KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29(3), 2026
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 29(3), 2026
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 24.03.2026
Kabul Tarihi : 23.07.2026

Received Date : 24.03.2026
Accepted Date : 23.07.2026

SODYUM NEFELİNLİSİYENİT KATKILI KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN HARÇLARIN PERFORMANS ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE PROPERTIES OF SELF-COMPACTING MORTARS CONTAINING SODIUM NEPHELINE SYENITE

Betül PAKÖZ[1*] *(ORCID: 0000-0002-8613-8419)*
Serkan ETLİ[2] (ORCID: 0000-0003-3093-4106)

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
[2] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Betül PAKÖZ, betulpakoz@ksu.edu.tr

ÖZET

Teknolojik gelişmelerle birlikte yapı sektöründe kullanılan katkı malzemeleri, taze ve sertleşmiş durumdaki malzemelerin performansını artırmaya yönelik yeni olanaklar sunmaktadır. Artan yapı üretimine paralel olarak beton teknolojisinde de malzeme tasarımı ve uygulama yöntemleri hızla gelişmekte, performans odaklı çözümler önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, kendiliğinden yerleşen harçlarda (KYH) sodyum nefelinlisiyenit katkılarının etkileri incelenmiştir. Nefelinlisiyenit mineralinin KYH sistemlerinde kullanımına ilişkin çalışmaların sınırlı sayıda olması, bu katkının etkilerinin araştırılmasını bilimsel açıdan önemli kılmaktadır. Deneysel program kapsamında biri referans olmak üzere toplam dört farklı karışım hazırlanmıştır. Üç karışımda sodyum nefelinlisiyenit bağlayıcı miktarının %5, %10 ve %15'i oranlarında kullanılmıştır. Tüm karışımlarda EFNARC ve diğer standartların kriterlerinin sağlanması hedeflenmiştir. Sonuçlar, sodyum nefelinlisiyenit katkısının optimum oranlarda kullanılması halinde hem mekanik performans hem de aşınma direnci açısından olumlu katkılar sağlayabildiğini göstermektedir. Bu araştırma çıktılarının sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine ve literatürdeki eksikliklerin giderilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen harç (KYH), nefelinlisiyenit, aşınma direnci, işlenebilirlik, mekanik dayanım

ABSTRACT

Recent advances in concrete technology have increasingly focused on the development of performance-based and sustainable cementitious materials through the incorporation of mineral admixtures. In this context, the present study investigates the influence of sodium nepheline syenite (NaNs) on the fresh-state behavior, mechanical properties, and durability performance of self-compacting mortars (SCMs). Despite the growing interest in alternative aluminosilicate resources, studies addressing the use of nepheline syenite in SCM systems remain limited. Within the experimental program, four mixtures including one reference mixture were produced, and NaNs was incorporated at replacement levels of 5%, 10%, and 15% by binder weight. All mixtures were designed in accordance with EFNARC recommendations and relevant standards. The experimental results demonstrated that NaNs acted predominantly as a low-reactive mineral filler, improving particle packing and matrix densification at optimum replacement levels. In particular, moderate NaNs incorporation enhanced mechanical performance and abrasion resistance, whereas excessive replacement ratios adversely affected the microstructure and strength development. The findings indicate that NaNs has considerable potential as an alternative mineral additive for the production of sustainable and high-performance self-compacting cementitious composites.

Keywords: Self-compacting mortar (SCM), nepheline syenite, abrasion resistance, workability, mechanical strengh

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

GİRİŞ

Nefelinli siyenit, başlıca nefelin minerali ile albit, ortoklaz ve mikroklin gibi alkali feldispatlardan oluşan, açık renkli, iri kristalli ve düşük silis içeriğine sahip plütonik magmatik bir kayaçtır. Mineralojik yapısında biyotit, hornblend, öjit, ejirin ve sodalit gibi mafik mineraller ile zirkon, apatit, manyetit ve granat gibi aksesuar fazlar da bulunabilmektedir. Yüksek alkali ve alümina içeriği, düşük demir oranı, serbest kuvars içermemesi ve kolay ergiyebilme özelliği sayesinde seramik, cam, boya ve refrakter sanayilerinde önemli bir hammadde olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında mekanik dayanımı ve atmosferik koşullara karşı direnci nedeniyle asfalt karışımları, çatı kaplama granülleri, beton agregaları ve çimento esaslı sistemlerde de kullanım potansiyeline sahiptir. İnce öğütülmüş formları özellikle seramik ve tuğla üretiminde akı maddesi olarak tercih edilirken, kimyasal kararlılığı pigment ve dolgu uygulamalarında kullanımına olanak sağlamaktadır. Dünya genelinde Rusya, Kanada, Norveç, Brezilya, ABD, Çin ve Türkiye'de ekonomik olarak üretilmekte olup, Türkiye'de özellikle Kırşehir Masifi'nde bulunan nefelinli siyenit oluşumları önemli bir feldispat alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Yapılan zenginleştirme çalışmaları sonucunda bu kaynakların alkali içerik bakımından uluslararası ticari örneklerle benzer seviyelere ulaşabildiği ve endüstriyel kullanım açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir (Haner & Demir, 2018; McLemore vd., 2006; MTA, 2016).

Son yıllarda araştırılan alternatif mineral kaynakları arasında nefelinli siyenit, kendine özgü kimyasal bileşimi ve mineralojik yapısı nedeniyle dikkat çeken bir malzeme haline gelmiştir. Nefelinli siyenit, kendine özgü mineralojik ve kimyasal bileşimi nedeniyle alternatif mineral katkı olarak giderek daha fazla dikkat çeken alkali alüminosilikat esaslı feldspatik bir magmatik kayaçtır. Genellikle açık renkli, orta veya iri taneli yapıya sahip olan bu kayaç; başlıca nefelin [$(Na,K)AlSiO_4$], albit ($NaAlSi_3O_8$), ortoklaz ve mikroklin gibi alkali feldispatlar ($KAlSi_3O_8$) ile az miktarda biyotit fazlarından oluşmakta ve kristalin silis içermemektedir. Özellikle yüksek Na_2O, K_2O, Al_2O_3 ve SiO_2 içeriği ile düşük demir konsantrasyonu, nefelinli siyeniti çimento esaslı ve seramik uygulamalar için umut verici bir mineral katkı haline getirmektedir. (Bagani vd., 2021; Jena et vd., 2014).

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar, nefelinli siyenit ve nefelinli siyenit kökenli atıkların özellikle yapı malzemeleri, seramik sistemler ve sürdürülebilir endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Yapılan araştırmalarda nefelinli siyenitin ince agrega veya mineral katkı olarak kullanılmasıyla mikroyapı yoğunluğunun arttığı, gözenek boyutu ve boşluk sürekliliğinin azaldığı, buna bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımı, donma direnci ve dayanıklılık özelliklerinde iyileşmeler sağlandığı belirlenmiştir. Özellikle düşük ve optimum katkı oranlarında nefelinli siyenitin dolgu etkisi ve camsılaşmayı teşvik eden yapısı sayesinde matrisin daha kompakt hale geldiği, ek jel oluşumlarını desteklediği ve su emme davranışını olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir. Bunun yanında nefelinli siyenit zenginleştirme atıklarıyla üretilen harçların reolojik davranışlarının incelendiği çalışmalarda, bu atıkların doğal ince agregaya alternatif olarak kullanılabileceği ve sürdürülebilir yapı malzemesi üretimine katkı sağlayabileceği ortaya konmuştur. Ayrıca nefelinli siyenit atıklarının yalnızca yapı malzemelerinde değil; metalurji, tarım ve kritik mineral geri kazanımı gibi farklı alanlarda da değerlendirilebileceği belirtilmektedir. Özellikle biyotit gibi Li içeren mineraller sayesinde nefelinli siyenit atıklarından lityum geri kazanımının mümkün olması, bu malzemelerin ekonomik ve çevresel açıdan değerini artırmaktadır. Tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, nefelinli siyenit ve türevi atıkların hem doğal kaynak tüketiminin azaltılması hem de atık geri kazanımı yoluyla sürdürülebilir ve döngüsel ekonomi yaklaşımına katkı sağlayabilecek çok yönlü alternatif malzemeler olduğu anlaşılmaktadır (Kamseu vd., 2016; Pranckevičienė, vd., 2023; Rosa vd., 2024; Santos vd., 2025; Üçerler-Çamur, Z. vd., 2026).

Son yıllarda nefelinli siyenitin endüstriyel hammadde ve sürdürülebilir bir mineral kaynak olarak kullanımına yönelik çalışmalar önemli ölçüde artmıştır. Yüksek alkali ve alümina içeriği sayesinde özellikle seramik, cam ve yapı malzemelerinde alternatif katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceği belirtilmektedir. Bununla birlikte, nefelinli siyenitin kendiliğinden yerleşen harç (KYH) sistemlerindeki performansına yönelik çalışmaların hâlen sınırlı olduğu görülmektedir. Literatürde, nefelin içeren madencilik atıklarının jeopolimer ve katkılı çimento sistemlerinde aktif katkı sağlayarak bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği rapor edilmiştir. Ayrıca bu malzemelerin yapı mühendisliği uygulamalarında kullanım potansiyeline sahip olduğu ifade edilmektedir. %5, %10 ve %15 oranlarında sodyum nefelinli siyenit (NaNs) içeren KYH karışımları üzerinde gerçekleştirilen çalışmalarda ise EFNARC işlenebilirlik kriterlerinin sağlanabildiği, ancak katkının su ihtiyacını artırarak akış davranışını etkilediği ve bu nedenle akışkanlaştırıcı optimizasyonunun gerekli olduğu belirlenmiştir. (Paköz vd., 2026).

Nefelinli siyenit, çimento esaslı sistemlerde düşük reaktif veya yarı inert bir mineral katkı olarak değerlendirilebilir. Performansa katkısı, güçlü puzolanik reaksiyonlardan ziyade dolgu etkisi, tane paketlenmesinin iyileştirilmesi ve mikroyapı yoğunlaşması ile ilişkilidir. Nefelin siyenitin seramik ve jeopolimer sistemlerde kullanımı üzerine çalışmalar yapılmış olmasına rağmen, kendiliğinden yerleşen harç sistemlerindeki kullanımına odaklanan çalışmalar hâlen sınırlıdır. Özellikle NaNs katkısının KYH'lerin işlenebilirlik, mekanik dayanım, sorptivite davranışı ve aşınma direnci üzerindeki etkileri sistematik olarak değerlendirilmemiştir. Bu nedenle, bu çalışmada farklı NaNs ikame oranlarının KYH'lerin taze hal, mekanik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması ve optimum kullanım seviyesinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, kendiliğinden yerleşen harç sistemlerinde NaNs katkı kullanımının taze ve sertleşmiş hal performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu doğrultuda biri kontrol karışımı olmak üzere farklı katkı oranlarında hazırlanan karışımlar üzerinde işlenebilirlik, mekanik dayanım ve aşınma direnci deneyleri gerçekleştirilmiştir. Nehir kumu, CEM I 42,5 R çimento, polikarboksilat esaslı YPSAKK ve %5, %10 ve %15 oranlarında sodyum nefelin siyenit ikamesi kullanılarak üretilen harçların taze, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini sistematik olarak incelenmiştir. Karışımlar, kontrol numunesi ile birlikte farklı NaNs ikame oranlarına sahip dört seri halinde tasarlanmış; tüm karışımlarda su ve agrega miktarı sabit tutulurken bağlayıcı bileşenler üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Üretim sürecinde önce kuru bileşenler karıştırılmış, ardından su kademeli olarak eklenmiş ve son aşamada katkı ilave edilerek yaklaşık 5 dakikalık bir karışım prosedürü uygulanmıştır. Taze karışımın işlenebilirliği EFNARC esaslı slump akış testi ile değerlendirilmiştir. EFNARC, kendiliğinden yerleşen beton ve harçların tasarımı ve performans değerlendirilmesine yönelik rehberler yayımlayan uluslararası bir kuruluştur. EFNARC tarafından yayımlanan "Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete" dokümanı, bu tür malzemelerin taze ve sertleşmiş hal özelliklerine ilişkin kabul kriterlerini tanımlayan temel referans kaynaklardan biridir. Bu nedenle EFNARC kriterleri, kendiliğinden yerleşen beton ve harçların performansının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan standart bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir. Daha sonra numuneler kalıplara dökülerek 24 saat laboratuvar ortamında kürlenmiş ve test yaşlarına kadar su küründe bekletilmiştir. Çalışmada 40×40×160 mm prizma numuneler üzerinden eğilme, basınç, su emme ve Arşimed yoğunluk/porozite deneyleri; 71×71×71 mm küp numuneler üzerinden ise aşınma direnci ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler 0., 7., 28. ve 56. günlerde planlanmış; böylece NaNs ikamesinin taze harç davranışı, erken ve ileri yaş dayanımı ile dayanıklılık performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Çalışmayı özetleyen flow chart Şekil 1'de verilmektedir. Bu kapsamda elde edilen bulgular, taze hal performansı ile mekanik ve dayanıklılık özellikleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmeye ve nefelin siyenit katkısının optimum kullanım düzeyini belirlemeye yönelik bir çerçeve sunmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda NaNs kullanımının optimum oranları belirlenmeye çalışılmış ve bu katkının kendiliğinden yerleşen harç tasarımında alternatif bir mineral katkı olarak kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

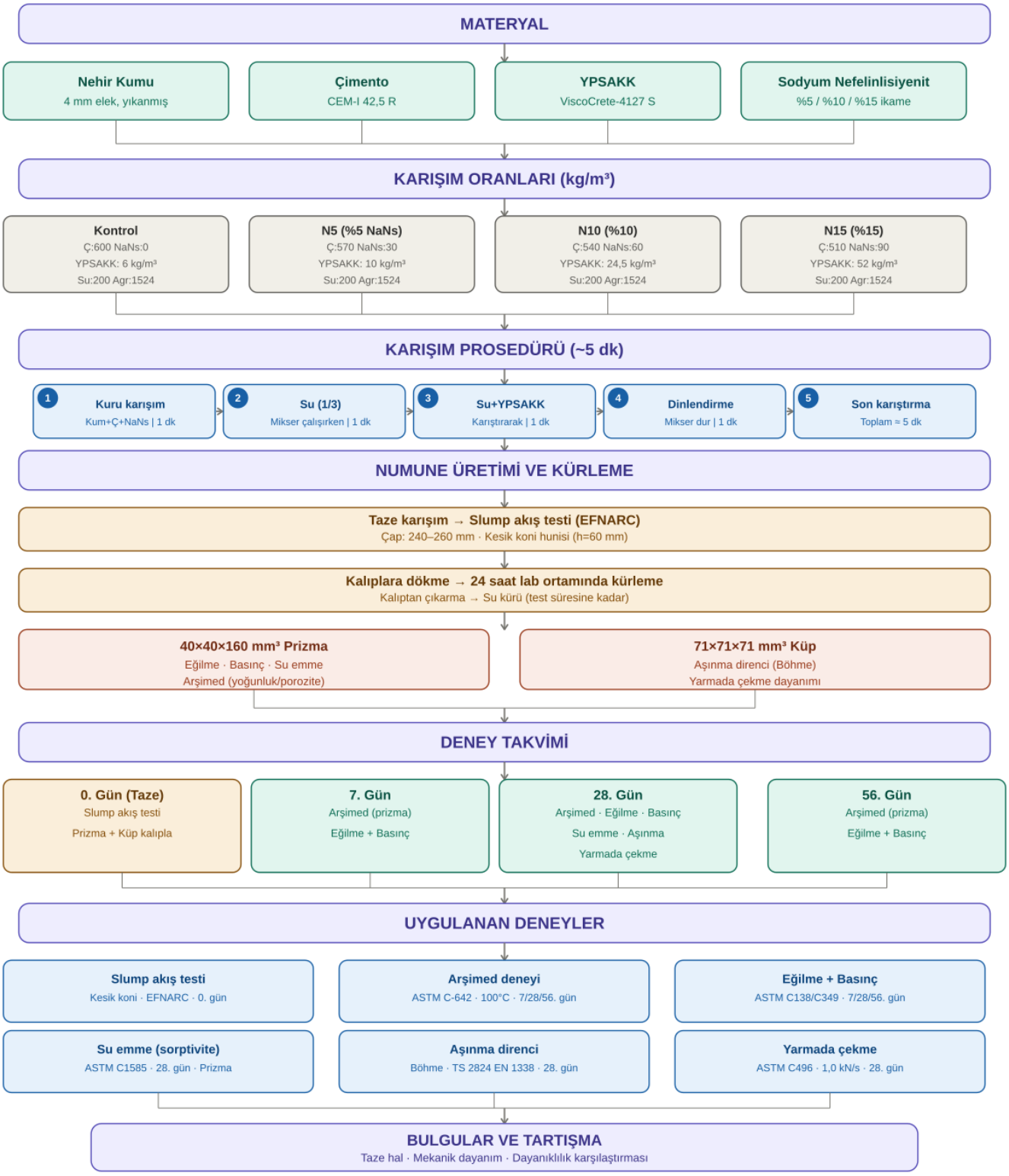
Bu çalışmanın temel araştırma sorusu, sodyum nefelinli siyenitin kendiliğinden yerleşen harçlarda mineral katkı olarak kullanılmasının taze hal özellikleri, mekanik dayanım ve dayanıklılık performansı üzerinde anlamlı bir iyileşme sağlayıp sağlamadığıdır. Bu kapsamda geliştirilen araştırma hipotezi, uygun ikame oranlarında kullanılan NaNs'nin ince tane dolgu etkisi ve tane paketlenmesini iyileştirerek matris yoğunluğunu artıracağı, böylece işlenebilirlik kriterlerini korurken mekanik ve dayanıklılık performansını geliştireceği; buna karşılık yüksek ikame oranlarında ise bağlayıcı fazın seyrelmesi ve artan kimyasal katkı gereksinimi nedeniyle performansın olumsuz etkilenebileceğidir. Geliştirilen kendiliğinden yerleşen harçların özellikle prefabrike yapı elemanları, yoğun donatı içeren betonarme elemanlar, tamir ve güçlendirme harçları ile yüksek aşınma direnci gerektiren endüstriyel zemin uygulamalarında kullanılabilirliği hedeflenmiştir. Bu nedenle deney programı; işlenebilirlik, birim hacim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımı, su emme, aşınma direnci ve yarmada çekme dayanımı gibi söz konusu uygulamalar için kritik performans parametrelerini kapsayacak şekilde tasarlanmış ve farklı NaNs ikame oranlarının mühendislik performansı bütüncül olarak değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOD

Materyal

Karışımlarda Sodyum Nefelinlisiyenit (NaNs) (Şekil 2(d)), çimento, nehir kumu, akışkanlaştırıcı ve şebeke suyu kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin özellikleri ve gerekli teknik şartnameleri aşağıda sunulmuştur. KYH karışımlarında kullanılan kum, 4 mm elekten geçirilmiş yıkanmış nehir kumudur (Şekil 2(a)). Nehir kumunun özgül ağırlığı 2,64 g/cm³ ve su emme kapasitesi %2,41'dir. Kullanılan çimento sınıfı CEM-I 42.5 R'dir (Şekil 2(b)) ve

üreticiden elde edilen kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Tüm KYH'lerin EFNARC standartlarına uygun yeterli işlenebilirlik özelliklerine sahip olması için su ve polikarboksilat esaslı yüksek performanslı su azaltıcı kimyasal katkı (YPSAKK) kullanılmıştır. YPSAKK olarak kullanılan ürün, Sika markası ViscoCrete-4127 S Hi-Tech (Şekil 2(c)) olup, yeni nesil polikarboksilat esaslı beton ve harç katkısıdır ve özgül ağırlığı 1,085 g/cm³'tür.



Şekil 1. Çalışmaya Ait Flow Chart

Şekil 2. KYH Karışımlarında Kullanılan Malzemeler

Tablo 1. CEM I 42,5 R Fiziksel ve Kimyasal Özellikler

Kimyasal İçerik	(%)
SiO_2	18.76
Al_2O_3	4.76
Fe_2O_3	3.13
CaO	63.48
MgO	1.02
K_2O	0.97
Na_2O	0.16
SO_3	3.08
Çözünmeyen Kalıntı	0.28
Yanma Kaybı	3.87
Blaine (cm^2/g)	3940

Deneylerde kullanılan nehir kumu, TS EN 12620 standardına uygun olarak temin edilmiş olup 0–5 mm tane boyutuna sahiptir. Yapılan elek analizi sonucunda agreganın sürekli gradasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Mineralojik açıdan ise nehir kumu ağırlıklı olarak kuvars (SiO_2) içermekte olup, bunun yanında düşük oranlarda feldispat, mika ve çeşitli kayaç parçacıkları bulunmaktadır. Kuvarsın yüksek sertliği ve kimyasal kararlılığı, harçların mekanik performansı ve dayanıklılığı açısından uygun bir ince agrega kullanılmasını sağlamaktadır (Tablo 2 ve Tablo 3).

Karışım Oranları ve Numune Hazırlanması

Çalışmada üretilen karışımların oranları Tablo 4'te verilmiştir. Karışımlar için uygulanan karıştırma prosedürü şu şekildedir;

- Kum, çimento ve NaNs'den oluşan kuru karışım, mikserde düşük hızda 1 dakika boyunca karıştırılmıştır.
- Mikser çalışır durumda iken karışım suyunun üçte biri yavaşça eklenmiş ve 1 dakika daha karıştırılmıştır.
- Kalan su ile YPSAKK karıştırılarak mikser içerisine ilave edilmiş ve 1 dakika süreyle daha karıştırılmıştır.
- Mikser durdurularak karışım 1 dakika dinlendirilmiştir.
- Dinlendirme sonrasında karışım 1 dakika daha karıştırılmış ve toplam karıştırma süresi yaklaşık 5 dakika olarak tamamlanmıştır.

Tablo 2. Deneylerde Kullanılan Nehir Kumunun Tane Boyutu Dağılımı

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)
4.00	100
2.00	93
1.00	76
0.50	54
0.25	29
0.125	12
0.063	3
Tava	0

Tablo 3. Deneylerde Kullanılan Nehir Kumunun Tipik Mineralojik Bileşimi

Mineral	Kimyasal Formül	Yaklaşık Oran (%)
Kuvars	SiO_2	88–94
Feldispat	$(Na,K)AlSi_3O_8$	3–8
Mika	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	1–3
Diğer kayaç parçacıkları	-	<2

Not: Mineralojik bileşim, doğal nehir kumlarının literatürde bildirilen tipik özellikleri ve tedarikçi teknik bilgileri esas alınarak verilmiştir. Çalışma kapsamında agrega üzerinde ayrıca XRD veya petrografik mineralojik analiz gerçekleştirilmemiştir.

Çalışmada bağlayıcı miktarı 600 kg/m³ olarak seçilmiştir. Bu değer, TS EN 196 standardına göre standart harç üretmek amacıyla değil, kendiliğinden yerleşen harç sistemlerinde yeterli macun hacmi, yüksek akıcılık, segregasyon direnci ve homojen bir matris yapısı sağlamak amacıyla belirlenmiştir. Kendiliğinden yerleşen harçlarda yüksek bağlayıcı içeriği, ince malzeme miktarını artırarak tane paketlenmesini iyileştirmekte, matris sürekliliğini geliştirmekte ve EFNARC tarafından önerilen işlenebilirlik kriterlerinin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Bu nedenle karışım tasarımı performans esaslı kendiliğinden yerleşen harç yaklaşımına göre oluşturulmuştur. Benzer şekilde, Etli (2024) tarafından geri dönüştürülmüş tuğla tozu içeren lif takviyeli kendiliğinden yerleşen harçlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmada da yaklaşık 600 kg/m³ seviyesinde bağlayıcı içeriği kullanılarak yüksek işlenebilirlik ve mekanik performans birlikte sağlanmıştır. Ayrıca Etli (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı mineral katkılar içeren kendiliğinden yerleşen harçların performansının optimize edilmesinde bağlayıcı miktarının ve ince malzeme hacminin belirleyici olduğu vurgulanmış; Etli (2024) tarafından kauçuk atığı içeren

kendiliğinden yerleşen harçlar üzerinde yapılan araştırmada ise benzer performans esaslı karışım tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan 600 kg/m³ bağlayıcı miktarı, hem literatürdeki güncel çalışmalar hem de önceki deneysel araştırmalar doğrultusunda tercih edilmiştir.

İnce agrega miktarı belirlenirken 1 m³ kendiliğinden yerleşen harç hacmi esas alınmıştır. Karışımı oluşturan çimento, NaNs, su ve kimyasal katkının birim hacim ağırlıkları dikkate alınarak kapladıkları hacimler hesaplanmış, ayrıca karışım içerisinde oluşabilecek yaklaşık %2 hapsolmuş hava hacmi öngörülmüştür. Bu hacimler toplam hacimden çıkarıldıktan sonra kalan hacim ince agrega ile tamamlanmış ve buna karşılık gelen yaklaşık 1594 kg/m³ ince agrega miktarı belirlenmiştir. Çalışmada NaNs çimentonun kütlece ikamesi olarak kullanıldığından, agrega miktarı tüm karışımlarda sabit tutulmuş; böylece performansta meydana gelen değişimlerin agrega miktarından değil, yalnızca NaNs ikame oranından kaynaklanması sağlanmıştır.

Tablo 4. KYH Karışım Oranları (kg/m^3)

Karışım	S/Ç	Çimento	NaNs	YPSAKK	Su	Agrega
Kontrol	0.37	600	-	6	200	1594
N5	0.37	570	30	10	200	1594
N10	0.37	540	60	24.5	200	1594
N15	0.37	510	90	52	200	1594

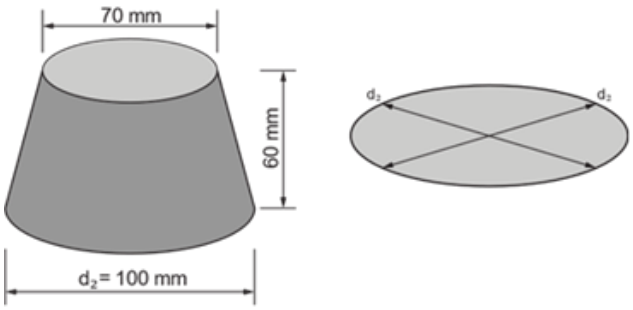
Metod

Deney programı, NaNs ilavesinin KYH'lerin hem taze hem de sertleşmiş hal özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. İşlenebilirliği belirlemek için yayılma tablası deneyleri gerçekleştirilirken, mikroyapı gelişimi ve dayanıklılık ile ilişkili davranışların değerlendirilmesi amacıyla yoğunluk ve sorptivite ölçümleri yapılmıştır. Mekanik deneyler ise NaNs katkısının yük taşıma kapasitesi ve çatlak direnci üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla uygulanmıştır.

Test numunelerinin üretimi, taze karışımların hazırlanması ile başlamıştır. Karışımlar önce görsel olarak incelenmiş, ardından KYH için EFNARC kriterlerine uygunluğunu doğrulamak amacıyla slump akış testi uygulanmıştır. Taze karışımlar daha sonra kalıplara dökülmüş ve laboratuvar ortamında 24 saat kürlenmeye bırakılmıştır. 24 saatin ardından numuneler kalıplardan çıkarılmış ve ilgili test süreleri boyunca suda kürlenmeye devam etmiştir. 40×40×160 mm³ boyutlarında prizma numuneler, eğilme ve basınç dayanımı gibi mekanik testler, su emme gibi dayanıklılık özelliklerinin değerlendirilmesi ve yoğunluğun fiziksel incelenmesi için üretilmiştir. Mekanik özellikler, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan aynı boyuttaki prizma numuneler üzerinde de incelenmiştir. Başka bir dayanıklılık değerlendirmesi için yüzey mekanik aşınma testi amacıyla 71×71×71 mm³ boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Benzer şekilde, 71×71×71 mm³ boyutlarındaki küp numuneler, yarmada çekme dayanımı testi için kullanılmıştır. Yapılan testlerle ilgili ayrıntılar alt başlıklarda sunulmuştur.

Slump Testi

EFNARC'a göre, KYH tipi karışımlarda yeterli akış ve yerleşim kriterlerini sağlamak için slump-akış çapı 240–260 mm arasında olmalıdır. Şekil 3'te gösterildiği gibi, yüksekliği 60 mm ve üst-alt çapları sırasıyla 100 mm ve 70 mm olan kesik koni şeklinde bir huni kullanılır. Huni, küçük çapı yukarı bakacak şekilde taze karışım ile doldurulduktan sonra dikey olarak kaldırılır ve karışım yatay olarak yayılır. Daha sonra çap, birbirine dik iki yönde ölçülür ve ortalaması alınır.



Şekil 3. Slump Testi

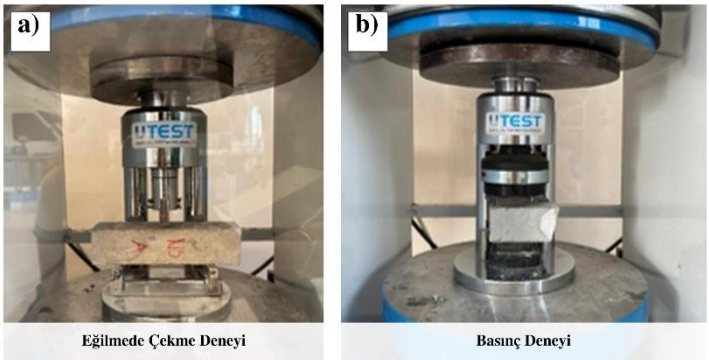
Arşimed Deneyi

Numunelerin değerlendirme sürecinde önemli bir faktör olan sertleşmiş halin deneysel kapasite özellikleri üzerindeki malzeme karışımının etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda, ilgili değerler, kür tankından alınan numuneler üzerinde 7., 28. ve 56. günlerde Arşimed cihazı ve fırın kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 4). Bu amaçla, literatürde geçmişten günümüze yapılan çalışmalarda kullanılan standartlara uygun olarak porozite ölçümleri için Archimedes cihazı ve fırın kullanılarak numunelerin ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Galle, C., 2001). Numuneler, ağırlıkları sabitlenene kadar 100 ± 2 °C'de 24 saat boyunca fırında tutulmuştur. Numunelerin porozitesi ASTM C-642 standardına göre hesaplanmıştır.

Şekil 4. Arşimed Deneyi

Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deneyleri

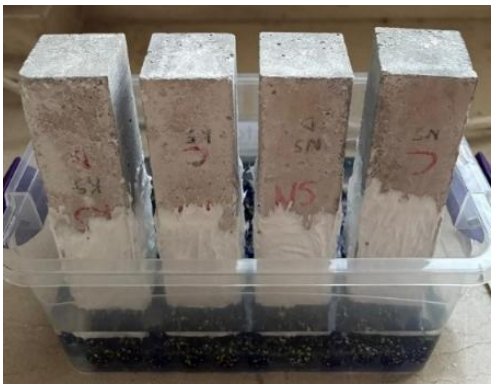
Mekanik özellikleri belirlemek için 40×40×160 mm³ boyutlarındaki numuneler öncelikle eğilme çekme dayanımı açısından test edilmiştir. 7, 28 ve 56. günlerde numuneler üzerinde çekme testleri gerçekleştirilmiş ve kırılan parçalar üzerinde basınç testleri uygulanmıştır. Çekme testinde, standart test yükleme hızı ilgili değerler ASTM C138 referans alınarak 0,044 kN/s yükleme hızı uygulanmıştır. Daha sonra kırılan prizma parçaları, ASTM C349 standardına göre basınç dayanımı testine tabi tutulmuş ve numunelere 1,35 kN/s yükleme hızı uygulanmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Eğilmede Çekme ve Basınç Dayanımı Deneyleri

Su Emme Deneyi

Su emme ile ilgili deneylerde, sonuçlar beton/harç karışım oranı, hava içeriği, hidratasyon derecesi, agrega özellikleri ve mikro çatlakların varlığı veya derecesi gibi birçok özellikten etkilenir. Betonun agresif çevrelere maruz kalması sonucunda matriste oluşan gözenek yapısı sorptivite ile iyi bir şekilde tanımlanır. Deney, ASTM C1585 standardına göre Şekil 6'da gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Test, 28 günlük ilk kürleme sürecinin ardından 40×40 mm kesit ve 160 mm derinliğe sahip numunelerde uygulanmıştır. Numune, sabit ağırlık elde edilene kadar 100 °C'de fırında kurutulmuş, ardından soğumaya bırakılmıştır. Beton numunenin kenarları su geçirmez silikon malzeme ile kaplanmıştır. Destek sağlamak amacıyla numunelerin altına bilyeler yerleştirilmiş ve kap, Şekil 6'da gösterildiği gibi musluk suyu ile doldurulmuştur. Su seviyesi bilyelerin 3–5 mm üzerinde olacak şekilde ayarlanmıştır. Ölçüm zamanları 0, 5, 10, 30, 60, 240 ve 1440 dakikadır. Numunenin başlangıç ağırlığı 0 dakikada alınmış, ardından numune 3–5 mm derinliğe kadar suya daldırılmış ve kronometre başlatılmıştır. Numune sudan çıkarılmış, fazla su silinmiş, kronometre durdurulmuş ve ağırlık kaydedilmiştir. Ölçümler, süre kesintisiz devam ederken belirlenen zaman aralıklarında gerçekleştirilmiş ve birim alan başına kütle artışı (mm^2) su yoğunluğuna göre zamanın kareköküne karşı grafiğe aktarılmıştır.



Şekil 6. Su Emme Deneyi

Aşınma Deneyi

Betonun yüzey aşınma direnci, inşaat mühendisliği yapılarının kullanım özellikleri açısından büyük önem taşır. Ancak, geleneksel betona göre daha yüksek mekanik performansa sahip KYH ve türlerinin üretim özellikleri ve içerikleri deneysel bağlamda aşınma davranışı açısından oldukça farklı olabileceğinden aşınma özelliklerinin kontrol edilmesi büyük önem arz etmektedir. Aşınma deneyleri için her karışımda üç adet 71 mm küp kullanılmıştır. 28 günlük kürleme süresi sonunda, KYH numunelerinin sürtünmeye bağlı aşınma kayıpları, TS 2824 EN 1338 standardına uygun olarak Böhme yüzey aşınma test cihazı ile belirlenmiştir (Şekil 7). Test öncesinde numunelerin başlangıç ağırlıkları her numune için ayrı ayrı kaydedilmiştir. Aşınma, Böhme cihazında numuneler döner diskin üzerine yerleştirilerek 294 N'lik bir kuvvet uygulanmasıyla değerlendirilmiştir. Cihazın çalışması sırasında numuneler ile disk arasına serpiştirilen 20 g korundum tozunun uyguladığı aşındırıcı etki göz önünde bulundurulmuştur. Test, her biri 22 döngüden oluşan 4 yüzeye olmak üzere numunelere toplam 16 kez uygulanmıştır. Testin sonunda numunelerdeki aşınma kayıpları, ağırlık ölçümleri ile belirlenmiştir.

Şekil 7. Aşınma Deneyi

Yarmada Çekme Deneyi

Yarmada çekme deneyi, silindirik bir numuneye dikey yönde uygulanan yük aracılığıyla yatay düzlemde çekme gerilmesi oluşturur ve malzemenin çatlak başlama, ilerleme ve genel kırılma davranışı hakkında kapsamlı bilgi sağlar. Bu test, özellikle beton ve harç gibi gevrek malzemelerin çekme dayanımını değerlendirmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Yarmada çekme dayanımını belirlemek için 71×71×71 mm³ boyutlarında numuneler hazırlanmış ve ASTM C496 standardında tanımlanan deney yöntemi uygulanmıştır. Numuneler için standartta belirtilen 0,7–1,4 MPa/dk aralığında bir yükleme hızı önerilmiş olup, deneyde 1,0 kN/s değerine uyulmuştur. Üretilen numuneler, 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından teste tabi tutulmuş ve bu süreç boyunca numunelerin homojenliğinin korunmasına dikkat edilmiştir (Şekil 8). Elde edilen test sonuçları, numunelerin çatlama davranışı, dayanım sınırları ve kırılma mekanizmaları hakkında detaylı veriler sağlayarak, malzemenin mekanik performansının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

Şekil 8. Yarmada Çekme Deneyi

BULGULAR VE TARTIŞMA

Taze Hal Deney Sonuçları

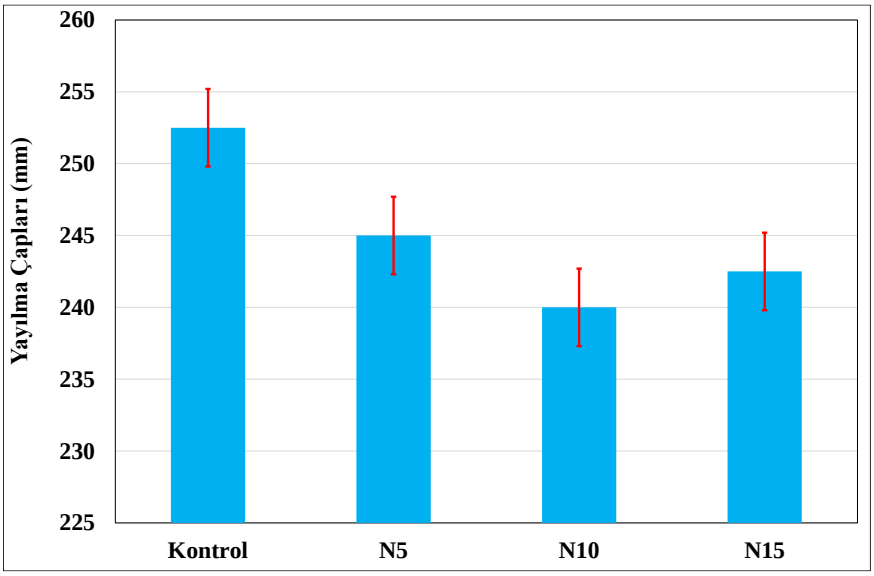
Çalışmada %5, %10 ve %15 katkı oranları, literatürde kullanılan benzer mineral katkı oranları ve katkının performans üzerindeki etkisini geniş bir aralıkta gözlemleyebilmek amacıyla seçilmiştir. Ayrıca yüksek katkı oranlarının olası olumsuz etkilerini belirlemek ve optimum katkı seviyesini ortaya koymak hedeflenmiştir. %15 katkı oranında kalınmasının nedeni ise, bu oranın üzerinde yapılan ön denemelerde karışımın işlenebilirlik özelliklerinde belirgin bir bozulma gözlenmesi ve özellikle taze haldeki karışımın homojenliğini kaybederek segregasyona eğilim göstermesi olarak değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, %15 oranı, hem performans değerlendirmesi açısından üst sınır olarak belirlenmiş hem de daha yüksek oranlarda ortaya çıkan segregasyon riskinin deneysel sonuçların güvenilirliğini etkilemesini önlemek amacıyla kritik eşik değer olarak kabul edilmiştir.

Şekil 9, NaNs oranının KYH'lerin slump akışına etkisini göstermektedir. Kontrol karışımında 6 kg/m³ YPSAKK ile 252,5 mm slump akış çapı elde edilirken, N5, N10 ve N15 karışımlarında sırasıyla 10, 24,5 ve 52 kg/m³ YPSAKK kullanılarak 245, 240 ve 242,5 mm ölçülmüştür. EFNARC kriterlerinin sağlanması için YPSAKK miktarı, %5, %10 ve %15 NaNs katkısında kontrole göre sırasıyla %66, %308 ve %766 artırılmıştır. Bu durum, artan NaNs oranının su ve kimyasal katkı talebini, dolayısıyla karışım viskozitesini artırdığını göstermektedir.
NaNs katkısının ince taneli yapısı ve yüksek özgül yüzeyi, karışımın su ve kimyasal katkı ihtiyacını önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle yüksek NaNs oranlarında kullanılan yüksek miktardaki YPSAKK yalnızca işlenebilirliği korumak amacıyla kullanılmıştır. Bununla birlikte, yüksek SP içeriği matrisin boşluk yapısını, hidratasyon kinetiğini ve mekanik performansı dolaylı olarak etkilemiş olabilir.

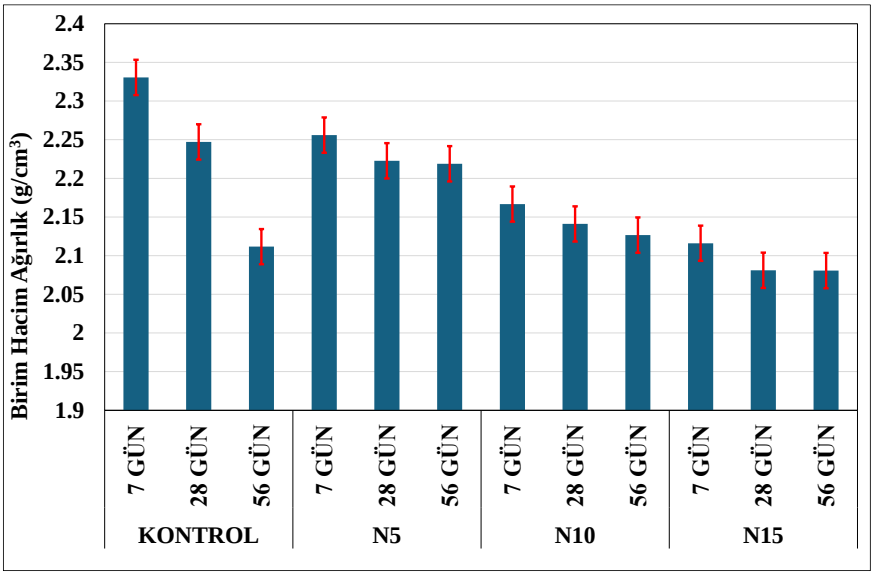
Birim Hacim Ağırlık Sonuçları

Tüm karışımlara ait veriler, sertleşmiş durumda 7, 28 ve 56. günlerde birim hacim ağırlık değerleri olarak grafiklere aktarılmıştır. Şekil 10'da görüldüğü üzere, ilgili kür sürelerinde KYH'lerin birim hacim ağırlıkları 2,08–2,33 g/cm³ aralığında değişmiş ve literatürde bildirilen tipik yoğunluk değerleri ile uyum göstermiştir. Bu bulgular, karışımlarda ayrışma veya segregasyon olmadığını ve bağlayıcı–ince agrega–katkı oranlarının taze durumda kararlı bir yapı sağladığını göstermektedir. Tüm gruplarda kür süresi arttıkça birim hacim ağırlığın azaldığı görülmekte; en yüksek değer 7. günde kontrol karışımında, en düşük değer ise 56. günde N15 grubunda gözlenmektedir. Bu durum, hidratasyon süreci ilerledikçe serbest suyun ayrılması ve matris içinde kapiler boşlukların gelişmesiyle açıklanabilir.

Elde edilen yoğunluk değerlerindeki azalma, KYH'lerin beklenen normal yaşlanma davranışını yansıtmaktadır ve karışımların uzun vadeli yapısal kararlılığını olumsuz etkilememektedir. NaNs içeren N serisi karışımlarda, katkı içeriği %5'ten %15'e yükseldiğinde yoğunlukta kademeli bir azalma gözlenmiştir (Şekil 10). Bu durum, NaNs'nin mikroyapıyı değiştirerek daha düşük özgül ağırlığa yol açmasıyla açıklanabilir. Genel olarak NaNs kullanımı yoğunlukta sınırlı bir azalmaya neden olmakta, ancak bu azalmanın KYH'lerin taze özelliklerini olumsuz etkilemediği düşünülmektedir.



Şekil 9. Yayılma Çapı Sonuçları



Şekil 10. Birim Hacim Ağırlık Sonuçları

Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

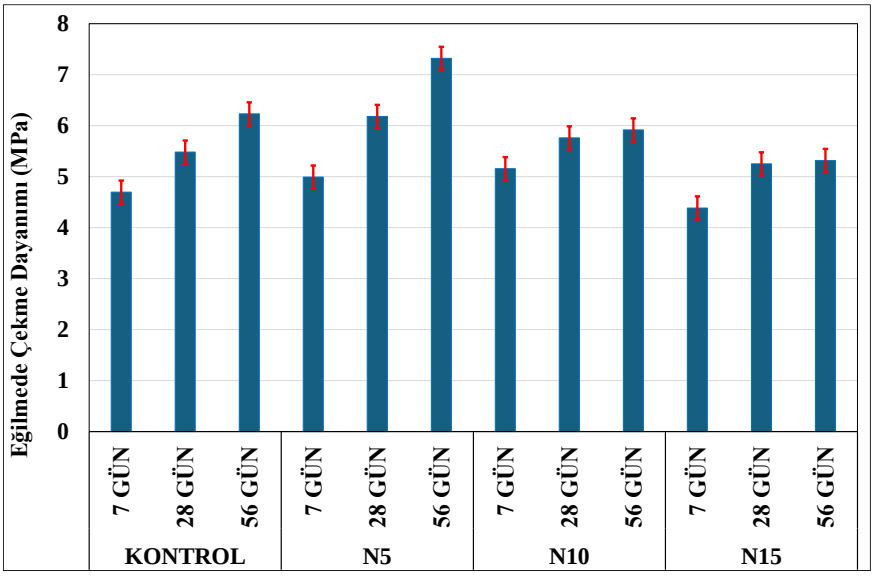
Şekil 11'de gösterilen sonuçlar, tüm karışımlarda eğilme çekme dayanımının genel olarak numune yaşı arttıkça yükseldiğini göstermektedir. Kontrol karışımında eğilme dayanımı 7 günlük numune yaşında 4,69 MPa iken, 28 günde 5,48 MPa'a ve 56 günde 6,23 MPa'a ulaşmıştır. Bu durum, 7 ile 56 gün arasında yaklaşık %33'lük bir dayanım artışına karşılık gelmektedir. Bu artış, hidratasyon sonucu zamanla çimento matrisinde gelişen yapıların artmasıyla matrisin yoğunlaşmasının bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

NaNs katkılı karışımlardan oluşan N serisinde, düşük nefeinlisiyenit oranının eğilme çekme dayanımı üzerinde olumlu bir etki yarattığı açıkça görülmektedir. N5 karışımı, 56 günlük testlerde 7,32 MPa ile tüm N serisindeki en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaşmış ve referans karışıma göre yaklaşık %17,5 daha yüksek bir değer elde etmiştir (Şekil 11). Buna karşılık, NaNs içeriğinin artmasıyla eğilme dayanımı azalmıştır; özellikle N15 karışımında

dayanım 7 günlük yaşta 4,39 MPa'a düşmüş ve referans karışıma göre yaklaşık %6-7'lik bir azalma göstermiştir. Bu karışımda 56 günlük yaşta bile dayanım 5,32 MPa seviyesinde kalmıştır (Şekil 11).

Genel değerlendirmede, eğilme dayanımı açısından en yüksek değer 56 günlük numune yaşında N5 karışımında (7,32 MPa) elde edilirken, özellikle erken yaşlarda en düşük değer yüksek katkı oranına sahip N15 karışımında gözlenmiştir (Şekil 11). Ayrıca yaşa bağlı en yüksek artış oranının eğilmede çekme dayanımı açısından katkı oranının optimum seviyede seçilmesinin kritik önem taşıdığını ortaya koymaktadır.

Düşük oranlı NaNs kullanımında filler etkisi ve iyileşen tane paketlenmesi sayesinde çatlak ilerlemesinin sınırlandığı düşünülmektedir. Ancak yüksek katkı oranlarında matris sürekliliğinin zayıflaması, boşluk miktarının artması ve bağlayıcı fazın seyrelmesi nedeniyle çekme gerilmeleri altında daha kırılgan bir davranış ortaya çıkmıştır.



Şekil 11. Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

Basınç Dayanımı Sonuçları

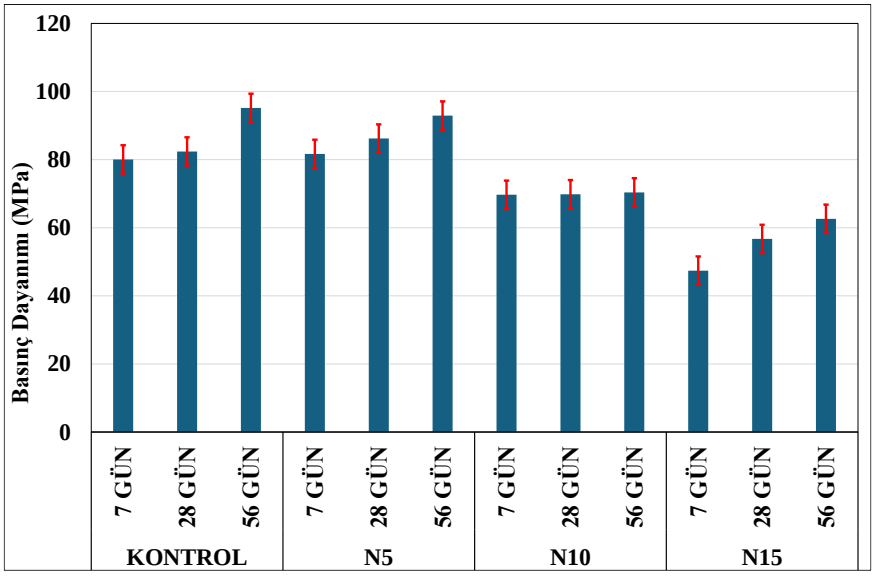
Grafikten elde edilen sonuçlar, tüm karışımlar için basınç dayanımının numune yaşı arttıkça düzenli olarak yükseldiğini göstermektedir. Kontrol karışımının basınç dayanımı 7 günde 80,06 MPa, 28 günde 82,40 MPa ve 56 günde 95,20 MPa olarak ölçülmüş, bu artış yaklaşık %19'luk bir kazanıma karşılık gelmekte ve hidratasyon reaksiyonlarının ilerlemesiyle matris yoğunluğunun artmasıyla açıklanmaktadır (Şekil 12).

NaNs içeren N serisi karışımlarda düşük katkı oranı basınç dayanımını olumlu etkilemiş, N5 karışımında 56 günlük yaşta 92,93 MPa ile N grubu arasında en yüksek değer elde edilmiştir; bu değer kontrol karışımına göre yaklaşık %2–3 daha düşüktür ve NaNs'nin geç yaşlarda boşlukları doldurarak kompakt bir mikroyapı oluşturduğunu göstermektedir. Ancak katkı oranının artması basınç dayanımını belirgin şekilde azaltmıştır; N15 karışımında 7 günde 47,40 MPa, 56 günde 62,62 MPa olarak ölçülmüş ve kontrol karışımına göre 7 günlük yaşta yaklaşık %40 azalma görülmüştür (Şekil 12).

Genel olarak, basınç dayanımı açısından en yüksek değer 56 günlük yaşta kontrol karışımında, en düşük değer ise yüksek katkı oranına sahip N15 karışımında elde edilmiştir. Tüm karışımlarda dayanımın yaşla artmaya devam etmesi, 28 günden sonra laboratuvar koşullarında saklanan numunelerde dahi hidratasyonun sürdüğünü ve mikroyapının zamanla geliştiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, basınç dayanımı açısından katkı türü ve oranının optimum seviyede seçilmesinin kritik önem taşıdığını vurgulamaktadır.

Düşük oranlı NaNs kullanımı, tane paketlenmesini iyileştirerek boşluk oranını azaltmış ve daha kompakt bir mikro yapı oluşumuna katkı sağlamıştır. Ayrıca ince öğütülmüş NaNs parçacıklarının çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak hidratasyon ürünlerinin daha düzenli gelişimini desteklediği düşünülmektedir. Ancak yüksek NaNs ikame oranlarında, NaNs'nin düşük reaktif veya yarı inert karakter göstermesi nedeniyle hidratasyon reaksiyonlarına katkısının sınırlı kaldığı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, ince NaNs parçacıklarının yüksek özgül yüzeyi karışımın su ve süperakışkanlaştırıcı ihtiyacını artırmış, özellikle yüksek katkı oranlarında kullanılan yüksek

YPSAKK miktarı matris yapısını dolaylı olarak etkilemiştir. Aşırı ince malzeme içeriğinin topaklanma eğilimi oluşturması, bağlayıcı matris sürekliliğini zayıflatmış ve kapiler boşluk oranını artırmıştır. Ayrıca NaNs oranının artmasıyla agrega-bağlayıcı arayüzünde daha zayıf geçiş bölgeleri oluşması yük transfer mekanizmasını olumsuz etkileyerek basınç dayanımında belirgin düşüşlere neden olmuş olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 12. Basınç Dayanımı Sonuçları

Su Emme Test Sonuçları

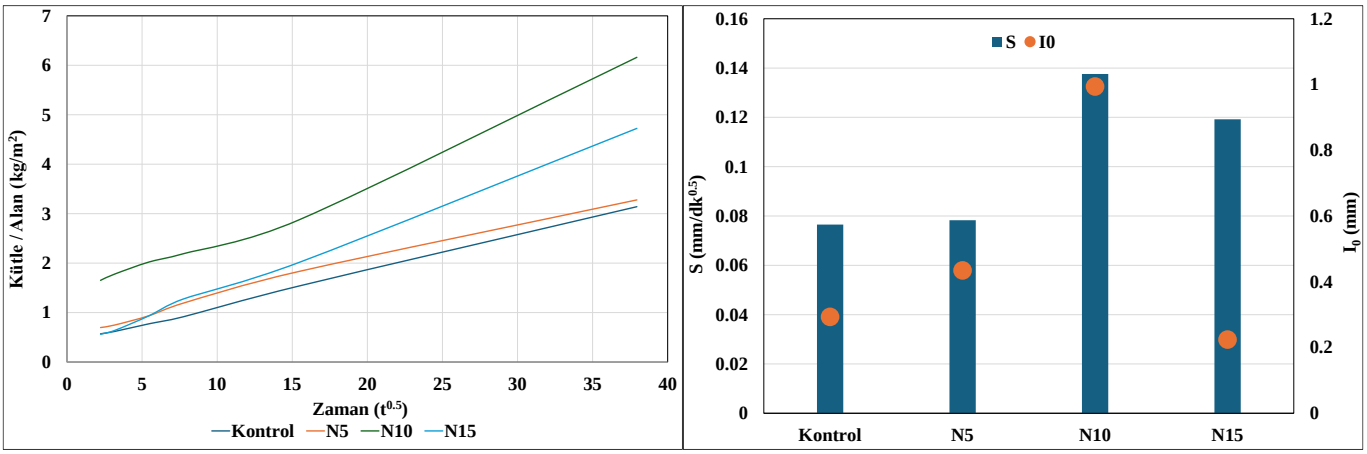
Kendiliğinden yerleşen harçlardan oluşan serilerde sorptivite sonuçları, kapiler su emme davranışının karışım bileşenlerinin türüne ve kombinasyonuna son derece duyarlı olduğunu göstermektedir. İncelenen karışımlarda deneysel verilerden hesaplanan S katsayısı 0,0765–0,1192 mm/dk^{0,5} aralığında, I_0 katsayısı ise 0,2242–0,9939 mm aralığında değişmektedir (Şekil 13). Bu geniş dağılım aralığı, mikroyapı ve boşluk sürekliliğinin önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır.

Kontrol karışımı, görece düşük S (0,0765 mm/dk^{0,5}) ve I_0 (0,2932 mm) değerleri ile sınırlı kapiler emme davranışı göstermiştir (Şekil 13). Bu sonuç su/bağlayıcı dengesi ve tane paketlenmesinin düzenli olduğunu ve kapiler boşluk sürekliliğinin sınırlı kaldığını göstermektedir. NaNs içeren karışımlar incelendiğinde, N5 kontrol numunesine yakın bir su emme kapasitesine (S = 0,0783 mm/dk^{0,5}) sahipken, N10'da (S = 0,1376 mm/dk^{0,5}) belirgin bir artış gözlenmiş, N15'te (S = 0,1192 mm/dk^{0,5}) ise değer N10'a göre düşse de kontrol karışımına göre hâlâ yüksek kalmıştır. Başlangıç su emme değerleri (I_0) açısından N10 en yüksek (0,9939 mm) değer gösterirken, N5 (0,4345 mm) kontrol numunesine göre daha yüksek, N15 (0,2242 mm) ise diğer katkılı karışımlara kıyasla daha düşük seviyededir (Şekil 13).

Genel olarak grafik, katkı oranının artmasıyla kapiler su emme davranışının doğrusal bir değişim göstermediğini, özellikle orta katkı oranlarında hem su emme kapasitesi hem de başlangıç su emme değerlerinde belirgin artışlar oluşabildiğini göstermektedir. Bu durum katkının belirli oranlarda matris yapısında boşluk oluşumunu veya kapiler sürekliliği artırabileceğini düşündürmektedir. Yüksek NaNs içerikli karışımlarda gözlenen daha yüksek su emme ve sorptivite değerleri, matris içerisindeki kapiler boşluk sürekliliğinin artmasıyla ilişkilendirilebilir. İnce NaNs parçacıkları belirli oranlara kadar dolgu etkisi oluşturarak boşluk yapısını iyileştirebilse de yüksek ikame oranlarında artan su ve YPSAKK ihtiyacı nedeniyle boşluk yapısının olumsuz etkilenmiş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca NaNs'nin sınırlı reaktif davranışı nedeniyle oluşan hidratasyon ürünlerinin boşlukları yeterince dolduramaması, su taşınımını kolaylaştıran bir mikroyapı oluşumuna neden olmuş olabileceği düşünülmektedir.

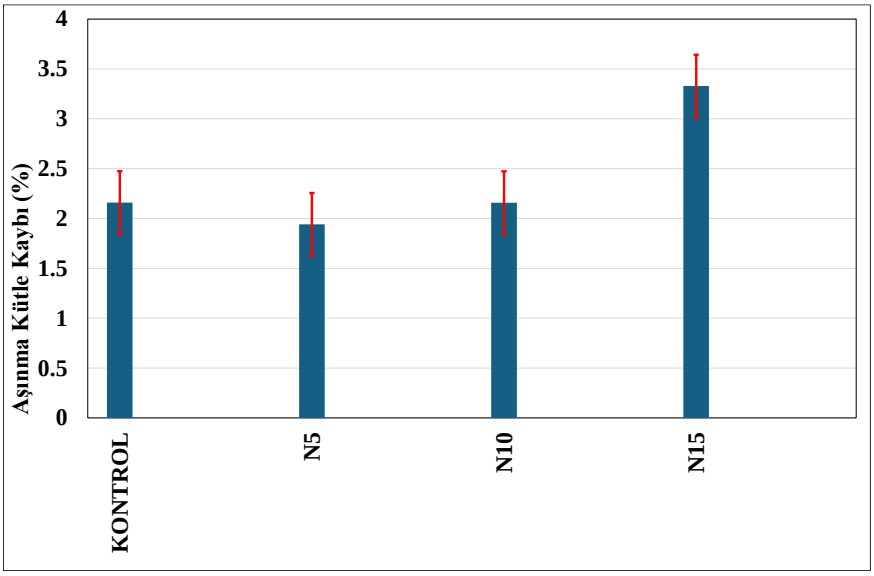
Aşınma Kaybı Sonuçları

Böhme cihazında gerçekleştirilen yüzey aşınması sonrasında kontrol numunesinde meydana gelen aşınma kütle kaybı yaklaşık %2,16 olarak belirlenmiştir (Şekil 14). Bu değer, NaNs içermeyen çimento esaslı sistemlerin yüzey matrisinin görece daha iyi olduğunu ve çevresel etkilere karşı yüksek bir direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Kontrol numunesi, NaNs katkısının aşınma kütle kaybı üzerindeki etkisinin nicel olarak değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmıştır.



Şekil 13. Su Emme Test Sonuçları

NaNs içeren N serisi incelendiğinde, düşük NaNs oranında (%5) kütle kaybının yaklaşık %1,94 seviyesinde olduğu gözlenmiştir. Bu değer, kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %10'luk bir düşüşe karşılık gelmektedir. Ancak NaNs içeriğinin %15'e çıkarılmasıyla aşınma kütle kaybı yaklaşık %3,33'e yükselmiştir. Bu karışım, kontrol numunesine kıyasla yaklaşık %52 oranında daha yüksek kütle kaybı göstermiştir. NaNs içeriği %10 olan N10 numunesinde kütle kaybı yaklaşık %2,16 olarak ölçülmüştür. Bu değer, kontrol numunesine göre yaklaşık %22 oranında bir artışa karşılık gelmekte olup NaNS'nin yeterli oranlarda kullanıldığında matris sertliğini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir (Şekil 14).



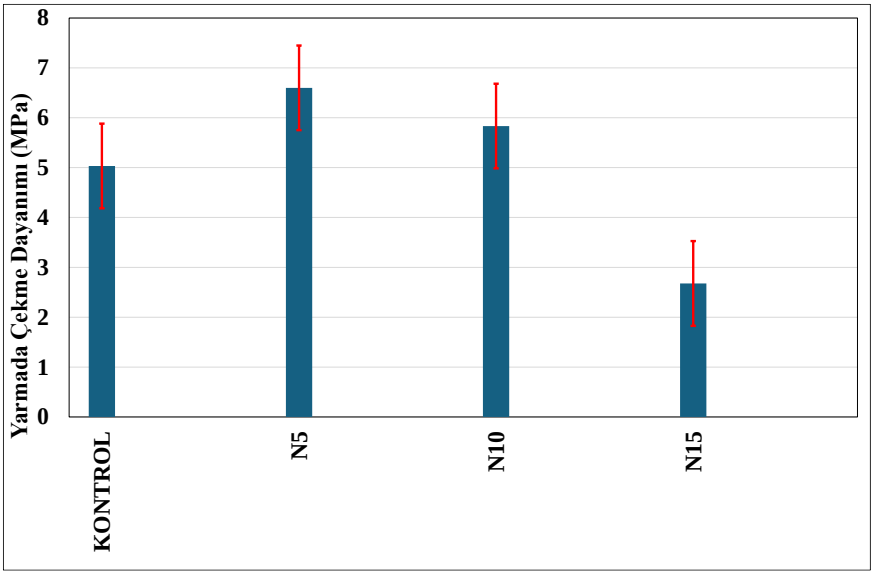
Şekil 14. Aşınma Kaybı Sonuçları

Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

Grafikten elde edilen sonuçlara göre, kontrol karışımının 28 günlük yarmada çekme dayanımı 5,03 MPa olarak belirlenmiştir (Şekil 15). NaNs içeren N serisi karışımlarda düşük katkı oranı yarmada çekme dayanımını artırmış, N5 karışımı 28 günde 6,6 MPa ile kontrol karışımına göre yaklaşık %31 daha yüksek dayanım göstermiştir. Bununla birlikte, katkı oranının artmasıyla (N10 ve N15) yarmada çekme dayanımı azalmış ve N15 karışımında 28 günde 2,68 MPa ile tüm karışımlar arasında en düşük değer gözlenmiştir. Genel olarak, en yüksek yarmada çekme dayanımı N5'te, en düşük değer ise N15'te elde edilmiştir; bu durum, katkı oranının artmasıyla yarmada çekme dayanımında %59'luk bir düşüşe denk gelmektedir.

Sonuç olarak, NaNs katkısının optimum bir kullanım oranına sahip olduğu ve bu çalışmada en uygun performansın %5 katkı oranına karşılık gelen N5 karışımında elde edildiği anlaşılmaktadır. Daha yüksek katkı oranları ise bağlayıcı

sistemin mekanik performansını özellikle çekme davranışı açısından olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, NaNs katkısının yarma çekme dayanımı açısından optimum düzeyde kullanılması kritik önem taşımaktadır.



Şekil 15. Yarmada Çekme Dayanımı Sonuçları

SONUÇLAR

Bu çalışmada, NaNs kullanımının kendiliğinden yerleşen harçların (KYH) taze hal özellikleri, mekanik performansı ve dayanıklılığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar katkı dozajının KYH performansını belirleyen temel parametre olduğunu açıkça göstermektedir.

- NaNs oranının artmasıyla karışım viskozitesinin yükseldiği ve akışkanlığın sınırlı ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Bu durum, ince NaNs parçacıklarının yüksek özgül yüzeyi nedeniyle karışımın su ve YPSAKK ihtiyacını artırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Çalışmada tüm karışımların EFNARC işlenebilirlik kriterlerini sağlayabilmesi için YPSAKK miktarı optimize edilmiştir. Bununla birlikte, yüksek NaNs oranlarında kullanılan yüksek YPSAKK miktarının mekanik ve dayanıklılık sonuçları üzerinde ikincil etkiler oluşturabileceği değerlendirilmektedir.

- Arşimet yöntemine göre hesaplanan birim hacim ağırlık sonuçları, NaNs katkısının yoğunluk üzerinde belirgin bir değişim oluşturmadığını göstermiştir. Kontrol ve katkılı karışımlar arasındaki farkların sınırlı olması, sistemin genel yoğunluk karakteristiğinin korunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak kür süresinin ilerlemesiyle tüm karışımlarda birim hacim ağırlığın azaldığı, bunun serbest su kaybı ve kapiler boşluk oluşumu ile ilişkili olduğu düşünülmektedir.

- Porozite, eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımı sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, düşük ve orta seviyelerde kullanılan NaNs katkısının tane paketlenmesini iyileştirerek daha kompakt bir matris oluşumuna katkı sağladığı ve mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca ince NaNs parçacıklarının çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak hidratasyon ürünlerinin daha düzenli gelişimini desteklediği düşünülmektedir. Ancak yüksek NaNs oranlarında, NaNs'nin düşük reaktif/inert karakter göstermesi nedeniyle hidratasyon reaksiyonlarına katkısının sınırlı kaldığı, bağlayıcı matris sürekliliğinin zayıfladığı ve kapiler boşluk oranının arttığı belirlenmiştir. Bunun yanında aşırı ince malzeme içeriğinin topaklanma eğilimi oluşturması ve agrega-bağlayıcı arayüzünde (ITZ) daha zayıf geçiş bölgeleri meydana gelmesi nedeniyle özellikle çekme davranışında belirgin dayanım kayıpları oluşmuştur. Bu nedenle NaNs katkısının optimum oranlarda kullanılması mekanik performans açısından önem taşımaktadır.

- Su emme ve yüzey aşınma sonuçları, NaNs katkısının dayanıklılık performansını katkı oranına bağlı olarak değiştirdiğini göstermiştir. Orta seviyedeki katkı oranlarında kapiler su emme ve aşınma davranışının iyileştiği, buna bağlı olarak harç matrisinin dayanıklılığının arttığı belirlenmiştir. Buna karşılık yüksek katkı oranlarında artan boşluk yapısı ve kapiler süreklilik nedeniyle dayanıklılık özelliklerinin olumsuz etkilendiği

görülmüştür. Bu sonuçlar, uygun NaNs oranlarının hem su geçirgenliği hem de mekanik aşınma direnci açısından daha dengeli ve yüksek performanslı harç üretimine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

- İnce öğütülmüş ve 0.0063 mm elekten geçen NaNs parçacıkları, yüksek reaktif bir puzolan gibi davranmaktan ziyade düşük reaktif/inert mineral dolgu malzemesi özelliği göstermiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, NaNs katkısının optimum oranlarda kullanılması KYH performansını iyileştirirken, yüksek ikame oranlarının hem fiziksel hem de mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu belirlenmiştir.

Yapay Zeka Katkı Beyanı

Yapay zeka araçları yalnızca dil düzenleme, çeviri ve küçük dil bilgisi iyileştirmeleri amacıyla kullanılmıştır. Tüm deneysel çalışmalar, veri analizleri, sonuçların yorumlanması ve bilimsel içerik tamamen yazarlar tarafından gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

ASTM C642: Density, absorption, and voids in hardened concrete, 1–3, ASTM International (2005).

ASTM C1585: Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, ASTM International (2013).

ASTM C349: Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), ASTM International (2022).

ASTM C138: Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete. ASTM International., ASTM International (2022).

ASTM C496: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens, ASTM International (2022).

EFNARC, Specification and guidelines for self-compacting concrete, EFNARC (2002).

Etli, S., (2023). Evaluation of the effect of silica fume on the fresh, mechanical and durability properties of self-compacting concrete produced by using waste rubber as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production, 384*, 135590. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135590

Etli, S., (2024). Mechanical Properties of Self-Compacting Mortars Containing Rubber Waste Particles as Fine Aggregate in Freeze–Thaw Cycles. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 36(9). https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17647

Etli, S., (2024). Effect of Recycled Brick Powder on the Properties of Self-Compacting Fiber Reinforced Mortars Produced with Different Cement Types. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 18(5), 743–759. https://doi.org/10.1007/s11709-024-1016-z

Etli, S., & Yılmaz, T., (2025). Comprehensive Study on the Role of Mycrisparite in Enhancing Strength, Stability, and Microstructural Traits of Self-Compacting Mortars. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(9), 1701–1718. https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2441966

Guillet, G.R., 1994. Nepheline syenite. (editor: D.D. Carr). Industrial Minerals and Rocks (6th Edition). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Littleton, Colorado, 711-730.

Haner, S., & Demir, M. (2018). Nefelinli siyenit: Bir gözden geçirme. Journal of Mining and Metallurgy, 54(1), 107–120. https://doi.org/10.24232/jmd.434144

İ.B. Topçu, T. Bilir, H. Baylavlı, Kendiliğinden yerleşen betonun özellikleri, 2008.

Kamseu, E., Ponzoni, C., Tippayasam, C., Taurino, R., Chaysuwan, D., Sglavo, V. M., Thavorniti, P., & Leonelli, C. (2016). Self-compacting geopolymer concretes: Effects of addition of aluminosilicate-rich fines. *Journal of Building Engineering, 5*, 211–221. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.01.004

Kunduracı, N., Aydın, T., Akbay, A., 2016. The effect of nepheline syenite addition on the sintering behaviour of sanitaryware bodies. Journal of the Australian Ceramic Society, 52 (2), 82-86. https://doi.org/10.29137/umagd.346107

McLemore, V.T., 2006. Nepheline Syenite. (editor: J.E. Kogel, N.C. Trivedi, J.M. Barker, S.T. Krukowski). Industrial Minerals & Rocks (7th Edition). Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Colorado, 653-670.

Negm, A.T., Abouzeid, A.Z., Boulos, T., Ahmed, H., 2000. Nepheline syenite processing for glass and ceramic industries. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 34, 5-16.

Paköz, B., & Kaplan, Ş. (2026, Şubat 2–3). Sodyum ve potasyum nefelinlisiyenit içeren kendiliğinden yerleşen harçlarda akış özelliklerinin değerlendirilmesi. Uluslararası Mekansal Planlama ve Afet Yönetimi Kongresi, Çukurova Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Adana, Türkiye.

Platt, R.G., 1996. Nepheline-syenite complexes-an overviev. (editor: R.H. Mitchell). Undersaturated Alkaline Rocks: Mineralogy, Petrogenesis, and Economic Potential. Mineralogical Association of Canada, Ottawa, 63-100.

Pranckevičienė, J., & Pundienė, I. (2023). Effect of mechanically activated nepheline-syenite additive on the physical–mechanical properties and frost resistance of ceramic materials composed of illite clay and mineral wool waste. Materials, 16(14), Article 4943. https://doi.org/10.3390/ma16144943

Rosa, L. P., Santos, D. H., Zaccaron, A., Ribeiro, M. J., Montedo, O. R. K., Arcaro, S., & Raupp-Pereira, F. (2024). Rheological behavior of nepheline syenite beneficiation waste-based mortars. Journal of Building Engineering, 98, 111403. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111403

Santos, D. H., Rosa, L. P., Alves, C. R., Simão, L., Zaccaron, A., Arcaro, S., Montedo, O. R. K., & Raupp-Pereira, F. (2025). Using Brazilian nepheline syenite waste as an alternative mineral resource for various applications. Minerals, 15(6), 554. https://doi.org/10.3390/min15060554

Salem, A., Jazayerib, S.H., Rastellic, E., Timellinic, G., (2009). Effect of nepheline syenite on the colorant behavior of porcelain stoneware body. Journal of Ceramic Processing Research, 10 (5), 621-627. https://doi.org/10.36410/jcpr.2009.10.5.621

Tait, K.T., Sokolava, E., Hawthorne, F.C., 2003. The ctystal chemistry of nepheline. The Canadian Mineralogist, 41, 61-70. https://doi.org/10.2113/gscanmin.41.1.61

Tanner, A.O., 2017. Feldspar and nepheline syenite. Mineral commodity summaries, U.S. Geological Survey, https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/ commodity/feldspar/mcs-2017-felds.pdf, son erişim: 12.03.2026.

TSE, TS EN 1338: Beton kaplama blokları – Gerekler ve deney metotları, Türk Standardları Enstitüsü (2005).

Üçerler-Çamur, Z., Keles, O., & Olgaç Kangal, M. (2026). Sustainable lithium recovery from biotite waste of nepheline syenite via magnetic separation and flotation with MLA-based mineralogical characterization. Minerals, 16(1), 95. https://doi.org/10.3390/min16010095