları 28 ve 90 günlük numunelerde ölçülerek zamana bağlı davranış incelenmiştir. Deney sonunda yarma etkisi ile ikiye ayrılan numuneler üzerine püskürtülen ($AgNO_3$) ile klorür geçirirlik derinlikleri ölçülmüştür. Klorür iyonları ve gümüş nitratın tepkimesi sonucu; beyaz gümüş klorür ($AgCl$) (Denklem 4) ve koyu kahve gümüş oksit (Ag_2O) (Denklem 5) oluşmaktadır [36].

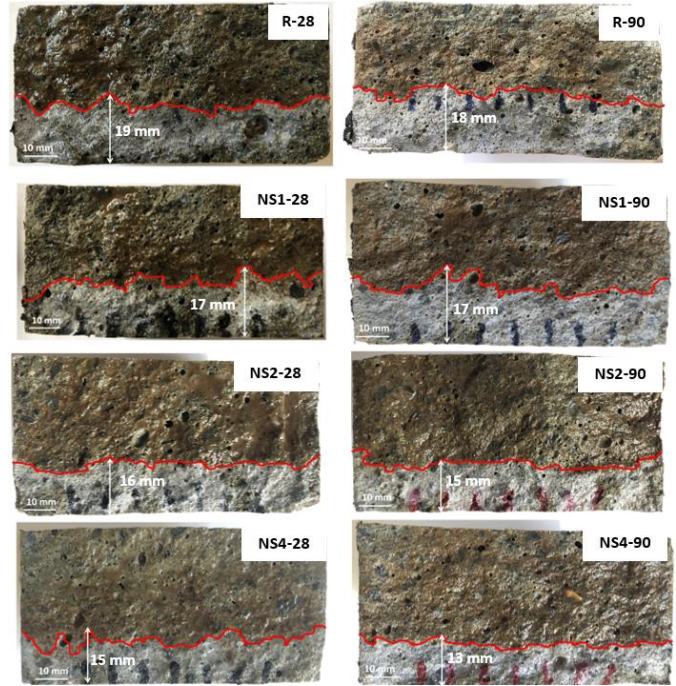


Tüm serilere ait klorür işleme derinlikleri Şekil 5'te verilmiştir. En yüksek derinliğin 28 ve 90 günlük referans seride sırasıyla 19 mm ve 18 mm olarak ölçüldüğü, NS ilavesinin ve numune yaşının artması ile de işleme derinliğinin azaldığı görülmüştür. En düşük işleme derinliği

%4 NS ilave edilen 90 günlük numunede 13 mm olarak ölçülmüştür. Kontrol numunesi (R) ile karşılaştırıldığında, NS ilavesiyle harçlarda geçebilecek klorür iyonlarının miktarı önemli ölçüde azalmıştır.

Tablo 5. Klorür penetrasyon katsayıları

	$D_{nssm} \times 10^{-12} (m^2/s)$	
	28.gün	90.gün
R	13.69	10.54
NS1	11.98	9.72
NS2	11.28	8.35
NS4	8.66	6.34

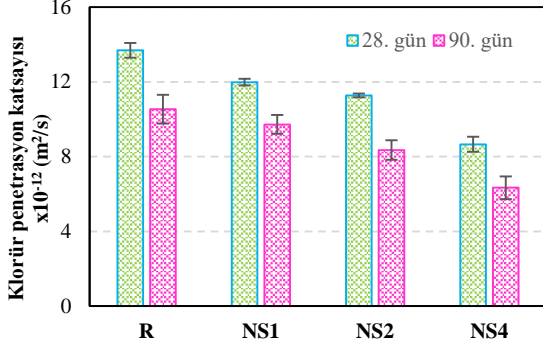


Şekil 5. Tüm serilerin klorür işleme derinlikleri

Klorür penetrasyon katsayıları sonuçları Tablo 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. 28. gün sonuçlarına göre %1 ve %2 NS ilavesi ile yaklaşık olarak %10 azalan klorür penetrasyon katsayısı, %4 NS kullanılan seride %35 oranında azalmıştır. 90 günlük sonuçlar incelendiğinde ise tüm serilerde zamana bağlı olarak katsayılar azalma olduğu görülmüştür. Referans seriyeye kıyasla NS1, NS2 ve NS4 karışımlarında sırasıyla %8, %11 ve %40'lık azalma olmuştur. NS'nin ince tane yapısı sayesinde kılcal boşlukları azaltması ve küçük boyutlu C-S-H jelinin çökmesiyle yoğun mikro yapıların oluşması ile açıklanmaktadır [37].

Yapılan çalışmaların çoğunda NS ilavesi ile klorür penetrasyon katsayısının ciddi oranlarda azaldığı vurgulanmıştır [13,14, 8,37]. Burada dikkat edilmesi gereken durum optimum NS miktarının belirlenmesi ve NS'nin matriks içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Aksi durumda NS'nin topraklandığı ve beklenen iyileşmeyi sağlamadığı yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur. Buna ek olarak, NS'nin klorür penetrasyonu üzerindeki etkisi

su/çimento oranının azalmasıyla birlikte artar. Su/çimento oranının düşük olduğu durumlarda NS'nin çimento hidrasyonunu hızlandırmada etkin rol oynadığı belirtilmiştir [38].



Şekil 6. Klorür penetrasyon katsayıları

4 Sonuçlar

Bu çalışmada nano silika ilaveli çimento esaslı harçların dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Farklı oranlarda (%1, %2 ve %4) nano silika ilavesinin dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisi ortaya konmuştur. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Nano silika oranının artması taze hal özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Referans seri ile benzer yayılma çaplarının elde edilebilmesi için artan nano silika oranına paralel olarak akışkanlaştırıcı miktarı da artırılmıştır.
- Zamana bağlı olarak 28. ve 90. günde incelenen kılcal su emme değerlerinin, hem zamanla hem de nano silikanın varlığı ile iyileştiği görülmüştür. En yüksek oranda (%4) nano silika kullanılan NS4 serisinin başlangıç kılcal su emme katsayısı 28. günde %35 azalırken, 90. günde %80 oranında bir azalma tespit edilmiştir.
- Basınç dayanımı gelişimini incelemek için 3.,7.,28. ve 90. günde yapılan basınç testinde %2 ve %4 NS ilavesi ile erken yaşlardan itibaren basınç dayanımında artış olduğu, %4 NS kullanımı ile en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği görülmüştür. %1 NS ilavesi ile 3 günlük basınç dayanımında artış görülmesine rağmen, diğer günlerde referans seriye benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- Klorür penetrasyon katsayısının belirlenmesi için yapılan klorür testleri 28 ve 90 günlük numunelerde tekrarlanmıştır. 28. gün sonuçlarına göre %1 ve %2 NS ilavesi ile ~%10 azalan klorür penetrasyon katsayısı, %4 NS kullanılan seride %35 oranında azalmıştır. 90 günlük seriler ise referans seriye kıyasla NS1, NS2 ve NS4 karışımlarında sırasıyla %8, %11 ve %40'lık azalma olmuştur.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde nano silika ilavesi ile işlenebilirlik özelliklerinin olumsuz etkilenmesine rağmen uygun karışım oranları ile boşluk yapısının azaldığı, su emme özelliklerinin iyileştirildiği ve buna bağlı olarak basınç dayanımının ve klorür geçirirliliğinin azaldığı görülmüştür.

Nano malzemenin matris içerisinde homojen olarak dağıtılmasının sağlanması koşulu ile %4 gibi yüksek bir oranda da nano silika kullanımının mümkün olduğu ve harç özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. İleride yapılacak çalışmalarda nano malzemelerin ön işlemlerle suda veya farklı kimyasal ortamlarda dağıtılması sonrasında testlerin tekrarlanması ve ön işlemlerin etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Çalışmadaki verilerin düzenlenmesi konusunda desteklerini benden esirgemeyen sevgili meslektaşım Dr. Şerife ÖZATA'ya teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] Y. Reches, Nanoparticles as concrete additives: Review and perspectives. *Construction Building Materials* 175,483–495, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.214>.
- [2] B. Liu, C. Zhu, K. Zhuang, L. Shuai, D. Li, W. Long, F. Xing, Y. Fang, Insights into the Microstructure of Hydrothermal Synthesized Nanoscale K₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O Particles, *Nanomaterials*, 10, 63 10:63, 2019. <https://doi.org/10.3390/NANO10010063>
- [3] S. Kawashima, P. Hou, DJ. Corr, SP. Shah, Modification of cement-based materials with nanoparticles. *Cement and Concrete Composites* 36, 8–15, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2012.06.012>
- [4] K. Sobolev, Modern developments related to nanotechnology and nanoengineering of concrete. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10,2 10:131–141, 2016. <https://doi.org/10.1007/S11709-016-0343-0>
- [5] B. Liu, J. Yang, D. Li, F. Xing, Y. Fang, Effect of a Synthetic Nano-CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O Gel on the Early-Stage Shrinkage Performance of Alkali-Activated Slag Mortars, *Materials*, 11, 1128 11,1128, 2018. <https://doi.org/10.3390/MA11071128>
- [6] P. Hou, S. Kawashima, D. Kong, DJ. Corr, J. Qian, Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property. *Composites Part B: Engineering*, 45,440–448, 2013. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2012.05.056>
- [7] D., Hou, H. Ma, Z. Li, Morphology of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel: a molecular dynamic study, *Advances in Cement Research*, 27,135–146, 2015. <https://doi.org/10.1680/ADCR.13.00079>
- [8] Y. Sargam, K. Wang, Influence of dispersants and dispersion on properties of nanosilica modified cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, 118:103969, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103969>
- [9] L. Senff, JA. Labrincha, VM, Ferreira, D. Hotza, WL. Repette, Effect of nano-silica on rheology and fresh

- properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, 23, 2487–2491, 2009. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.02.005>
- [10] P. Hou, J. Qian, X. Cheng, SP. Shah, Effects of the pozzolanic reactivity of nanoSiO₂ on cement-based materials. *Cement and Concrete Composites*, 55,250–258, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2014.09.014>
- [11] M. Khan, S.H. Chu, X.W. Deng, Y. Wang, Protection of steel tube against corrosion using self-prestressing UHPC prepared with expansive agent and steel fibers, *Structures* 37, 95–108, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.12.076>
- [12] M. Khan, M. Cao, S.H. Chu, M. Ali, Properties of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete exposed to different surrounding conditions, *Construction and Building Materials*, 322, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126340>
- [13] I. Diaz-Pena, R. Gonzalez-Lopez, M. Sanchez, M. Alonso, A. Zaldivar-Cadena, J. Hernandez-Sandoval, A. Guzman, Effect of the electrochemical migration of colloidal nano-SiO₂ on the durability performance of hardened cement mortar *International Journal of Electrochemical Science*, 10, 10261–10271 2015. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)11258-2](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)11258-2)
- [14] R. Sulc, M. Himmel, J. Nemecek, Chloride resistance of nanoparticle repaired concrete measured by accelerated tests, *Key Engineering Materials*, 91–95, 2018. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.760.91>
- [15] S. Bai, L. Yu, X. Guan,, H. Li, J. Ou, Study on the long-term chloride permeability of nano-silica modified cement pastes cured at negative temperature, *Journal of Building Engineering* 57, 104854, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104854>
- [16] M.H. Zhang, H. Li, Pore structure and chloride permeability of concrete containing nano-particles for pavement, *Construction and Building Materials*, 25 (2) 608–616, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.032>
- [17] H. Yang, M. Monasterio, D. Zheng, H. Cui, W. Tang, X. Bao, X. Chen, Effects of nano silica on the properties of cement-based materials: A comprehensive review, *Construction and Building Materials*, 282 122715, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122715>
- [18] H. Du, S. Du, X. Liu, Durability performances of concrete with nano-silica, *Construction and Building Materials*,73, 705–712, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014>
- [19] A. Givi, S. Abdul Rashid, F. Abdul aziz, A. Salleh, Investigations on the development of the permeability properties of binary blended concrete with nano-SiO₂ particles, *Journal of Composite Materials*, 45 1931–1938, 2011. <https://doi.org/10.1177/0021998310389091>.
- [20] H. Du, S. Du, X. Liu, Effect of nano-silica on the mechanical and transport properties of lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 82 114–122, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.026>.
- [21] M. Jalal, A. Pouladkhan, O.F. Harandi, D. Jafari, RETRACTED: comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete, *Construction and Building Materials*, 94 90–104, 2015.,<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001>
- [22] A. Naji, S. Abdul, F. Nora, A. Aziz, M. Amran, M. Salleh, The Effects of Lime Solution on the Properties of SiO₂ Nanoparticles Binary Blended Concrete, *Composites: Part B, Engineering*, Vol.42, Issue 3, pp. 562–569, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.10.002>
- [23] W. Kurdowski, *Cement and concrete chemistry*, Springer Science & Business,2014.
- [24] F.W.H. Taylor, *Cement chemistry /*, 2nd ed.,, Thomas Telford, 1997.
- [25] J. Ying, B. Zhou, J. Xiao, Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 150 49–55, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.168>.
- [26] R.B. Ardalan, N. Jamshidi, H. Arabameri, A. Joshaghani, M. Mehrinejad, P. Sharafi, Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO₂ oxide and spraying nanosilicon practices, *Construction and Building Materials* 146 128–135, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.078>.
- [27] M.S.M. Norhasri, M.S. Hamidah, A.M. Fadzil, Applications of using nano material in concrete: a review, *Construction and Building Materials* 133, 91–97, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005>.
- [28] A. Taher, A. Tawfik, Magdy. SA. El-Yamani, A. El-Aleem, Gh M. Serag Gabr, Abd El-Hafez, Effect of nano-silica and nano-waste material on durability, *Asian Journal of Civil Engineering*, 20, 135-147, 2018. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0093-5>.
- [29] B.S.M.M.S. Liew, S. Wesam, C.Y.H. Alaloul, Veerendrakumar C. Khed, Adamu Musa, Properties of nano-silica modified pervious concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 8 409-422, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.03.009>.
- [30] T. Ji, Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating, nano-SiO₂, *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1943–1947, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004>
- [31] J. Sun, X. Shen, G. Tan, J.E. Tanner, Modification effects of nano-SiO₂ on early compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 04019057, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002665](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002665).
- [32] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, L. Durães, The effect of nanosilica addition on flowability strength and

- transport properties of ultra high performance concrete, *Materials Design* 59 1–9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.051>
- [33] M. Zhang, J. Islam, S. Peethamparan, Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag, *Cement & Concrete Composites*, 34 650–662, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.005>
- [34] S. Bai, X. Guan, H. Li, J. Ou, Effect of the specific surface area of nano-silica particle on the properties of cement paste, *Powder Technology*, 392 680–689, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.045>
- [35] M. Tabish, MM. Zaheer, A. Baqi, Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review *Journal of Building Engineering*, 65 105676, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105676>
- [36] B. Akturk, AB. Kizilkanat, Improvement of durability and drying shrinkage of sodium carbonate activated slag through the incorporation of calcium hydroxide and sodium hydroxide, *Construction and Building Materials* 243 118260, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118260>
- [37] G. Quercia, P. Spiesz, G. Husken, H.J.H. Brouwers, SCC modification by use of amorphous nano-silica, *Cement and Concrete Composites*, 45 69–81, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.001>
- [38] R. Liu, H. Xiao, H. Li, L. Sun, Z. Pi, G.Q. Waqar, T. Du, L. Yu, Effects of nano-SiO₂ on the permeability-related properties of cement-based composites with different water/cement ratios, *Journal of Materials Science*, 53 4974–4986, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1906-8>.

