



Araştırma Makalesi / Research Article

Nanofiber Selüloz Katkılı Kireç Esaslı Enjeksiyon Malzemelerinin Tasarımı ve İncelenmesi

Design and Investigation of the Lime Based Grouts Incorporated with Nanofiber Cellulose

Ali Sayar¹, Didem Oktay^{2*}

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, sayar_ali97@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6133-5871>

² Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, dyasar@yildiz.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0093-1994>

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 30 Nisan 2025
Revizyon 19 Haziran 2025
Kabul 21 Haziran 2025
Online 30 Eylül 2025

Anahtar Kelimeler:

Tarihi yapılar
Kireç esaslı enjeksiyon malzemesi
Nanofiber selüloz
Lif katkısı
Mekanik özellikler

ÖZ

Tarihi yapılardaki özgün harçlarda çeşitli liflerin ilave malzeme olarak kullanıldığı ve bu liflerin harçların fiziksel ve mekanik özelliklerini geliştirdiği bilinmektedir. Günümüzde yapı malzemelerinde sürdürülebilir nano malzemelere duyulan ihtiyaç araştırmacıları nanoselülozlara yönlendirmiştir. Bu çalışmada kireç esaslı ve nanofiber selüloz (NFS) katkı enjeksiyon malzemeleri üretilerek malzemelerin taze ve sertleşmiş hal özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın amacı; tarihi yapıların onarımında ve güçlendirilmesinde kullanılabilecek yeni bir kireç esaslı enjeksiyon malzemesi geliştirmektir. Deney sonuçlarına göre NFS ilavesi akışkanlık ve penetrasyon özelliklerini olumsuz etkilese de mekanik özellikleri ve rötre direncini ciddi oranda artırmaktadır. Ayrıca NFS'nin, doğal viskozite düzenleyici olarak çalıştığı ve sentetik katkı maddeleri yerine tercih edilebileceği görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 April 2025
Received in revised form 19 June 2025
Accepted 21 June 2025
Available online 30 September 2025

Keywords:

Historical structures
Lime-based grout
Nanofiber cellulose
Fiber additive
Mechanical properties

ABSTRACT

It is known that various fibers were used as additives in the original mortars of historical buildings and these fibers improved the physical and mechanical properties of the mortars. Today, the need for sustainable nanomaterials in building materials has led researchers to investigate nanocelluloses. In this study, nanofiber cellulose (NFS) incorporated lime-based grouts were produced and the fresh and hardened state properties of the materials were examined. The main purpose of the study is to develop a new lime-based grout that can be used for consolidation of historical buildings. According to the test results, although the addition of NFS negatively affects the fresh state properties, it significantly increases the mechanical properties and shrinkage resistance. It has also been observed that NFS works as a natural viscosity modifier and can be preferred over synthetic additives.

Doi: 10.24012/dumf.1687825

* Sorumlu Yazar

Giriş

İnsanlar, temel fizyolojik ihtiyaçlardan biri olan barınma ihtiyacını karşılamak için çeşitli yapılar inşa etmiş ve bu yapıları geliştirmeye çalışmışlardır. Bu gelişim sırasında harçlarda kullanılan agregalar pek değişim göstermemiş genellikle bağlayıcı malzemenin özellikleri geliştirilmeye çalışılmıştır. Harçlara çeşitli katkı maddeleri ilave ederek zayıf olan mekanik özellikler güçlendirilmiştir. Literatürde, harçlarda saman, kırıntı, hayvan kılları, gübre, bitki özleri, yonga ve talaş parçaları, kan, süt, yumurta vb. pek çok organik veya inorganik katkı maddesi kullanıldığını kanıtlayan çalışmalar mevcuttur [1],[2].

Tarihi yapılar, geçmişten günümüze kadar uzanan, inşa edildiği dönemin tarihi, kültürü, sosyolojisi, mimarisi, malzeme bilgisi, mühendislik anlayışı gibi pek çok alanda bilgi edinmemizi sağlayan kültürel değerlerdir. Her yapı gibi tarihi yapılar da çevre koşulları, doğal afetler, savaşlar, yapının kullanımına bağlı etkenler, tasarım ve yapım hataları, malzeme bozulması gibi çeşitli nedenlerle hasar görebilir [3]. Sahip oldukları kültürel önem düşünüldüğünde tarihi yapıların onarımı ve güçlendirilmesi hassas bir konudur ve disiplinler arası ciddi bir çalıştırma gerektirir. Tarihi yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için kullanılan farklı teknikler vardır, bu tekniklerden biri de enjeksiyon yöntemi (grouting)'dir.

Enjeksiyon yöntemi (grouting), bağlayıcı malzemenin su ve çeşitli katkılarla karıştırılması sonucu elde edilen akıcı kıvamdaki enjeksiyon malzemesinin (grout), basınçla yığma duvardaki çatlakları ve boşlukları doldurması prensibine dayanan bir güçlendirme yöntemidir [4]. Enjeksiyon yönteminin genel amacı; yapıdaki özgün malzemeye uygun olarak üretilen enjeksiyon malzemesinin duvara açılan uygun deliklerden enjekte edilerek yapıdaki süreksizliklerin giderilmesi, çatlakların doldurulması ve mekanik dayanım özelliklerinin iyileştirilmesidir [5]. Enjeksiyon yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli husus yapıya enjekte edilecek malzemenin özgün harçla fiziksel, kimyasal ve minerolojik açıdan uyumlu olmasıdır. Tarihi harçlarda bağlayıcı malzeme olarak kireç, katkı malzemesi olarak da doğal lif kaynaklarının kullanıldığı düşünüldüğünde enjeksiyon malzemelerinin de kireç esaslı ve doğal lif katkılı olarak üretilmesinin bu uyumu artıracığı düşünülmektedir.

Kireç esaslı harçlar, mekanik özelliklerinin çimento esaslı harçlara göre daha zayıf olması, hızlı su buharlaşmasına bağlı oluşan rötre çatlakları, moleküler arası zayıf kohezyon, kırılgen yapı, uzun priz süresi gibi bazı olumsuz özellikler göstermektedir. Kireç harçlarının ve kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin zayıf özellikleri, bünyesinde lif içeren katkı maddeleri kullanılarak güçlendirilebilir [6]. Lifler, özellikle malzemenin maksimum direncine ulaşıldığı yumuşama aşamasında dikiş etkisi yoluyla gerilme kuvvetlerini aktararak çatlakların başlamasını ve ilerlemesini önler [7],[8]. Bu durum yapının yük altındaki basınç mukavemetini ve deprem, rüzgar gibi yanal etkiler altındaki eğilme mukavemetini artırarak yapının mekanik özelliklerinin güçlenmesini sağlar. Lif katkılı kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri tarihi yapıların onarımında kullanıldığında hem yapıdaki boşluklar ve çatlaklar doldurularak monolitik bir yapı elde edilmekte hem de liflerin varlığı sayesinde yapının mekanik özellikleri güçlendirilmektedir. Lif takviyeli bir

malzemenin performansı, kullanılan lifin elastik özellikleri, lifin geometrisi ve dağılımı, matris yapışması gibi pek çok faktöre bağlı olmakla birlikte literatürde liflerin yapıya olumlu özelliklerini gösteren çalışmalar mevcuttur [9],[10].

Nanofiber selüloz (NFS), çeşitli bitki hücrelerinin çeperlerinden elde edilen selülozun, mekanik ve/veya kimyasal yollarla nano boyuta getirilmesi ile elde edilen, fizik, kimya, biyoloji, malzeme bilimi, elektronik, endüstri vb. pek çok alanda kullanılan bir lif türüdür. Literatürde NFS'nin tek başına veya farklı katkı maddeleri ile bir arada kullanımına dair çalışmalar mevcuttur. Örneğin; Ardanuy vd. [11] yaptıkları çalışmada çimento esaslı harçları güçlendirmek ve yüksek performanslı beton elde edebilmek amacı ile ürettikleri harçlarda NFS katkısı kullanmışlardır. Çalışmada, NFS'nin özgül yüzey alanı sayesinde fiber-matris etkileşiminin artmasını sağladığı, NFS bünyesindeki güçlü liflerin de gerilme kuvvetlerini köprüleme yolu ile aktararak beton harcının eğilme mukavemetini artırdığı belirtilmiştir. Goncalves vd. [12] NFS'nin çimento harçlarının taze haldeki özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. NFS'nin hidrofilik yapısı sebebi ile yüksek miktarda suyu bünyesine hapsederek akışkanlık özelliğini ciddi oranda düşürdüğünün vurgulandığı çalışmada %1.2 NFS ilavesinin terleme miktarını da %75 düşürdüğü belirlenmiştir. Kolour vd. [13] yaptıkları çalışmada NFS katkısının plastik rötre üzerine etkilerini incelemişlerdir. Az miktarda NFS kullanımının plastik rötre azalttığını yüksek dozda NFS kullanımının ise plastik rötre artıracığını belirtmişlerdir. Bu durum diğer özellikler için de geçerli olup NFS miktarı uygun dozajın üstünde kullanıldığında olumsuz etki yaratmaktadır [11],[13].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde NFS'nin çimento esaslı harçlarda ve enjeksiyon malzemelerinde kullanımına dair pek çok çalışma olmasına rağmen kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinde NFS kullanımına dair herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. NFS katkısının kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinde de mekanik özelliklerin gelişmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı; NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine etkilerini araştırarak tarihi yapıların onarımında ve güçlendirilmesinde kullanılabilecek yeni bir enjeksiyon malzemesi geliştirmektir. Bu kapsamda ilk olarak enjeksiyon malzemelerinin taze halde sağlaması gereken akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği özellikleri deneysel çalışmalarla incelenerek serilerin karışım oranlarına karar verilmiştir. Tasarımı yapılan seriler tekrar üretilerek taze ve sertleşmiş hal özelliklerine ek olarak reolojik özellikleri ve içyapısı da incelenmiştir. Son olarak, elde edilen tüm veriler yorumlanarak NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine etkileri yorumlanmıştır.

Materyal ve Metot

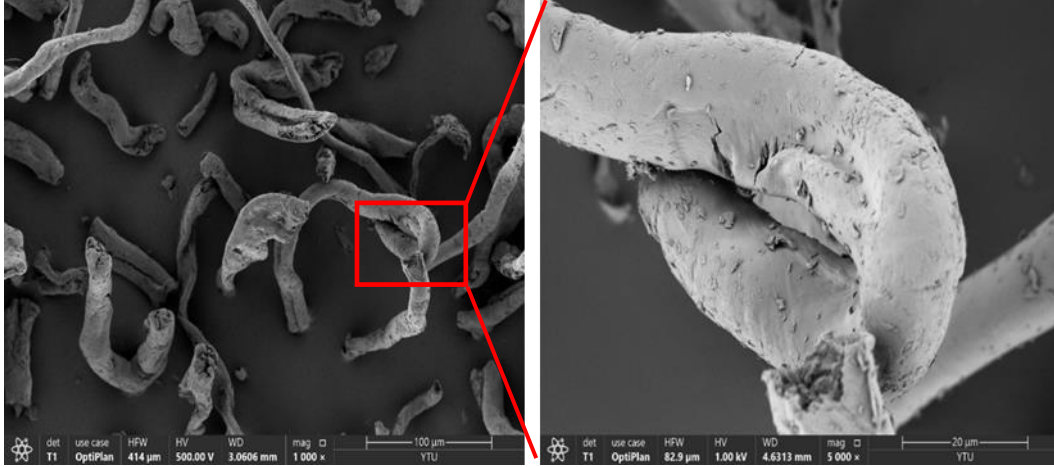
Materyal

Çalışmada, Nanografi firmasından temin edilen, 10-20 nm çapında, 2-3 µm uzunluğunda, yoğunluğu 1,50 gr/cm³, selüloz kristalinitesi (XRD) %92 olan nanofiber selüloz (NFS), lif katkısı olarak kullanılmıştır. Liflerin, Şekil 1'de verilen geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsünde lif formunda olduğu görülmektedir. Tarihi yapılarda bulunan özgün malzemelerle olan fiziksel ve kimyasal uyumu, yeterli mekanik dayanımı, biyo-esaslı yapısı, geri dönüştürülebilir

olması nedenleri ile NHL 5 sınıfı doğal hidrolik kireç bağlayıcı malzeme olarak tercih edilmiştir. Doğal hidrolik kirece ait kimyasal özellikler Tablo 1’de verilmiştir. Kimyasal bileşimde yüksek oranda CaO içeri ön plana çıkmaktadır. SiO₂, Al₂O₃ ve MgO miktarları ikici ana bileşenlerdir. Kireç TS EN 459-1’de verilen sınıfı sağlamaktadır.

Karışımlara kireç miktarının %0.1, %0.2 ve %0.3’ü oranında NFS ilave edilmiştir. Üretilen enjeksiyon malzemelerinin

taze hal özelliklerinin sağlanması amacı ile karışımlarda kimyasal katkı maddeleri kullanılmıştır. Enjeksiyon malzemelerinin akışkanlık ve penetrasyon özelliklerini sağlamak amacı ile Chryso Yapı Kimyasalları’ndan temin edilen Lab Bet 10291 polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı, yüksek oranda suyun neden olduğu terleme oranının dengelenebilmesi amacı ile de Quad 20 sentetik kopolimer çözeltisi viskozite düzenleyici katkı maddesi kullanılmıştır.



Şekil 1. NFS liflerinin TEM görüntüsü

Tablo 1. NHL 5’in kimyasal bileşenleri

Bileşenler (%)	NHL 5
CaO	54.9
SiO ₂	9.3
Al ₂ O ₃	2.6
MgO	2.4
Fe ₂ O ₃	1.6
K ₂ O	0.8
TiO ₂	0.2
Na ₂ O	0.1
P ₂ O ₅	<0.1
MnO	<0.1
Cl	-
Kızdırma Kaybı	1.5

Metot

Enjeksiyon Malzemelerinin Üretimi

Çalışma kapsamında NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine etkilerini araştırmak amacı ile dört farklı numune üretilmiştir. Üretilen ilk numunede NFS ilavesi yapılmamış ve referans olarak kabul edilmiştir. Diğer numunelerde NFS oranı sırasıyla %0.1, %0.2 ve %0.3’tür. Üretilen numunelerin karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir. Kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin üretim ve karıştırma yöntemleri için herhangi bir standart olmaması sebebiyle literatürde bulunan daha önceki çalışmalar dikkate alınarak üretim

ve karışım yöntemi belirlenmiştir [14],[15]. Üretim ve karışım aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

- Tüm numuneler laboratuvar ortamında 23±2 °C ve %50 bağıl nem koşullarında üretilmiştir.
- Enjeksiyon malzemesinin üretiminde kullanılacak tüm malzemeler Tablo 2’de belirtilen oranlarda tartılarak hazırlanmıştır.
- Karışım suyunun %10’u kimyasal katkıların seyreltilmesi için ayrılmıştır.
- NFS’nin matris içinde homojen dağılmasını sağlamak için üretim öncesinde nano malzeme karışım suyu ile birlikte 1 saat boyunca 40 kHz frekansta ultrasonik banyoda karıştırılmış ve jel formuna getirilmiştir (Şekil 2). Dağıtma süresi görsel değerlendirme yapılarak belirlenmiştir.
- Karıştırma işlemi için spiral uçlu mekanik mikser kullanılmıştır.
- Spiral uçlu mekanik mikserin hızı karıştırma süreci boyunca sabit ve 800 rpm’dir.
- Topaklanmayı engellemek amacı ile 1 dakika kuru karıştırma yapılmıştır.
- Jel formdaki NFS karışım suyu içerisinde karışıma ilave edilmiştir.
- Karıştırma süresi toplam 13 dakika 30 saniyedir.
- Kimyasal katkılar 3. dakikadan itibaren 30 saniye içerisinde ilave edilerek 10 dakika daha karıştırılmış ve enjeksiyon malzemeleri elde edilmiştir.

Tablo 2. Enjeksiyon malzemelerinin üretiminde kullanılan malzemelerin ağırlıkça oranları (gr)

SERİ	Kireç	Su/Kireç	NFS	SA*	VD**
REF	1000	0.8	-	-	10
NFS 1	1000	0.8	1	18	-
NFS 2	1000	0.8	2	18	-
NFS 3	1000	0.8	3	18	-

*Süper Akışkanlaştırıcı

** Viskozite Düzenleyici



Şekil 2. NFS'nin ultrasonik banyoda su içerisinde dağıtılması

Deneyel Çalışmalar

Taze Hal Özelliklerinin İncelenmesi

Enjeksiyon yönteminin telafisi mümkün olmadığından, konsolidasyon hatalarına sebep olarak yapıya zarar vermemek için tasarım aşamasında enjeksiyon malzemesinin taze halde akışkanlık, penetrasyon, hacim sabitliği gibi performans yeterliliklerini sağlaması gerekmektedir. Enjeksiyon malzemesinin kıvamı hakkında bilgi veren akışkanlık özelliği ASTM D6910'da [16] belirtilen "Marsh Hunisi" ve TS EN445'te [17] belirtilen "Akış Konisi" deneyleri ile ölçülmüştür. Penetrasyon özelliği EN 1771'de [18] belirtilen "Kum Kolonu" deneyi ile terleme özelliği ise ASTM C940 [19] referans alınarak ölçülmüştür. Tüm taze hal deneyleri 23 ± 2 °C ve %50 bağıl nem koşullarında yapılmıştır.

Reolojik Özelliklerin Belirlenmesi

Doğru bir enjeksiyon uygulaması için malzemenin reolojik özelliklerinin de incelenmesi gerektiği bilinmektedir. Reolojik özellikler rotasyonel bir reometre (Anton Paar Reolab QC) ve tek eksenli silindirik uç kullanılarak incelenmiştir. Ölçüm prosedüründe ilk olarak enjeksiyon malzemesinin içerisinde bulunan hava kabarcıklarını yok etmek amacıyla 300 s^{-1} kayma hızında 20 sn ön karışım uygulanmıştır. Ardından malzeme 20 sn dinlendirilip asıl ölçüme geçilmiştir. Ölçümde malzemeye uygulanan kayma hızı kademeli olarak önce $0,1 \text{ s}^{-1}$ 'den 300 s^{-1} 'ye artarak, sonrasında ise 300 s^{-1} 'den $0,1 \text{ s}^{-1}$ 'ye azalarak uygulanmıştır. Cihaza ait Rheoplus yazılımı kullanılarak serilere ait reolojik davranışlar elde

edilmiştir. Enjeksiyon malzemesine ait eşik kayma gerilmeleri ve plastik viskozite değerleri Herschel-Bulkley modeli kullanılarak hesaplanmıştır.

Sertleşmiş Hal Özelliklerinin İncelenmesi

Taze hal özellikleri incelenen ve performans yeterliliğini sağlayan numunelerin ilk olarak fiziksel özellikleri incelenmiştir. Üretilen serilerin kılcal su emme katsayısı, ağırlıkça ve hacimce su emme oranları, özgül ağırlık, birim hacim ağırlık, porozite, kompasite gibi fiziksel özellikleri deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Toplam porozite oranı hesap yöntemi ile belirlenmiştir. Deneyler numuneler üretildikten sonraki 28. günde yapılmıştır. Fiziksel özelliklerin ardından numunelerin mekanik özellikleri de incelenmiştir. Serilerin eğilme ve basınç dayanımları TS EN 1015-11'e [20] göre yapılan eğilme ve basınç dayanım deneyleri ile (Şekil 3) ölçülmüştür. Deney için üretilen numunelerin boyutları $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ 'dir. Deneyler, numuneler üretildikten sonraki 28. ve 56. günde yapılmış, numuneler deney gününe kadar kür koşullarına tabi tutulmuştur. Deneyler, deformasyon kontrollü 60 ton kapasiteli yükleme cihazında gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı tüm testlerde 1.0 mm/dk olarak sabit tutulmuştur. Eğilme deneyi sonucunda ortadan ikiye bölünen numuneler, $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ölçülerindeki çelik plakaların arasına yerleştirilerek basınç deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme deneyinde mesnet açıklığı standarda uygun olarak 100 mm olarak ayarlanmıştır.

Enjeksiyon malzemelerinin kür koşulları ile ilgili herhangi bir standart bulunmadığından TS EN 1015-11 [20] referans alınarak kür yapılmıştır. Üretilen numuneler 7 gün boyunca $\%95 \pm 5$ bağıl nemde ve kalıp içerisinde kür edilmiştir. Numuneler 7. günde kalıptan çıkarılarak deney gününe kadar $\%65 \pm 5$ bağıl nemde küre devam edilmiştir. Kür sırasında sıcaklık (20 ± 2) °C sabit tutulmuştur.



Şekil 3. Eğilme ve basınç dayanım deneyi

Kuruma Rötresinin Ölçülmesi

Kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin en büyük dezavantajlarından biri hızlı su buharlaşmasından kaynaklı oluşan kuruma rötresidir. Malzemenin büzülerek hacminin küçülmesi olarak tanımlanan rötire, yüksek oranlarda oluştuğunda enjeksiyon malzemesinin fiziksel yapısının bozulmasına neden olarak enjeksiyon uygulamasının kalitesini düşürebilir. Literatürde kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin rötire ölçümleri için özel

numunelerin ön üretiminde limit değeri aşılmadığı için viskozite düzenleyici katkı maddesi kullanılmamıştır. NFS'nin %0.1 ilave edilmesi ile terleme değeri referans seriye kıyasla yaklaşık %20 artmış, ancak üretilen tüm serilerde terleme oranı limit değeri olan %5'in altındadır. NFS'nin %0.2 ve %0.3 oranında ilavesi ile de enjeksiyon malzemelerinin terleme değerleri referans seriye benzer sonuçlar vermiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre, NFS'nin doğal viskozite düzenleyici olarak çalıştığı söylenebilir [12]. Ortalama deney sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Enjeksiyon malzemelerinin hacim sabitliği deney sonuçları

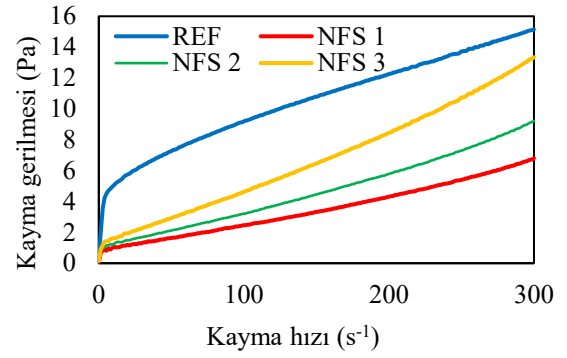
SERİ	Terleme Oranı (%)
REF	3.8
NFS 1	4.5
NFS 2	3.7
NFS 3	3.6
Limit	5 [22],[24],[25]

Reolojik Özelliklerin İncelenmesi

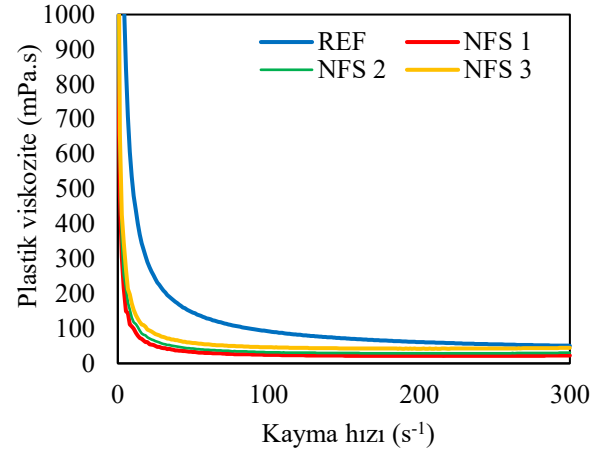
Malzemelerin reolojik davranışı dikkate alınarak seçilen Herschel-Buckley modeline göre hesaplanan reolojik parametreler Tablo 6'da verilmiştir. Enjeksiyon malzemelerinin reolojik ölçümlerinden elde edilen akış ve viskozite eğrileri Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Tüm serilerde R değeri 0.98'in üzerinde sağlanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, tüm parametrelerin aynı olduğu NFS katkılı serilerde NFS ilavesinin artması ile birlikte enjeksiyon malzemelerinin eşik kayma gerilmelerinin de arttığı görülmüştür. REF serisinin eşik kayma gerilmesinin NFS katkılı serilerden daha yüksek olmasına enjeksiyon malzemelerinin tasarımı sırasında hacim sabitliği özelliğinin limit değerini sağlamak amacı ile REF serisinde kullanılan yüksek miktarda viskozite düzenleyici katkı maddesinin neden olduğu düşünülmektedir. Reolojik parametrelerin kullanılan katkı maddeleri, sıcaklık, bekleme süresi gibi pek çok değişkenden etkilendiği bilinmektedir [26]. Çimento esaslı harçlar üzerinde yapılan çalışmalarda da NFS ilavesi ile doğru orantılı şekilde akma gerilmesinin ve plastik viskozitenin arttığı ve malzemelerin kayma incelmeleri davranışı gösterdiği belirtilmiştir [13]. Bu çalışma kapsamında üretilen NFS katkılı kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin de kayma incelmeleri davranışı gösterdiği Şekil 7'de görülmektedir. Bu duruma lifler arası oluşan bağların akış hareketini yavaşlatmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 6. Herschel-Buckley modeline göre hesaplanan reolojik parametreler

SERİ	Eşik Kayma Gerilmesi (τ_0) (Pa)	Kararlılık İndeksi (K)	Akış İndeksi (n)
REF	2.99	0.430	0.58
NFS 1	0.96	0.005	1.24
NFS 2	1.21	0.006	1.25
NFS 3	1.49	0.012	1.21



Şekil 6. Enjeksiyon malzemelerine ait akış eğrileri



Şekil 7. Enjeksiyon malzemelerine ait viskozite eğrileri

Sertleşmiş Hal Özelliklerinin İncelenmesi

Kılcallıkla Su Emiliminin Belirlenmesi

Serilerin kılcal su emme katsayıları TS EN 15801 [27] uyarınca 28. günde gerçekleştirilen kılcal su emme deneyi ile belirlenmiş, sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Serilerin kılcal su emme katsayıları

SERİ	Kılcal Su Emme Katsayısı ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{sn}})$)
REF	1.08 ± 0.19
NFS 1	0.46 ± 0.02
NFS 2	0.47 ± 0.03
NFS 3	0.68 ± 0.03

Deney sonuçları incelendiğinde NFS katkısının kılcallıkla su emilimini NFS 1 ve NFS 2 serilerinde %56 - %57, NFS 3 serisinde ise %37 düşürdüğü görülmektedir. Bu duruma NFS'nin hidrofilik yapısının neden olduğu söylenebilir. NFS 3 serisinde kılcal su emme miktarının diğer NFS katkılı serilere oranla yüksek olma nedeninin uniform olmayan dağılım olduğu düşünülmektedir [9],[10].

Temel Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Enjeksiyon malzemelerinin temel fiziksel özellikleri deneysel çalışmalara ait bağıntılar kullanılarak

hesaplanmıştır. Deneyler üretimden sonraki 28. günde yapılmıştır. Deney sonuçları sırasıyla Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Serilerin temel fiziksel özellikleri

SERİ	Birim Hacim Ağırlık	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Hacimce Su Emme (%)	Porozite (%)
REF	0.96	2.55	63.5 ±0.7	60.9 ±0.5	62.4 ± 0.1
NFS1	0.97	2.64	61.6 ±0.4	60.0 ±0.4	63.0 ±0.0
NFS 2	0.96	2.60	61.9 ±0.4	59.5 ±0.4	63.1 ±0.0
NFS 3	0.95	2.59	60.8 ±0.1	58.0 ±0.4	63.2 ±0.2

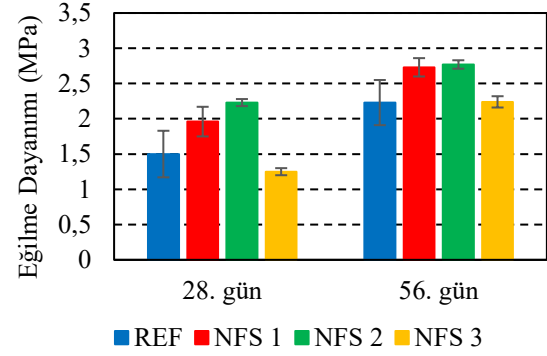
Enjeksiyon malzemelerinin temel fiziksel özellikleri incelendiğinde tüm serilerde toplam boşluk oranının oldukça fazla olduğu, boşlukların tamamına yakınının dışa açık olduğu ve NFS katkısının toplam boşluk oranını az miktarda da olsa artırdığı söylenebilir. Toplam boşluk oranının malzemenin su muhtevası ile doğru orantılı olduğu düşünüldüğünde enjeksiyon malzemelerinin bünyesindeki yüksek su oranı ve NFS’nin yüksek su talebi bu durumu açıklamaktadır. Toplam boşluk oranı daha fazla olmasına rağmen NFS katkılı enjeksiyon malzemelerinin %1.5 - %4 arasında daha yoğun olduğu, en yoğun malzemenin ise %0,1 NFS katkısı içeren seri olduğu görülmektedir. Ağırlıkça ve hacimce su emme oranları incelendiğinde NFS katkısının su emme miktarını %1 - %3 azalttığı gözlemlenmiştir. NFS liflerinin karışım suyunun bir kısmını hapsederek bünyesinde tutması enjeksiyon malzemesinin kılcallıkla emdiği su miktarının azalmasına yol açmıştır. Serilerin kılcal su emme katsayıları da bu durumla örtüşmektedir.

Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Enjeksiyon malzemelerinin eğilme dayanımı TS EN 1015-11 [20]’e göre yapılan eğilme deneyi ile ölçülmüştür. 40×40×160 mm boyutlarında üretilen numuneler, 28. ve 56. günde deformasyon kontrollü 60 ton kapasiteli yükleme cihazında eğilmeye tabi tutularak kırılmıştır. Deneyde kullanılan numune sayısı her seri için 6’dır. Yükleme hızı tüm testlerde 1,0 mm/dk’dır. Eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 9 ve Şekil 8’de verilmiştir. Sonuçlar üretilen tüm serilerin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Tablo 9. Eğilme dayanımı deney sonuçları

SERİ	f_c (28.gün) (MPa)	f_c (56.gün) (MPa)
REF	1.50 ± 0.33	2.23 ± 0.32
NFS 1	1.96 ± 0.21	2.73 ± 0.13
NFS 2	2.23 ± 0.05	2.77 ± 0.06
NFS 3	1.25 ± 0.05	2.24 ± 0.08



Şekil 8. Enjeksiyon malzemelerinin eğilme dayanımları

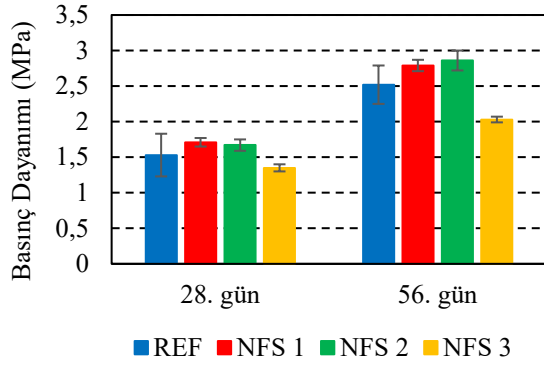
Deney sonuçları incelendiğinde, NFS katkısının hem 28. günde hem de 56. günde eğilme dayanımında artış sağladığı görülmektedir. Her iki deney gününde de en yüksek eğilme dayanımı NFS 2 serisinde elde edilmiştir. NFS 2 serisi referans numuneye kıyasla 28. günde %49, 56. günde ise %24 daha fazla mukavemet göstermiştir. NFS 1 ve NFS 2 serilerinde kademeli bir artış söz konusuysen NFS 3 serisinde 28. günde %17 düşüş gözlemlenmiş, 56. günde ise referans numuneye yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu duruma liflerin topaklanması sonucu homojen olmayan dağılımın neden olduğu düşünülmektedir [9],[10]. NFS ilavesi optimum miktarda kullanıldığında enjeksiyon malzemelerinin eğilme dayanımına olumlu yönde etki etmiştir.

Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Serilerin basınç dayanımı TS EN 1015-11 [20] referans alınarak yapılan basınç dayanım deneyi ile ölçülmüştür. Eğilme deneyi sonucunda ortadan ikiye bölünen numuneler, 40×40 mm ölçülerindeki çelik plakaların arasına yerleştirilerek deformasyon kontrollü 60 ton kapasiteli yükleme cihazında basınca tabi tutularak kırılmıştır. Deneyde kullanılan numune sayısı her seri için 12’dir. Yükleme hızı tüm testlerde 1,0 mm/dk’dır. Ortalama basınç dayanımı sonuçları Tablo 10 ve Şekil 9’da verilmiştir.

Tablo 10. Basınç dayanımı deney sonuçları

SERİ	f_b (28.gün) (MPa)	f_b (56.gün) (MPa)
REF	1.53 ± 0.30	2.52 ± 0.27
NFS 1	1.71 ± 0.06	2.79 ± 0.08
NFS 2	1.67 ± 0.08	2.86 ± 0.14
NFS 3	1.35 ± 0.05	2.03 ± 0.04



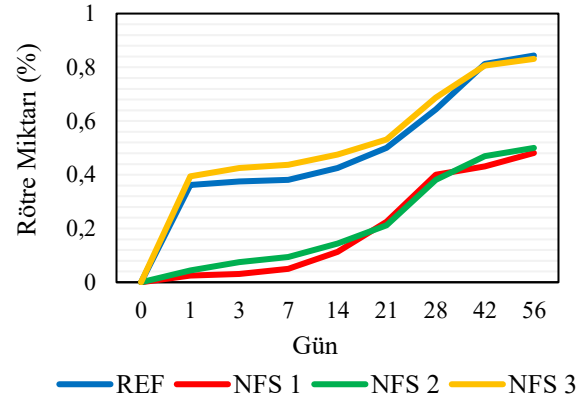
Şekil 9. Enjeksiyon malzemelerinin basınç dayanımları

Deney sonuçları incelendiğinde, NFS ilavesinin 28. gün basınç dayanımında %9 - %12, 56. gün dayanımında ise %11 - %14 arasında dayanım artışı sağladığı görülmüştür. NFS 1 ve NFS 2 serilerinin dayanımları birbirine çok yakın olmakla birlikte en yüksek dayanım 28. günde NFS 1 serisinde, 56. Günde ise NFS 2 serisinde elde edilmiştir. NFS 3 serisinde hem 28. hem de 56. gün dayanımında liflerin topaklanması sonucu homojen olmayan dağılımdan kaynaklanan dayanım kaybı gözlemlenmiştir [9],[10]. Elde edilen sonuçlar, kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinde NFS kullanımına dair herhangi bir çalışma bulunmaması nedeniyle literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Çimento esaslı harçlarda ve yonga levhalarında yapılan çalışmalarda da optimum miktardaki NFS ilavesinin basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği söylenebilir [12]. Basınç dayanımı açısından değerlendirildiğinde, bu çalışma kapsamında üretilen kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri için optimum NFS miktarı %0,2 olarak kabul edilmiştir. Mekanik özellikler incelendiğinde NFS ilavesinin eğilme dayanımını daha fazla artırdığı görülmektedir. Nano yapısı sayesinde mekanik özelliklerde iyileştirme sağlarken, lifli yapısı sayesinde de eğilme dayanımını da artırmıştır.

Kuruma Rötresi Ölçüm Sonuçları

Serilerin rötre ölçümleri, ASTM C-940'a [19] göre ölçülmüştür. Serilerin kalıptan çıkarıldıkları ilk gün 0. gün kabul edilerek ilk kez ölçüm yapılmış daha sonra 1. 7. 14. 21. 28. 42. ve 56. günlerde de ölçüm yapılarak boy farkları hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 10'da verilmiştir.

Sonuçlar tüm serilerin boy değişimlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

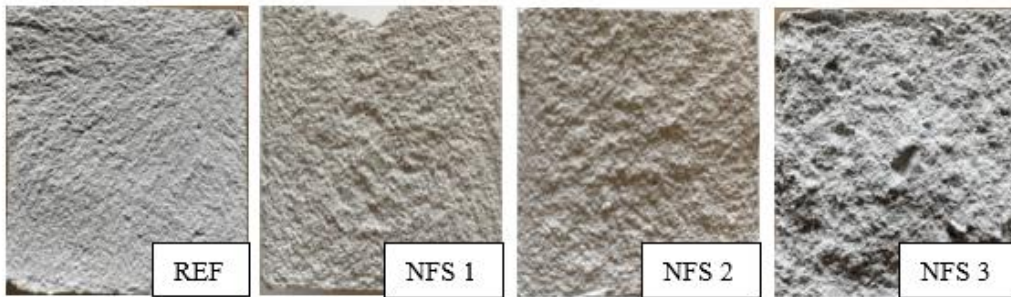


Şekil 10. Enjeksiyon malzemelerinin rötre ölçümleri

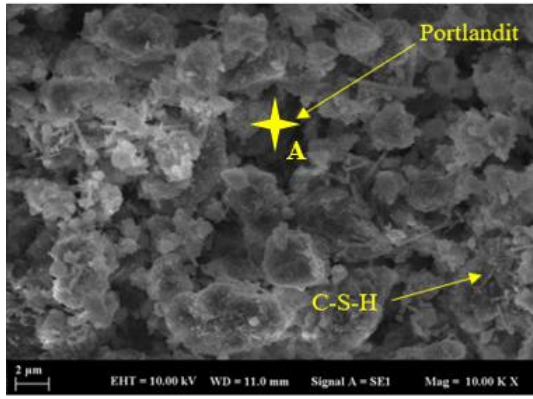
Serilerin rötre ölçümleri incelendiğinde NFS 1 ve NFS 2 serilerinde rötre oranının sırasıyla %43 ve %41 azaldığı görülmektedir. Buna karşın liflerin topaklanmasına bağlı homojen dağılımın elde edilemediği NFS 3 serisi REF serisi ile benzer rötre miktarlarında seyretmiştir. Sonuç olarak, NFS katkısı kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinde rötre azaltıcı bir etkiye sahiptir. Rötre miktarının fazla olduğu enjeksiyon malzemelerinde katkı maddesi olarak tercih edilebilir [13].

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDS) ile İçyapının İncelenmesi

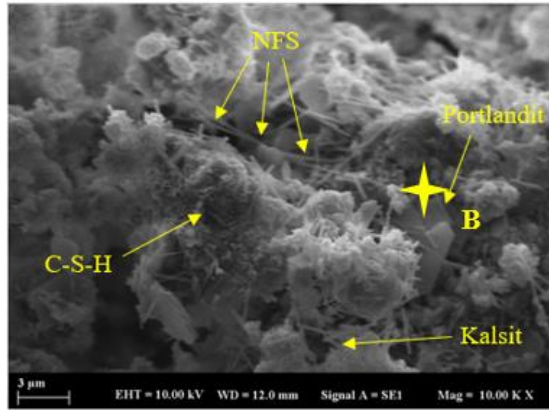
Enjeksiyon malzemelerinin 28. günde yapılan eğilme testi sonrasında numunelerin kırılma yüzeylerine ait fotoğraflar Şekil 11'de verilmiştir. Enjeksiyon malzemelerinin kesit görüntülerinde NFS liflerinin topaklanması net bir şekilde görülmektedir. REF numune pürüzsüz bir yapıya sahipken NFS katkısı ile doğru orantılı olarak topaklanmaya bağlı pürüzlülük artmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu ile 28 günlük numunelerde yapılan SEM-EDS analizine ait görüntülerden referans numunenin iç yapı özellikleri Şekil 12'de, NFS 1'in iç yapı özellikleri Şekil 13'te, NFS 2'nin iç yapı özellikleri Şekil 14'te, NFS 3'ün iç yapı özellikleri Şekil 15'te verilmiştir.



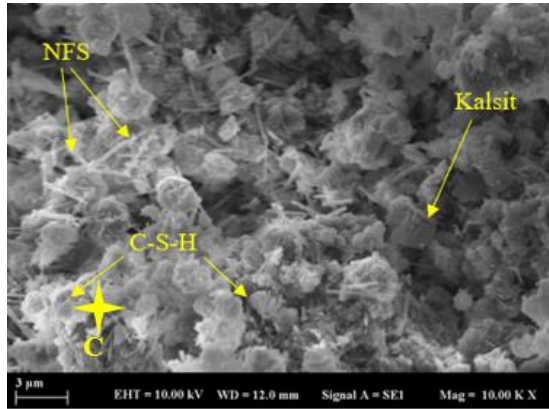
Şekil 11. Enjeksiyon malzemelerinin kesit görüntüleri



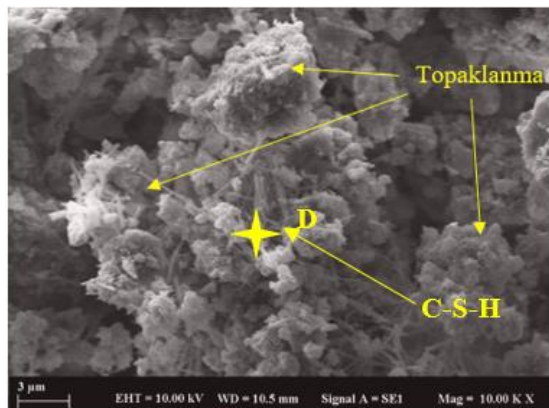
Şekil 12. REF serisinin iç yapı analizi



Şekil 13. NFS 1 serisinin iç yapı analizi



Şekil 14. NFS 2 serisinin iç yapı analizi



Şekil 15. NFS 3 serisinin iç yapı analizi

Tablo 11. SEM-EDS analizi sonuçları

Elementler	Serilere Ait Nokta/Atomik Oran (%)			
	REF (A)	NFS1 (B)	NFS2 (C)	NFS3 (D)
Ca	54.48	42.43	39.59	34.23
O	34.82	40.97	39.58	43.30
C	0.78	2.36	2.18	3.06
Si	3.41	3.54	3.51	5.80
Al	1.20	1.89	3.74	3.67

Serilerin SEM-EDS sonuçları incelendiğinde, hidrasyon tepkimeleri sonucu oluşması beklenen portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), kalsit (CaCO_3) ve C-S-H jellerinin olduğu gözlemlenmiştir. EDS analizleri genel olarak portlandit, kalsit ve C-S-H jellerinin bulunduğu noktalarda yapılmıştır. Görüntüleri ait EDS sonuçları Tablo 11’de verilmiştir. NFS 1 serisinde liflerin homojen şekilde dağıldığı ve dikiş etkisi yoluyla yükü aktaracak köprüler kurduğu, NFS 2 serisinde liflerin oldukça yoğunlaştığı ancak homojen dağılımın devam ettiği görülmektedir. NFS 3 serisinde ise liflerin toplanarak kümeler oluşturduğu ve homojen dağılmadığı görülmektedir. Bu durum liflerin istenildiği gibi çalışmamasına ve mekanik özelliklere etki etmemesine veya negatif etki etmesine yol açmaktadır [9],[10]. Tablo 11’de verilen EDS sonuçları incelendiğinde sonuçlar arasında tipik bir farklılık olmamakla birlikte A ve B noktalarındaki yüksek Ca miktarı portlandit oluşumunu işaret etmektedir. C-S-H oluşumlarının görüldüğü noktalarda (C ve D) Ca ve O ek olarak Si ve Al elementlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Artan C-S-H bileşimi miktarı mekanik özelliklerin artmasına katkı sağlamış, ancak NFS3 serisinde meydana gelen toplanmalar nedeniyle dayanımda değerler daha düşük olarak ölçülmüştür.

4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışma kapsamında, tarihi yapıların onarımında ve güçlendirilmesinde kullanılan kireç esaslı enjeksiyon malzemelerine nanofiber selüloz katkısının etkilerini araştırmak amacı ile dört farklı enjeksiyon malzemesi geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarla, üretilen enjeksiyon malzemelerinin fiziksel, reolojik, mekanik özellikleri ve rötre davranışı incelenerek NFS katkısının kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkileri belirlenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen tüm bilgiler ışığında ulaşılan sonuçlar ve sunulan öneriler aşağıda sıralanmıştır.

- Enjeksiyon malzemelerinin taze halde sağlaması gereken üç temel özellik olan akışkanlık, penetrasyon ve hacim sabitliği limit değerleri sağlamıştır.
- NFS katkısı kullanılan hiçbir seride viskozite düzenleyici katkı maddesine ihtiyaç duyulmamıştır. Bu bakımdan NFS, hacim sabitliği özelliğini dengelemede viskozite düzenleyici kimyasal katkı maddeleri yerine tercih edilebilecek doğal bir alternatiftir. Terleme deneyi sonuçlarına bakıldığında REF serisinde %1 viskozite

düzenleyici ilavesi ile elde edilen %3,8 terleme değeri, NFS ilave serilerde viskozite düzenleyici katkı ilave edilmeden %4,5 ila %3,6 arasında ölçülmüştür. Artan NFS oranı ile REF seriden daha düşük terleme değeri elde edilmiştir. Reolojik özellikler incelendiğinde, NFS ilavesi plastik viskozite ve eşik kayma gerilmesi değerlerini düşürmektedir.

- NFS katkısının temel fiziksel özelliklere etkileri incelendiğinde kılcallıkla su emilimini düşürdüğü görülmüştür. Diğer fiziksel özelliklere belirgin bir etkisi görülmemiştir. Boşlukların büyük çoğunluğu dışa açıktır. NFS katkısının toplam boşluk miktarına belirgin bir etkisi görülmemiştir.

- Serilerin 28. ve 56. günlerinde yapılan eğilme dayanım deneyleri sonucunda NFS ilavesinin kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin eğilme ve basınç dayanımını artırdığı görülmüştür.

- Mekanik deney sonuçlarında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus optimum karışım oranlarının belirlenmesidir. %0,3 oranında NFS katkısı içeren seri hem eğilme dayanımında hem de basınç dayanımında tüm serilerden daha düşük bir performans göstermiştir. Bu durum liflerin topaklanması sonucu dağılımın uniform olmamasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle enjeksiyon malzemesi tasarlanırken bu durum göz önünde bulundurularak optimum katkı oranına karar verilmelidir. Bu çalışma için optimum NFS katkısı %0,2 olarak belirlenmiştir.

- Kuruma rötresi ölçümleri sonucunda NFS katkılı enjeksiyon malzemelerinin katkısız olana göre daha az rötre yaptığı ortaya çıkmıştır. Topaklanma gözlenen NFS 3 serisinde ise referans seriye benzer şekilde yüksek rötre değerleri ölçülmüştür. Rötre davranışı açısından da optimum katkı oranı önem taşımaktadır.

Bütün deneysel çalışmalar sonucunda, optimum miktarda kullanılan NFS katkısının kireç esaslı enjeksiyon malzemelerinin mekanik performansını düşük oranda da olsa artırması, rötre büzülmelerinden kaynaklanan çatlaklara karşı dayanım sağlaması ve hacim sabitliği özelliğini dengelemesi gibi olumlu katkılar sunduğu görülmüştür. Küresel ısınma, iklim değişikliği ve çevre kirliliğinin büyük sorunlar oluşturduğu günümüzde biyo-esaslı, yenilenebilir ve sürdürülebilir yapı malzemeleri büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle NFS ve diğer lifli katkı maddelerinin araştırılması, geliştirilmesi ve yapı malzemelerinde kullanımı inşaat sektörü için umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

NFS ilavesi ile üretilen bu kireç esaslı enjeksiyon malzemeleri, onarımı yapılacak tarihi yapının özgün malzeme özellikleri ile uyumlu olduğu sürece yapıdaki çatlakların doldurulması ve süreklilik sağlanması için kullanılabilir. Uygulamada nano malzeme kullanımına ve bu malzemenin matris içerisinde homojen olarak dağıtılmasına özen gösterilmelidir. Nano malzemelerin saha uygulamalarında pratik bir şekilde dağıtılmasının zor olması nedeni ile uygulama öncesinde gerekli konsantrasyonda su içinde dağıtılması ve stabilitesi

koruyan bu karışımın yerinde kireç ile karıştırılması önerilmektedir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”

Yazar Katkıları

Makale tüm yazarlar tarafından okunarak ve onaylanarak yüklenmeli, her yazara ait katkı makalede açıkça belirtilmelidir. Yazarlar makale hazırlamada tasarım, veri toplama, verilerin analizi, revizyon gibi aşamalarda kapsamlı katkı sağlayıp makaleye son şeklini verirler. Tüm yazarlar makaleye yeterli derecede katkıda bulunmak zorundadır. Her yazarın ‘Soyadını’ ardına aşağıda verilen en uygun kategorilerden birini veya birkaçını ekleyerek belirtilebilir:

-Çalışma konsepti ve tasarım

-Veri toplama

-Verilerin analizi ve yorumlanması

-Taslağın oluşturulması

-Revizyon

-Diğer katkılar (Yukarıda listelenen faktörlerin dışında yazar katkıları için yapılan katkı 1 cümle ile özet olarak bu başlık altında belirtilebilir.)

Teşekkür

Bu çalışmayı, FYL-2023-5642 numaralı projesi ile destekleyen Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü’ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] N. Davey, A History of Building Materials. London: Phoenix House, 1961.
- [2] L. B. Sickels, “Organic Additives in Mortars,” Edinburgh Architecture Research, vol. 8, pp. 7–20, 1981.
- [3] Z. Ahunbay, Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon. İstanbul: YEM Yayın, 1999.
- [4] G. Penelis, M. Karaveziroglou and J. Papayanni, “Grouts for Repairing and Strengthening Old Masonry Structures,” in Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings, C. A. Brebbia, Ed., Basel, Switzerland: Computational Mechanics Publications, 1989, pp. 79–188.
- [5] L. Binda, A. Saisi and C. Tedeschi, “Compatibility of Materials Used for Repair of Masonry Buildings: Research and Applications,” in Fracture and Failure of Natural Building Stones – Applications in the Restoration of Ancient Monuments. Netherlands: Springer, 2006.
- [6] D. A. Lange, C. Ouyang and S. P. Shah, “Behavior of Cement Based Matrices Reinforced by Randomly Dispersed Microfibers,” Advanced Cement Based Materials, vol. 3, no. 1, pp. 20–30, 1996.

- [7] W. Yao, J. Li and K. Wu, "Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 1, pp. 27–30, 2003.
- [8] S. Pascal, A. Alliche and P. Pilvin, "Mechanical Behaviour of Polymer Modified Mortars," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 380, no. 1–2, pp. 1–8, 2004.
- [9] M. L. Santarelli, F. Sbardella, M. Zuena, J. Tirillo and F. Sarsini, "Basalt Fiber Reinforced Natural Hydraulic Lime Mortars: A Potential Bio-Based Material for Restoration," *Materials & Design*, vol. 63, pp. 398–406, 2014.
- [10] M. M. Barbero-Barrera and N. F. Medina, "The Effect of Polypropylene Fibers on Graphite-Natural Hydraulic Lime Pastes," *Construction and Building Materials*, vol. 184, pp. 591–601, 2018.
- [11] M. Ardanuy, J. Claramunt, R. Arévalo, F. Parés, E. Aracri and T. Vidal, "Nanofibrated Cellulose (NFS) as a Potential Reinforcement for High Performance Cement Mortar Composites," *BioResources*, vol. 7, pp. 3883–3894, 2012.
- [12] J. Goncalves, Y. Boluk and V. Bindiganavile, "Turbidity-Based Measurement of Bleeding in Fresh Cement Paste as Affected by Cellulose Nanofibres," *Cement and Concrete Composites*, vol. 123, Art. no. 104197, 2021.
- [13] H. H. Kolour, M. Ahmed, E. Alyaseen and E. N. Landis, "An Investigation on the Effects of Cellulose Nanofibrils on the Performance of Cement Paste and Concrete," *Advances in Civil Engineering Materials*, vol. 7, pp. 463–478, 2018.
- [14] L. G. Baltazar, F. M. A. Henriques, F. Jorne and M. T. Cidade, "The Use of Rheology in the Study of the Composition Effects on the Fresh Behaviour of Hydraulic Lime Grouts for Injection of Masonry Walls," *Rheologica Acta*, vol. 52, no. 2, pp. 127–138, 2013.
- [15] F. Jorne, F. M. A. Henriques and L. G. Baltazar, "Evaluation of Consolidation of Grout Injection with Ultrasonic Tomography," *Construction and Building Materials*, vol. 66, pp. 494–506, 2014.
- [16] ASTM D6910, Standard Test Method for Marsh Funnel Viscosity of Clay Construction Slurries. ASTM International, 2009.
- [17] TS EN 445, Şerbet-Öngerilmeli Tendonlar İçin Deney Yöntemleri. Türk Standartları Enstitüsü, 2012.
- [18] BS EN 1771, Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures – Test Methods – Determination of Injectability and Splitting Tests. British Standards Institution, 2004.
- [19] ASTM C940, Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory. ASTM International, 2010.
- [20] TS EN 1015-11, Kâgir Harcı – Deney Metotları – Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 2000.
- [21] TS EN 447, Şerbet-Öngerilmeli Tendonlar İçin Temel Gereklere, Türk Standartları Enstitüsü, 2012.
- [22] A. Kalagri, A. Miltiadou-Fezans, and E. Vintzileou, "Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures," *Materials and Structures*, vol. 43, pp. 1135–1146, 2010.
- [23] A. Miltiadou-Fezans, "Fluidity of hydraulic grouts for masonry strengthening," *Materials and Structures*, vol. 45, pp. 1817–1828, 2012.
- [24] A. Bras and F. M. A. Henriques, "Natural hydraulic lime based grouts–The selection of grout injection parameters for masonry consolidation," *Construction and Building Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 135–144, 2012.
- [25] A. Miltiadou-Fezans and T. P. Tassios, "Stability of hydraulic grouts for masonry strengthening," *Materials and Structures*, vol. 46, no. 10, pp. 1633–1652, 2013.
- [26] B. Dinç-Sengönül, D. Oktay and N. Yüzer, "Effect of Temperature, Resting Time and Brick Dust (Horasan) on the Rheological Properties of Hydraulic Lime-Based Grouts," *Construction and Building Materials*, vol. 265, Art. no. 120644, 2020.
- [27] TS EN 15801, Kültürel Varlıkların Korunması – Deney Metotları – Suyun Kılcal Emiliminin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, 2010.