



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.12.2024  
Kabul Tarihi : 21.01.2025

Received Date : 25.12.2024  
Accepted Date : 21.01.2025

## POLİPROPİLEN LİFLİ MİKRO BETONLARDA NANO SİLİKA KULLANIMININ ETKİSİ

### EFFECT OF USING NANO SILICA IN POLYPROPYLENE FIBRE MICRO CONCRETES

Melek AKGÜL<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-8815-3762)

<sup>1</sup> Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Melek AKGÜL, melekakgul@munzur.edu.tr

#### ÖZET

Son yıllarda nano malzemelerin kullanımı diğer tüm uygulama alanlarında olduğu gibi çimento esaslı sistemlerde de önem arz etmektedir. Bu çalışma, harç ve beton uygulamalarında değerlendirilmiş olan nano malzemeler ve polipropilen liflerin mikro betonlarda eş zamanlı kullanımını amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında üretilen 9 seri mikro betonun mekanik, fiziksel ve mikro yapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Karışım tasarımlarında 3 farklı miktarda (0, 5, 10 kg/m<sup>3</sup>) nano silika ve 3 farklı miktarda (0, 1.2, 2.4 kg/m<sup>3</sup>) 12 mm uzunluğunda kırpılmış polipropilen lif kullanılmıştır. Referans karışımında kullanılan çimento miktarı 625 kg/m<sup>3</sup> ve tüm karışımlarda kullanılan silis dumanı miktarı 125 kg/m<sup>3</sup>'tür. Üretilen ve kirece doygun su kürü ile olgunlaştırılan 9 seri mikro beton ile bir dizi fiziksel ve mekanik deney uygulanmıştır. Ayrıca 9 seri mikro betonu temsil edecek şekilde 6 seriden sağlanan numune örnekleriyle Taramalı Elektron Mikroskopu ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi analizi yapılmıştır. Buna göre artan nano silika miktarı basınç ve eğilme dayanımı üzerinde doğrusal bir artış sunmaz, ancak 5 kg/m<sup>3</sup> nano silika kullanımı eğilme ve basınç dayanımı üzerinde pozitif etkiye sahiptir. Ayrıca polipropilen lif kullanımı eğilme dayanımını artırmaktadır. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi verilerine göre artan nano silika miktarı C-S-H oluşumunu desteklemektedir. Taramalı Elektron Mikroskopu analizi görüntülerinde ise polipropilen lif miktarının karışımdaki dağılımı belirgindir.

**Anahtar Kelimeler:** Mikro beton, nano silika, polipropilen lif, mekanik özellikler, mikroyapı.

#### ABSTRACT

In recent years, the use of nano materials is important in cement-based systems as in all other application areas. This study aims at the simultaneous use of nanomaterials and polypropylene fibers, which have been evaluated in mortar and concrete applications, in micro concretes. The mechanical, physical and microstructural effects of 9 series of micro concrete produced within the scope of the study were investigated. In the mixture designs, 3 different amounts (0, 5, 10 kg /m<sup>3</sup>) of nano silica and 3 different amounts (0, 1.2, 2.4 kg/m<sup>3</sup>) of 12 mm long chopped polypropylene fiber were used. The amount of cement used in the reference mix is 625 kg/m<sup>3</sup> and the amount of silica fume used in all mixes is 125 kg/m<sup>3</sup>. A series of physical and mechanical experiments were carried out with 9 series of micro concretes produced and matured with lime saturated water curing. In addition, Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectrum analysis were performed on samples from 6 series to represent 9 series of micro concrete. Accordingly, increasing amount of nano silica does not provide a linear increase in compressive and flexural strength, but the use of 5 kg/m<sup>3</sup> nano silica has a positive effect on flexural and compressive strength. In addition, the use of polypropylene fiber increases flexural strength. According to Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy data, increasing amount of nano silica supports more C-S-H formation. In the Scanning Electron Microscopy analysis images, the distribution of the amount of polypropylene fiber in the mixture is evident.

**Keywords:** Micro concrete, nano silica, polypropylene fibre, mechanical properties, microstructure.

## GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve yapı ihtiyacı, inşaat sektörünün dünya ekonomisindeki yerini üst sıralara taşımaktadır (Bayrak ve Telatar, 2021). Bunun yanı sıra işçilik masrafları sektörün önemli bir gider kalemidir (Akgül, 2024). İşçilik giderlerini azaltmak; sürdürülebilir ve ekonomik uygulamalara bağlıdır. Çimento esaslı kompozitler, özellikle yapıların inşasında en fazla kullanılan malzemelerin temelini oluşturur (Sevim et al., 2022). Çimento sisteminin performansını arttırmak, uygun malzeme kullanımının yanı sıra bakım ve yaşam döngüsü maliyetini azaltacak daha sürdürülebilir sistemlerin geliştirilmesine bağlıdır (Felekoğlu, 2014; Sevim et al., 2021; Singh et al., 2013). Bu amaçla sıklıkla tercih edilen kendiliğinden yerleşen sistemlerinin üretim esası; artan işçilik giderlerini azaltmak için daha fazla ince malzeme ve vizkozite artırıcı katkı maddesi kullanımına dayanır (Akgül, 2024; Akgül ve Hansu, 2024). Kendiliğinden yerleşen mikro beton (KYMB), 100 µ m'den küçük maksimum agreg boyutuna sahip, akışkan ve ayrışmayan kohezyonel kıvama sahip bağlayıcılar ve inert malzemelerin bir karışımı olarak tanımlanmaktadır (Felekoğlu, 2009). Bunun yanı sıra mikro beton (MB) uygulamalarında daha küçük agreg boyutlarının kullanılması yönünde artan bir eğilim vardır (Etli, 2022). MB'lerde uygun reolojiyi sağlamak için yüksek aralıklı su azaltıcı katkı maddelerinin kullanımı ve su içeriğinin dengeli aralıkta tutulması önemlidir (Felekoğlu, 2014). Uygulamalarda en fazla tercih edilen katkı maddelerinden biri plastikleştirici katkı maddeleridir. Ancak bu katkı maddelerinin miktarı numune içindeki hava muhtevası üzerinde etkilidir ve birim hacim ağırlığı dolaylı olarak düşürmektedir. Yüksek doldurma yeteneği sayesinde enjeksiyon amaçlı harç malzemesi olarak kullanılan bu sistemler, her ne kadar kırılğan bir yapı sergilese de, son uygulamalarda özellikle elyaf takviyesi ile birçok yeni kullanım alanına erişebilmektedir (Topçu & Ateşin, 2016).

Yapılan birçok çalışmanın sonucu olarak nano malzemelerin kullanımı farklı alanlarda artan bir trende sahiptir. Nano parçacıklar geleneksel malzemelerden farklı olarak çok ince boyutludur ve hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri bazı uygulama yöntemleri ile desteklendiğinde kabul edilebilir üstünlükler sunmaktadır (H. Li et al., 2004). Bu hali ile nano malzeme, harç ve betonun dayanıklılık özelliklerine büyük katkı sağlayan en etkili malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir (Naji Givi et al., 2010). Beton ve harç elemanların maruz kaldığı birçok kimyasal saldırı elemanın erkili servis ömrünü azaltmaktadır. Bu kimyasal saldırılara maruz kalan elemanın genişmesi ve çatlaması ile devam eden hasar sürecinde dayanım ve durabilite kaybı kaçınılmazdır (Akgül et al., 2022). Boşluk yapısı ile de ilişkili olan bu performans kaybını önlemek için en sık başvurulanan malzemeler mikro silika (MS) ve nano silika (NS)'lardır. Özellikle betonda kullanılan mikro ve nano malzemelerin, arayüz bölgesinde filler etkisi sağlayarak performansı arttırması beklenir. Bunun yanı sıra silika içeriğine bağlı olarak betonda puzolanik etki sunduğu kabul edilir. Tüm bu özellikleri ile elemanda daha yoğun bir arayüz ve daha güçlü bir yapı sağlanmaktadır (Başaran, 2022). Ayrıca NS'nin, MS, uçucu kül (UK) veya yüksek fırın cürufu (YFC) ile birlikte kullanımı sinerjik bir etkiye sahiptir. Tek başına kullanımına kıyasla ikili veya üçlü değişimi mekanik ve durabilite özellikleri açısından çok daha iyi sonuçlar vermektedir (Başaran, 2022; L. G. Li et al., 2018; Liu et al., 2016; P. P. et al., 2021; Türkmenoğlu vd., 2022). NS kullanılarak üretilen beton elemanlarda, 0,53 su/bağlayıcı oranı ile sadece NS veya sadece YFC kullanımı ile referans karışımlara göre basınç dayanımında elde edilen artış oranları sırasıyla %8,8 ve %7,8'dir. (Türkmenoğlu vd., 2022). NS eklenen karışımlarda belirlenen yüksek reaksiyon hızı, hidrasyon ısı ve puzolanik reaktivite; genel olarak parçacıklarının özgül yüzey alanına ve SiO<sub>2</sub> içeriğine bağlıdır (Björnström et al., 2004; Liu et al., 2016). NS, sertleştirilmiş çimento hamuru ve agregalar arasındaki arayüz geçiş bölgesinde dizilmiş kalsiyum hidroksit (C-H) kristalleriyle reaksiyona girebilir ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli üretebilir. Böylece, C-H kristallerinin boyutu ve miktarı önemli ölçüde azalır ve sertleşmiş çimento hamurunun erken yaş mukavemeti artar (Ji, 2005).

Çimento esaslı kompozitlerde sıklıkla tercih edilen lifler genel bir kabul ile, doğal ve yapay olarak sınıflandırılır ve bu çeşitliliğin bir sonucu olarak farklı birçok kullanım alanına entegre edilmektedir (Dheyaaldin et al., 2022; Xin et al., 2019). Özellikle çelik liflere göre daha fazla tercih edilen ve bir ticari lif türü olan Polipropilen lif (PL)'lerin maliyeti düşük, korozyon direnci yüksektir (Dheyaaldin et al., 2022; Xin et al., 2019). PL takviyeli beton ve harç elemanların fiziksel, mekanik, mikro yapı ve durabilitesinin tespitine dair çalışmalar önemli sonuçlar sunmaktadır (Açıkgenç vd., 2012; Khaliq & Kodur, 2011; Kim et al., 2020; Jeon et al., 2023; Wei et al., 2024). PL miktarı karışımın kalıplanma sonrası birim hacim ağırlığında etkilidir (Topçu vd., 2017) ve bunun yanı sıra PL kullanımı basınç dayanımını bir miktar düşürmekte, eğilme dayanımını ve elektriksel iletkenliği bir miktar arttırmaktadır (Uygunoğlu vd., 2017).

Mikro betonların bilinen kırılğan yapısını (Topçu & Ateşin, 2016) azaltmak için lif takviyesi iyi bir çözüm gibi kabul edilir. Lif kullanımı eğilme dayanımını artırır ancak basınç dayanımı üzerinde belirgin bir pozitif etki sunmaz. Bu amaçla eğilme dayanımı ve mikro betonun kırılğan yapısı üzerinde olumlu etki sunan PL kullanımı; NS'nin arayüz

bölgesinde sağlayacağı filler etkisi ve buna bağlı performans değişimi ile aynı anda değerlendirilmelidir. Bu çalışmada MB tasarımları oluşturulurken değişken parametre olarak PL takviyesinin yanı sıra NS'nin çimentoya ikame durumları esas alınmıştır. Bu amaçla bir tanesi referans olmak üzere 3 farklı miktarda PL ve 3 farklı miktarda NS değişimi uygulanmıştır. Üretilen 9 farklı MB, 7 ve 28 gün kirece doygun su kürü ile olgunlaştırılmış ve akabinde fiziksel, mekanik ve mikro yapıya yönelik tespitler yapılmıştır. Elde edilen veriler grafikler yardımı ile sunulmuş ve mevcut çalışmalar ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu hali ile çalışma sonuçları literatürde özellikle beton ve harç tasarımlarında kullanılan PL ve NS'nin mikro betonun fiziksel, mekanik ve mikro yapı üzerindeki etkisini sunmaktadır.

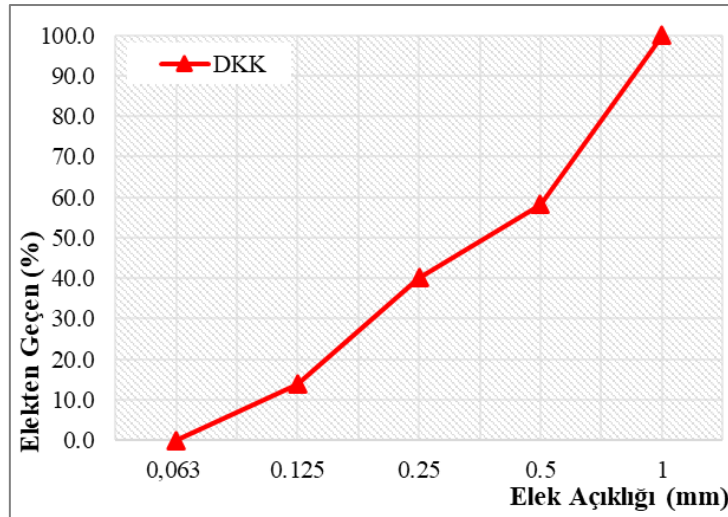
## MATERYAL VE METOD

Deneyisel çalışmada kullanılan materyal ve uygulanan deneySEL yöntemler bu bölümde sunulmuştur. Üretilen MB'larda Çimentoş-Elazığ firmasından temin edilen CEM-I 42.5R çimento (PÇ) (TS EN 197-1, 2011) ve çimentoya 3 farklı oranda ikame edilen NS'nin yanı sıra tüm karışımlarda sabit miktarda silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Tablo 1'de özellikleri verilen, PÇ, NS ve SD'nin özgül ağırlığı sırasıyla 3.15, 2.23, 2.32'dir.

**Tablo 1.** PÇ, NS ve SD'nin Özellikleri

|                      |                                | PÇ    | NS  | SD  |
|----------------------|--------------------------------|-------|-----|-----|
| Kimyasal bileşim (%) | CaO                            | 63.57 | -   |     |
|                      | SiO <sub>2</sub>               | 19.34 | >99 | 93  |
|                      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.75  | -   |     |
|                      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.15  | -   |     |
|                      | MgO                            | 2.90  | -   |     |
|                      | SO <sub>3</sub>                | 3.15  | -   |     |
|                      | K <sub>2</sub> O               | 0.81  | -   |     |
|                      | Na <sub>2</sub> O              | 0.41  | -   |     |
| Kızdırma kaybı       |                                | 1.92  | -   | 3.5 |

Tüm tasarımlarda 1 mm'lik kare gözlü elekten elenen doğal kırma kum (DKK) kullanılmıştır. Tunceli iline bağlı kırma taş ocaklarından temin edilen DKK'nin elek analizi Şekil 1'de verilmiştir (TS EN 933-1, 2012). Çalışmada karışım suyu olarak TS EN 1008'e (TS EN 1008, 2003) uygun dinlendirilmiş şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Kullanılan TS EN 934-2+A1'e (TS EN 934-2+A1, 2014) uygun polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcının firma ürün kodu Sika Visco Crete Hi-Tech-28'dir ve özgül ağırlığı 1.06'dır.



**Şekil 1.** DKK Granülometri Eğrisi

Referans karışımında kullanılan çimento miktarı 625 kg/m<sup>3</sup> ve tüm karışımlardaki kullanılan SD miktarı 125 kg/m<sup>3</sup>'tür. MB'lerin tasarımında kullanılan NS miktarı 0, 5, 10 kg/m<sup>3</sup>'tür. Ayrıca tüm NS ikame durumları için 0, 1.2 ve 2.4 kg/m<sup>3</sup> oranında PL kullanılarak toplamda 9 seri MB tasarlanmıştır. Tüm karışımlarda kullanılan su miktar, katkı maddesi ve karışım tasarımı ön çalışma sonuçları ve benzer çalışma verilerine bağlı olarak belirlenmiştir. Buna göre karışımlarda su miktarı 322.5 kg/m<sup>3</sup> olarak alınmıştır (Akgül ve Etlı, 2023; Etlı, 2022; Felekoğlu, 2009; Felekoğlu, 2014). Su miktarının sabit olmasına bağlı olarak vizkozite ve taze hal kriterlerinin tahsisi, akışkanlaştırıcı

katkı maddesinin farklı miktarda kullanımı ile sağlanmıştır. Karışımların hazırlanması laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş ve 3 dm<sup>3</sup> kapasiteli laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır. Tüm MB karışımları için oluşturulan 1 m<sup>3</sup> harç tasarımı Tablo 2’te verildiği gibidir. MB’lerin kodlamasında ilk bölüm NS miktarını temsil ederken ikinci bölüm PL miktarını temsil etmektedir. Örnekle; 0NS-0PL karışımı referans karışımıdır ve NS ya da PL içermez; 5NS-2.4PL karışımı ise 1 m<sup>3</sup> MB’da 5 kg NS ve 2.4 kg PL içermektedir.

**Tablo 2.** 1 m<sup>3</sup> MB İçin Karışım Tasarımı (kg/m<sup>3</sup>)

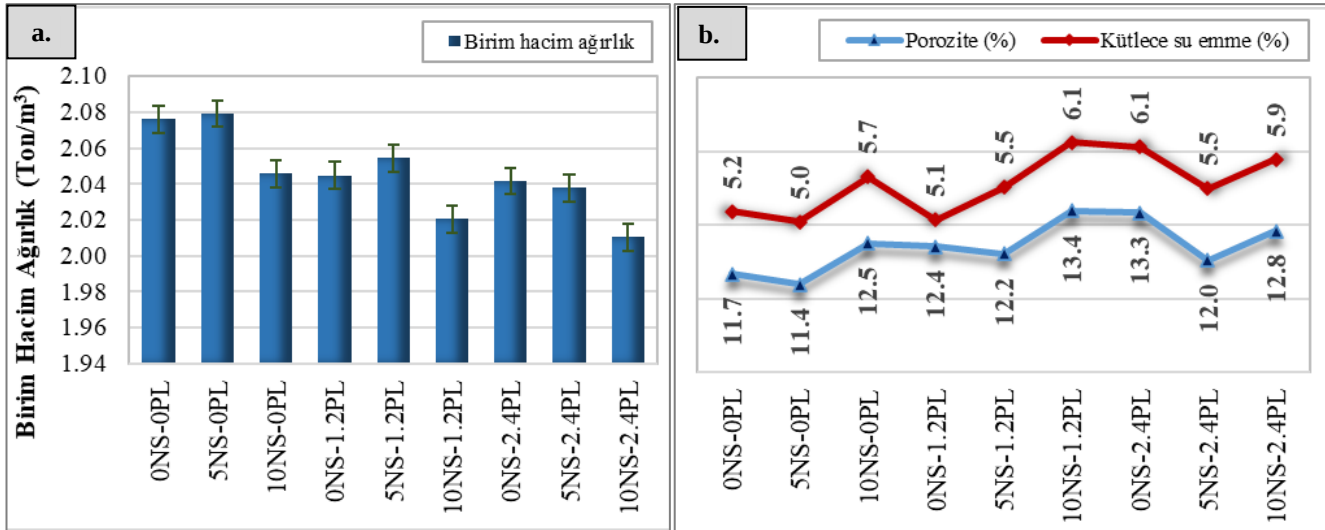
|            | PÇ  | SD  | NS | DKK       | Su    | PL  |
|------------|-----|-----|----|-----------|-------|-----|
| 0NS-0PL    | 625 | 125 | 0  |           | 322.5 | 0   |
| 5NS-0PL    | 620 | 125 | 5  |           | 322.5 | 0   |
| 10NS-0PL   | 615 | 125 | 10 |           | 322.5 | 0   |
| 0NS-1.2PL  | 625 | 125 | 0  | 1081-1084 | 322.5 | 1.2 |
| 5NS-1.2PL  | 620 | 125 | 5  |           | 322.5 | 1.2 |
| 10NS-1.2PL | 615 | 125 | 10 |           | 322.5 | 1.2 |
| 0NS-2.4PL  | 625 | 125 | 0  |           | 322.5 | 2.4 |
| 5NS-2.4PL  | 620 | 125 | 5  |           | 322.5 | 2.4 |
| 10NS-2.4PL | 615 | 125 | 10 |           | 322.5 | 2.4 |

MB’ler vibrasyon ve sıkıştırma yapılmaksızın prizma kalıplara (40x40x160 mm) yerleştirilmiştir. 24 saat kalıp alma süresini tamamlayan numuneler 7 ve 28 gün 20 ± 2 °C sıcaklıkta kirece doymuş su kürü ile olgunlaştırılmıştır. 9 seri MB için birim hacim ağırlık, porozite, kütlece su emme (ASTM C1585-13, 2013), eğilmede çekme (ASTM C348-21, 2021) ve eksenel basınç (ASTM C349-08, 2008) deneyleri yapılmıştır. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyi için sırasıyla 0.5 ve 2.4 kN/sn yükleme hızı kullanılmıştır. Ayrıca mikro yapının tespitine yönelik olarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dispersiv Spektrum (EDS) analizi yapılmıştır. SEM ve EDS analizleri için örnekler, 28 gün su kürü sonrası eğilmede çekme ve ardından eksenel basınç deneyinde kullanılan 0NS-0PL, 10NS-0PL, 0NS-1.2PL, 10NS-1.2PL, 0NS-2.4PL, 10NS-2.4PL serilerine ait uygun boyut ve forma getirilen numuneler ile Munzur Üniversitesi MUNTEAM bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaya dair tüm veriler grafikler ile sunulmuş, mevcut literatür çalışmaları ile değerlendirilerek yorumlanmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### *Birim Hacim Ağırlık, Porozite ve Kütlece Su Emme Sonuçları*

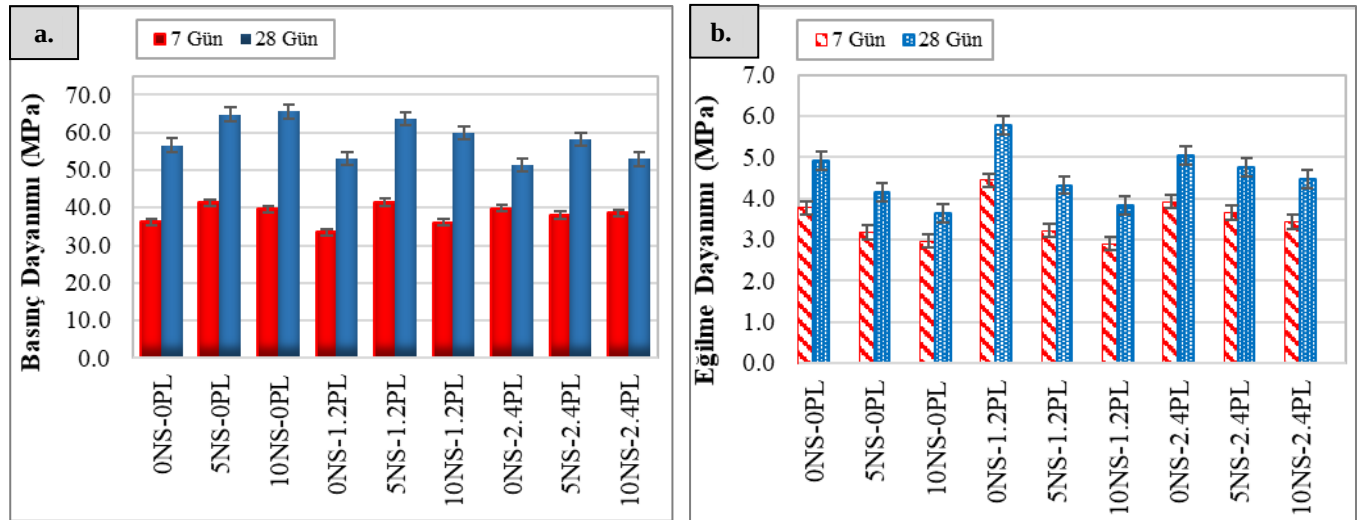
28 gün kirece doymuş standart su kürü uygulanan 9 seri sertleşmiş MB ile gerçekleştirilen birim hacim ağırlık, porozite ve kütlece su emme sonuçları Şekil 2’de verilmiştir. Tüm MB serileri için birim hacim ağırlık 2.08 ile 2.01 ton/m<sup>3</sup> aralığında değer almaktadır. Birim hacim ağırlık; 0NS-0PL serisinde 2.076 ton/m<sup>3</sup>; 0NS-1.2PL ve 0NS-2.4PL serisinde ise sırasıyla 2.045, 2.042 ton/m<sup>3</sup>’tür. Ayrıca artan NS miktarı birim hacim ağırlık üzerinde doğrusal bir etki sunmamaktadır. PL içermeyen serilerde en yüksek birim hacim ağırlık 5NS-0PL serisine aittir. 1.2 ve 2.4 PL içeren serilerde en yüksek birim hacim ağırlık sırasıyla 5NS-1.2PL ve 0NS-2.4PL serilerinde sağlamaktadır. Bu hali ile 1.2 PL muhtevasına kadar 5 kg/m<sup>3</sup> oranında NS içeren seriler daha yüksek birim hacim ağırlığa sahiptir ancak bu artış sadece 0.003-0.010 ton/m<sup>3</sup> bandındadır. Tüm MB’lere ait porozite ve kütlece su emme oranı Şekil 2.b’de verilmiştir. Grafiğe göre porozite ve kütlece su emme oranı sırasıyla %11.4-13.4 ve % 5.0-6.1 aralığında değer almaktadır. En fazla porozite oranı 10NS-1.2PL serisinde tespit edilmiştir. Ayrıca 5NS-0PL serisinin porozite ve kütlece su emme oranı referans serisinden daha düşüktür. PL kullanılmadan üretilen ilk üç seri ile 1.2 kg/m<sup>3</sup> PL kullanılarak üretilen ikinci üç serideki eşit NS miktarlarını içeren karışımlar kıyaslandığında, porozite ve kütlece su emme oranında artış tespit edilmiştir. Ancak 2.4 kg/m<sup>3</sup> PL içeren serilere geçişte benzer eğilim yoktur. PL miktarındaki artış porozite ve kütlece su emme oranını artırmaktadır. NS miktarının 5 ve 10 kg/m<sup>3</sup> olduğu 5NS-2.4PL ve 10NS-2.4PL serilerinde PL’nin porozite ve kütlece su emme oranındaki etkisi NS miktarına bağlıdır. Tüm serilerde PL miktarındaki artış ile birim hacim ağırlık çok az miktarda düşmektedir. Birim hacim ağırlıktaki bu kayıp benzer çalışma verileri ile paralellik sergilemektedir. Artan PL miktarı harçtaki homojen dağılımı üzerinde belirleyicidir. Bazı miktar ve uzunluklarda PL, topaklanmaya sebep olarak birim hacim ağırlığı etkilemektedir (Topçu vd., 2017). Şekil 2’de sunulan veriler ışığında birim hacim ağırlık, porozite ve kütlece su emme oranlarında PL miktarına bağlı olarak çok belirgin farklar olmadığı görülmektedir. Çünkü PL miktarı belirlenirken; PL’nin taze harçta sebep olması muhtemel olan topaklanma dikkate alınmış ve kullanım miktarı literatürdeki çalışmalar ve ön çalışmalar ile sınırlı aralıkta tutulmuştur.



Şekil 2. a. Birim Hacim Ağırlık (Ton/m<sup>3</sup>) Sonuçları b. Porozite (%) ve Kütlece Su Emme (%) Sonuçları

### Eksenel Basınç ve Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

7 ve 28 günlük prizma numuneler ile gerçekleştirilen eğilmede çekme ve eksenel basınç deneyi sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. 28 günün sonunda en fazla basınç dayanımı 65.56 MPa ile 10NS-0PL serisine, en düşük basınç dayanımı ise 51.30 MPa ile 0NS-2.4PL serisine aittir. Şekil 3.a'da verilen ilk üç seri (0NS-0PL, 5NS-0PL, 10NS-0PL) PL içermeyen karışımlara aittir ve bu serilerde artan NS miktarı ile basınç dayanımı artmaktadır. PL içermeyen serilerde NS miktarı arttıkça basınç dayanımı artan eğilim sergiler. Ancak 1.2 ve 2.4 kg/m<sup>3</sup> PL içeren serilerde sadece 5 kg/m<sup>3</sup> NS içeren seriye kadar basınç dayanımında artış söz konusudur. NS miktarındaki artışın basınç dayanımına olan katkısı PL miktarından etkilenmektedir. 2.4 kg/m<sup>3</sup> PL içeren serilerin 7 günlük basınç dayanımı, referans serisinin basınç dayanımından fazla olmasına rağmen, 28 günlük basınç dayanımı sonuçları aynı miktarda NS içeren serilere kıyasla daha düşüktür.



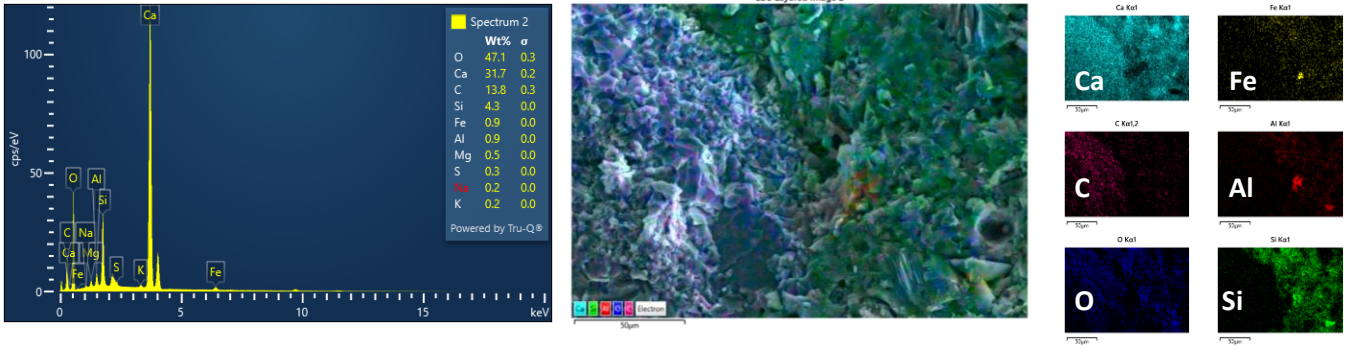
Şekil 3. a. Basınç Dayanımı (MPa) Sonuçları b. Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa) Sonuçları

7 ve 28 günlük MB'ler ile gerçekleştirilen eğilmede çekme dayanımı sonuçları (Şekil 3.b)'na göre 28 günün sonunda en yüksek ve en düşük eğilmede çekme dayanımı sırasıyla 0NS-1.2PL ve 10NS-0PL serilerine aittir. Aynı NS miktarına sahip MB serileri incelendiğinde; 0NS-2.4PL serisi hariç tüm serilerin eğilmede çekme dayanımında artış kaydedilmiştir. Aynı PL miktarına sahip MB serilerinde artan NS miktarının eğilmede çekme dayanımı azalttığı görülmektedir. PL miktarı taze harç elemanların dayanımı üzerinde etkilidir (Topçu vd., 2017). PL miktarı basınç dayanımını bir miktar düşürmekte, eğilme dayanımını ve elektriksel iletkenliği bir miktar arttırmaktadır (Uygunoğlu vd, 2017). NS kullanımı basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve yarma dayanımı gibi mekanik ve elastik özelliklerle birlikte durabilite özelliklerini de etkilemektedir (Başaran, 2022; H. Li et al., 2004; Türkmenoğlu

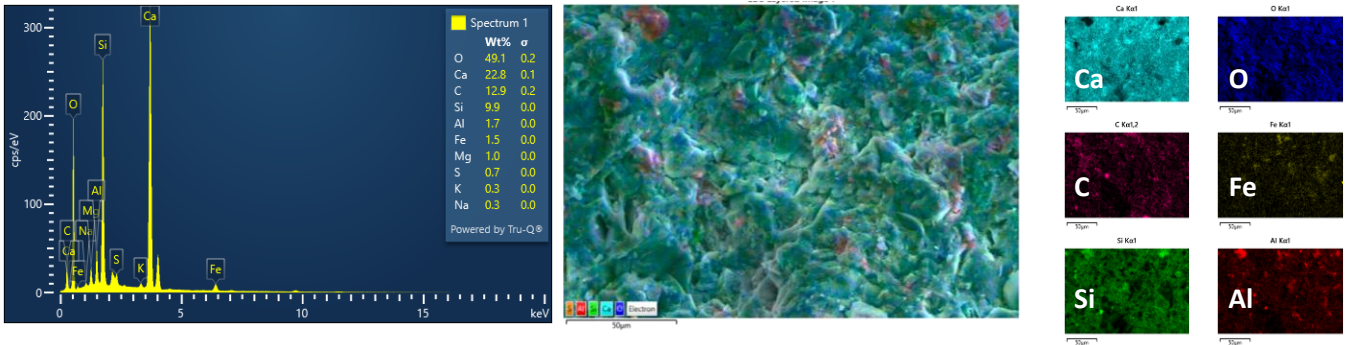
vd., 2022). Nano parçacıklı harçların 7. ve 28. günlük basınç ve eğilme dayanımları referans harcına göre daha yüksektir (H. Li et al., 2004). NS miktarındaki artış gevrekliği arttırmaktadır ve bu durum eğilme dayanımında bir miktar kayba neden olabilmektedir (Başaran, 2022). Şekil 3'te verilen eğilme ve basınç dayanımı verileri NS ve/veya PL kullanımına bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımı sonuçları içeren çalışmalar ile paralellik sergilemektedir (Başaran, 2022; H. Li et al., 2004; Kara, 2020; Türkmenoğlu vd., 2022).

### Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) Analizi Sonuçları

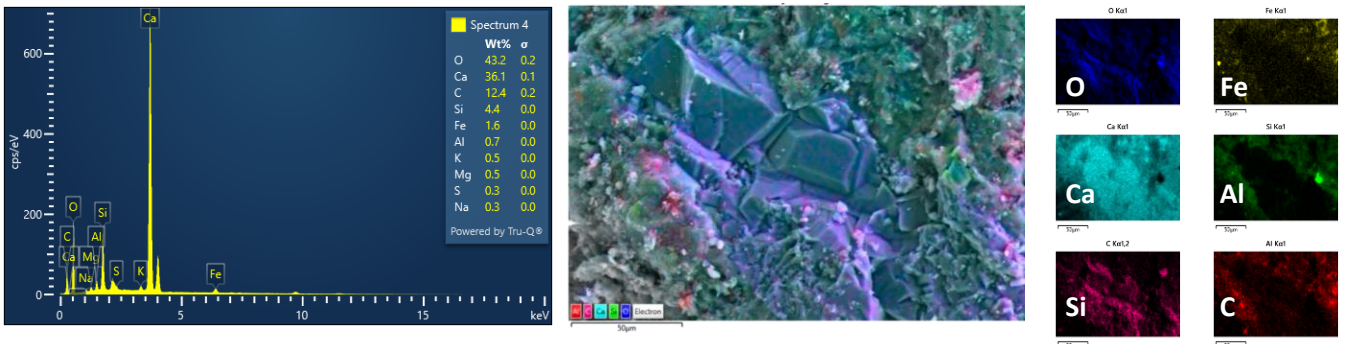
EDS, bir numunenin kimyasal bileşimini analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. Genellikle SEM analizi ile beraber kullanılan EDS analizi, uygun boyut ve şartları sağlanan numuneden yayılan karakteristik X-ışınlarının enerjisine bağlı olarak numunedeki mevcut elementleri belirler ve miktarlarını ağırlıkça oranlar. Çalışma kapsamında üretilen 9 farklı MB serisini temsil edecek şekilde 6 MB serisine (0NS-0PL, 10NS-0PL, 0NS-1.2PL, 10NS-1.2PL, 0NS-2.4PL, 10NS-2.4PL) ait EDS analizinde elde edilen tespitler element bazında Şekil 4-9'da verilmiştir. 6 seri MB için verilen Şekil 4-9'da ağırlıkça (%) oranı en fazla olan 6 element verilmiştir. Bu elementler O, C, Ca, Fe, Al ve Si'dir. İçeriğinde ağırlıkça baskın oranda Oksijen (O), Karbon (C), Kalsiyum (Ca) ve Silisyum (Si) içeren çimento esaslı numunelerden beklenen genel bileşenler kalsiyum silikatlar ve kalsiyum alüminatlardır. NS ikame edilen 10NS-0PL, 10NS-1.2PL, 10NS-2.4PL serilerinde (Şekil 5, 7, 9) NS ikame edilmeyen 0NS-0PL, 0NS-1.2PL, 0NS-2.4PL serilerine (Şekil 4, 6, 8) kıyasla Si oranı daha fazladır.



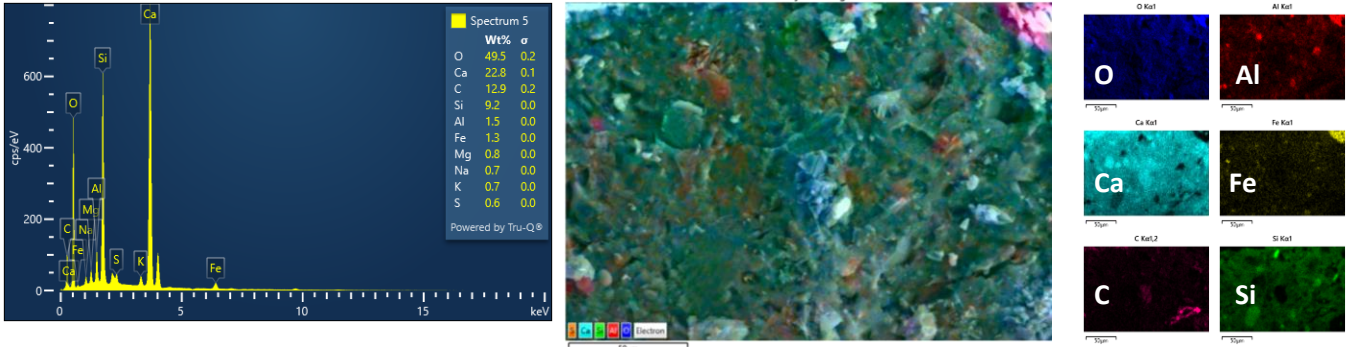
Şekil 4. 0NS-0PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



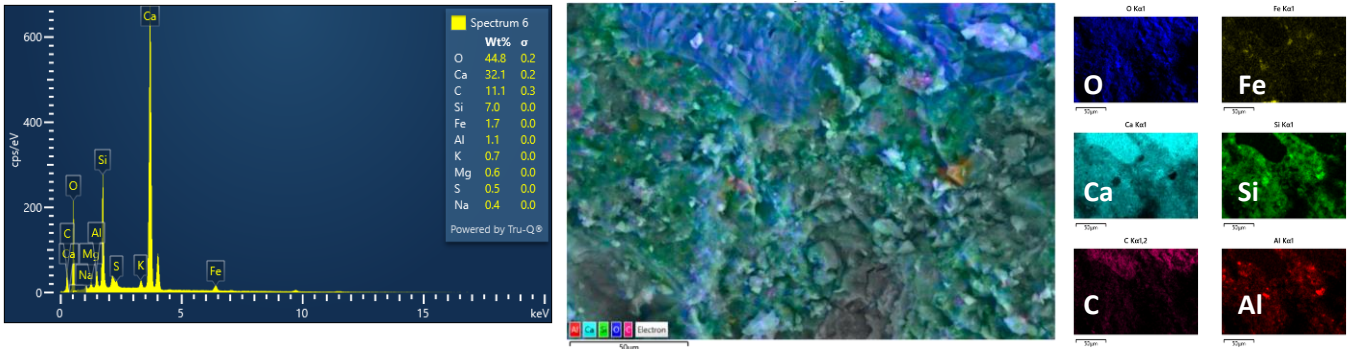
Şekil 5. 10NS-0PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



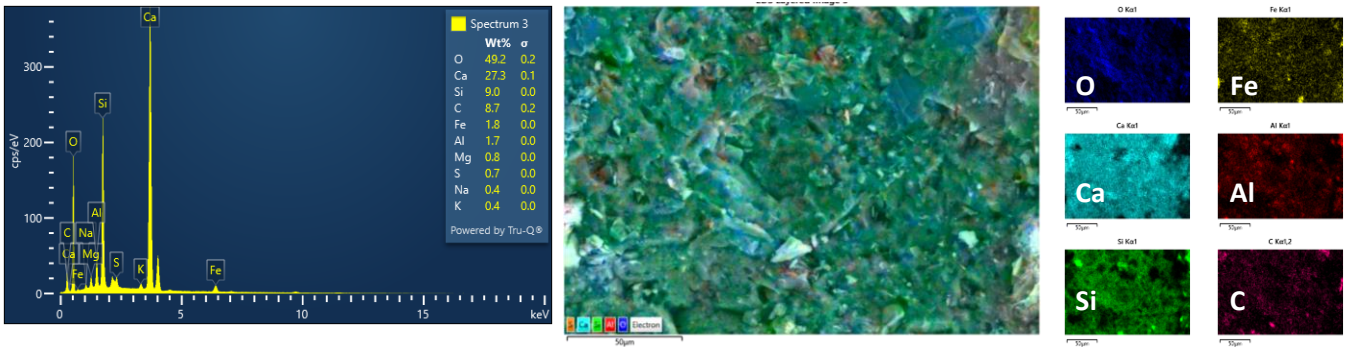
Şekil 6. 0NS-1.2PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



Şekil 7. 10NS-1.2PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



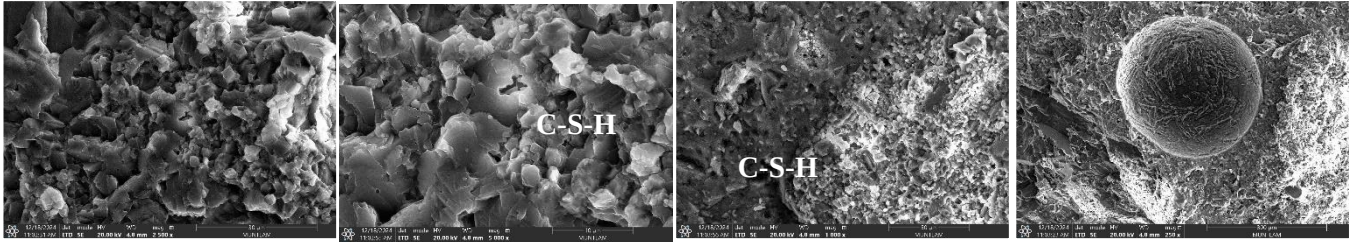
Şekil 8. 0NS-2.4PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



Şekil 9. 10NS-2.4PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları

### Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi (SEM) Sonuçları

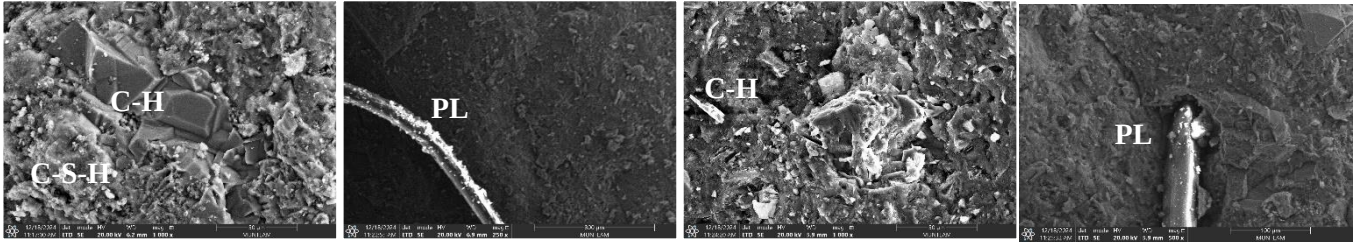
NS ve PL'nin karışımındaki farklı miktarını temsil edecek şekilde seçilen 6 MB (0NS-0PL, 10NS-0PL, 0NS-1.2PL, 10NS-1.2PL, 0NS-2.4PL, 10NS-2.4PL)'un SEM görüntüleri Şekil 10-15'te verilmiştir. Sem analizi aracılığı ile NS ve PL'nin etkisi incelenmiştir. Görüntülere göre; NS içeren serilerde (10NS-0PL, 10NS-1.2PL, 10NS-2.4PL) C-S-H jel oluşumunun NS içermeyen serilere (0NS-0PL, 0NS-1.2PL, 0NS-2.4PL) kıyasla daha fazladır. C-H kristalleri masif, yassı, hekzagonal prizma şekilli veya büyük zayıf uzun kristaller şeklinde çok farklı biçim ve boyutta görülmektedir. Çimento harcı ve beton içinde C-H kristalleri çimento ile agrega ara yüzeyinin bağlayıcılığını geliştirme eğilimindedir (Doğruyol ve Karaşin, 2016). Çimento ve betonda C-S-H jeli bağlayıcı son ürün olduğu için önemli bir bileşendir ve bunun sonucu olarak dayanıma en büyük katkısı sağlamaktadır.(Doğruyol ve Karaşin, 2016). C-S-H Portland çimentosundaki başlıca hidrasyon ürünü ve birincil bağlayıcı fazdır (Björnström et al., 2004). NS, genel olarak çimento ile su arasındaki hidrasyon reaksiyonu sırasında oluşan C-H ile reaksiyona girerek daha fazla C-S-H jeli oluşturur. NS içeren betonun mikro yapısı normal betondan daha düzgün ve kompakttır (Ji, 2005). Hem hamur fazı içerisinde hem de agrega ile harç arasındaki ara yüzey bölgesinde, NS kullanımı ile birlikte C-H miktarı belirgin bir şekilde azalmakta ve içyapı daha yoğun ve boşluksuz bir hal almaktadır (Jalal et al., 2012; Türkmenoğlu vd., 2022). Şekil 10-15'te verilen analiz sonuçları NS'nin gözenek doluluğu ve C-H üzerindeki etkisini göstermektedir ve benzer çalışma verileri ile benzerlik sunmaktadır (Balapour et al., 2018; H. Li et al., 2004; Zyganitidis et al., 2011).



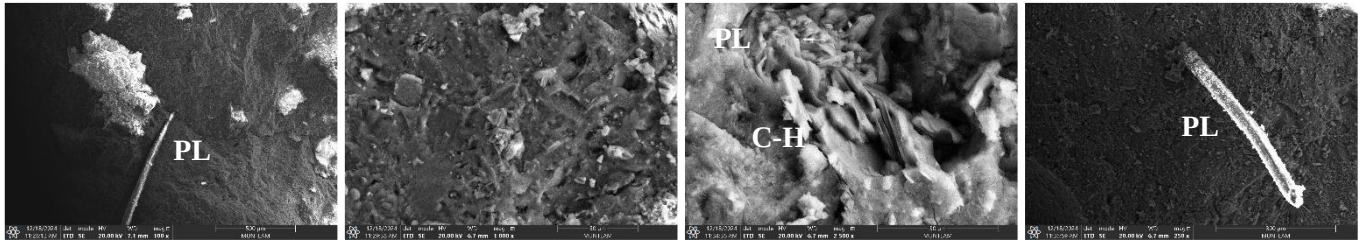
Şekil 10. 0NS-0PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



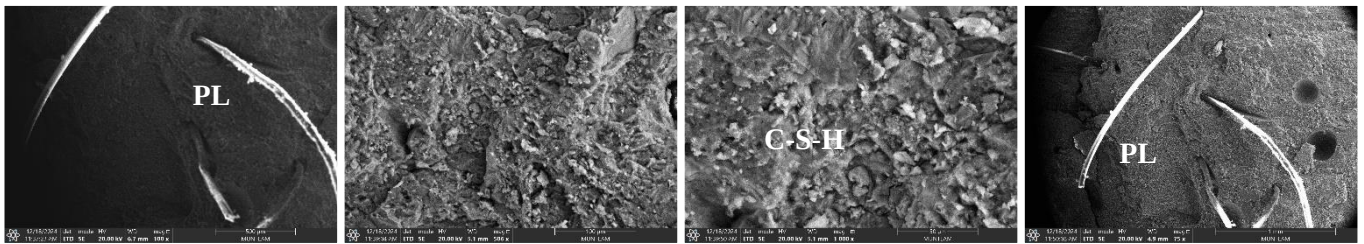
Şekil 11. 10NS-0PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



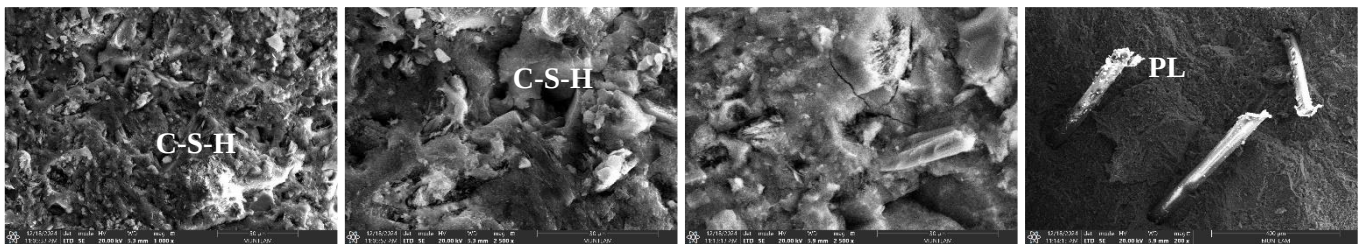
Şekil 12. 0NS-1.2PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



Şekil 14. 10NS-1.2PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



Şekil 14. 0NS-2.4PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



Şekil 15. 10NS-2.4PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında; üretilen 9 MB’de 3 farklı oranda NS ve 3 farklı oranda PL kullanılmıştır. Tüm MB serileri 7 ve 28 gün kirece doygun su kürü ile olgunlaştırılmıştır. Fiziksel, mekanik ve mikro yapı analizine bağlı olarak elde edilen sonuçlar genel hatları ile aşağıda verildiği gibidir;

- Üretilen MB serilerinin birim hacim ağırlığı 2.08 ile 2.01 ton/m<sup>3</sup> aralığında değer almaktadır. Artan NS miktarı birim hacim ağırlık üzerinde doğrusal bir etki sunmamaktadır. 1.2 PL muhtevasına kadar 5 kg/m<sup>3</sup> oranında NS içeren seriler daha yüksek birim hacim ağırlığa sahiptir ve bu artış sadece 0.003-0.010 ton/m<sup>3</sup> bandındadır. Tüm serilerde PL miktarındaki artış ile birim hacim ağırlık çok az miktarda düşmektedir.
- Tüm MB’lerin porozite ve kütlece su emme oranı sırasıyla %11.4-13.4 ve % 5.0-6.1 aralığında değer almaktadır. En fazla porozite oranı 10NS-1.2PL serisine aittir. PL miktarındaki artış porozite ve kütlece su emme oranını arttırmaktadır.
- En fazla basınç dayanımı 65.56 MPa ile 10NS-0PL serisine, en düşük basınç dayanımı ise 51.30 MPa ile 0NS-2.4PL serisine aittir. PL içermeyen serilerde NS miktarı arttıkça basınç dayanımı artan eğilim sergiler. Ancak 1.2 ve 2.4 kg/m<sup>3</sup> PL içeren serilerde sadece 5 kg/m<sup>3</sup> NS içeren seriye kadar basınç dayanımında artış söz konusudur. NS miktarındaki artışın basınç dayanımına olan katkısı PL miktarından etkilenmektedir.
- Aynı PL miktarına sahip MB serilerinde artan NS miktarının eğilmede çekme dayanımı azalttığı görülmektedir.
- SEM analizi görsellerine göre NS kullanılan serilerde C-S-H oluşumunu daha belirgindir. Tüm serilerin EDS analizinde ağırlıkça baskın oranda Oksijen (O), Karbon (C), Kalsiyum (Ca) ve Silisyum (Si) tespit edilmiştir. Ayrıca NS içeren serilerde Si oranı daha yüksektir.

Bu çalışmada tasarlanan karışımlarda çimentoya sadece NS ikame edilmiş ve 3 farklı oranda değişim uygulanmıştır. Bunun yanı sıra deneysel periyotlar 7 ve 28 gündür. Çalışma verileri ve mevcut literatür çalışmalarına göre; ilerleyen numune yaşı ve çimentoya ikili ve üçlü ikame durumlarının; fiziksel, mekanik ve mikro yapı üzerinde etkisi öngörülmektedir. Takip eden MB çalışmaları için; NS, MS, UK, YFC’nin ikili ve üçlü ikame yöntemi ile uygulandığı ve ileri numune yaşının farklı kür koşullarına bağlı olarak değerlendirildiği deneysel verilerin sürdürülebilirlik bağlamında faydalı olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Açıkgenç, M., Arazsu, U., ve Alyamaç, K. E. (2012). Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen Lifli Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4, 41–54.
- Akgül, M., ve Etli, S. (2023). Lif Takviyeli Mikro Betonların Erken Yaş Mekanik ve Durabilite Özellikleri. 8. *International Sciences & Innovation Congress*, 14-15 October, Ankara.
- Akgül, M. (2024). Wood Ash Effect on Cement Based Self-Compacting Mortars. *Civil Engineering Beyond Limits*, 5(2), 1–8. <https://doi.org/10.36937/cebel.2024.1945>
- Akgül, M., Doğan, O., & Odacıoğlu, O.G. (2022). A Review on Adherence in Reinforced Concrete. *Civil Engineering Beyond Limits*, 4, 1765. <https://doi.org/10.36937/cebel.2022.1765>
- Akgül, M., ve Hansu, O. (2024). Harç Atığı İkameli Mikro Betonlarda Sertleşmiş Hal ve Mikroyapı Değerlendirilmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 1089–1101. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1482487>
- ASTM C348-21. (2021). *Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0348-21>
- ASTM C349-08. (2008). *Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure)*. ASTM International, 1-4.
- ASTM C1585-13. (2013). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*, ASTM International 41. 1-6.
- Balapour, M., Joshaghani, A., & Althoey, F. (2018). Nano-SiO<sub>2</sub> contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 181, 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266>

- Başaran, M. (2022). *Nano silika ve mikro silika katkılı harçlarda durabilite ve mekanik özellikler*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Bayrak, İ. C., ve Telatar, O. M. (2021). İnşaat Sektörü ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye Ekonomisi Üzerine Ampirik Bir Analiz. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(3), 1283–1297.
- Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L., & Panas, I. (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*, 392(1–3), 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.05.071>
- Dheyaaldin, M. H., Mosaberpanah, M. A., & Alzebaree, R. (2022). Shrinkage behavior and mechanical properties of alkali activated mortar incorporating nanomaterials and polypropylene fiber. *Ceramics International*, 48(16), 23159–23171. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.297>
- Doğruyol, M., ve Karaşin, A. H. (2016). Diyarbakır bazaltı kullanılan betonun sem ile araştırılması. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*.
- Etili, S. (2022). Evaluation Of Curing Time For Micro Concrete Mixes Containing Silica Fume, Nano-Silica And Fly Ash. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(42), 304–316. <https://doi.org/10.55071/ticaret.fbd.1093891>
- Felekoğlu, B. (2009). *Yüksek performanslı mikro beton tasarımı*. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Felekoğlu, B. (2014). Rheological behaviour of self-compacting micro-concrete. *Sadhana*, 39(6), 1471–1495. <https://doi.org/10.1007/s12046-014-0281-2>
- Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., & Pouladkhan, A. R. (2012). Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO<sub>2</sub> micro and nanoparticles. *Materials & Design*, 34, 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.037>
- Jeon, K., Jeon, C., & Choi, W. (2023). Effect of mixing ratio on fire resistance of cement mortar with polypropylene fiber and polymer. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02503. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02503>
- Ji, T. (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO<sub>2</sub>. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1943–1947. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004>
- Kara, C. (2020). Nano SiO<sub>2</sub> Katkılı Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi. *European Journal of Science and Technology*, 247–253. <https://doi.org/10.31590/ejosat.722814>
- Khaliq, W., & Kodur, V. (2011). Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 41(11), 1112–1122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.012>
- Kim, M.S., Sim, S.R., & Ryu, D.W. (2020). A Study on the Spalling Properties of Polymer Modified Cement Mortar Using Polypropylene Fiber. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 20(4), 305–311. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.4.305>
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185–189. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(03\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0)
- Li, L. G., Zheng, J. Y., Zhu, J., & Kwan, A. K. H. (2018). Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. *Construction and Building Materials*, 168, 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.181>
- Liu, M., Zhou, Z., Zhang, X., Yang, X., & Cheng, X. (2016). The synergistic effect of nano-silica with blast furnace slag in cement based materials. *Construction and Building Materials*, 126, 624–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.078>
- Naji Givi, A., Abdul Rashid, S., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Experimental investigation of the size effects of SiO<sub>2</sub> nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*, 41(8), 673–677. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.08.003>
- P. P., A., Nayak, D. K., Sangoju, B., Kumar, R., & Kumar, V. (2021). Effect of nano-silica in concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 278, 122347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122347>

- Sevim, O., Jiang, Z., & Ozbulut, O. E. (2022). Effects of graphene nanoplatelets type on self-sensing properties of cement mortar composites. *Construction and Building Materials*, 359, 129488. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129488>
- Sevim, O., Kalkan, İ., Demir, İ., & Akgüngör, A. P. (2021). Effects of the sole or combined use of chemical admixtures on properties of self-compacting concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(4), 150. <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00302-7>
- Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M., & Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials*, 47, 1069–1077. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052>
- Topçu, İ. B., & Ateşin, Ö. (2016). Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties. *Construction and Building Materials*, 120, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.112>
- Topçu, İ. B., Demirel, O. E., ve Uygunoğlu, T. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların uluslararası ve Mekanik Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 91–96.
- TS EN 197-1. (2011). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 933-1. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 934-2+A1. (2014). *Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 1008. (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- Türkmenoğlu, H. N., Önder, E., ve Atahan, H. N. (2022). Farklı Su/Bağlayıcı Oranına Sahip Betonlarda Nano Silika ve Granüle Yüksek Fırın Cürufu Kullanımının Mekanik ve Elastik Özellikler Üzerine Etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.24012/dumf.1147581>
- Uygunoğlu, T., Topçu, İ. B., Meşe, M., ve Çınar, E. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların Elektriksel ve Mekanik Özellikleri. *V. Uluslararası Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Çalıştayları*, 439-446.
- Wei, W., Xukun, M., Chulei, F., Na, L., Wei, T., Fuyong, C., Ping, J., & Guoxiong, M. (2024). Mechanical characteristics and microscopic mechanism of polypropylene fiber modified recycled road solid waste fine aggregate mortar. *Journal of Building Engineering*, 97, 110798. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110798>
- Xin, C. L., Wang, Z. Z., Zhou, J. M., & Gao, B. (2019). Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.019>
- Zyganitidis, I., Stefanidou, M., Kalfagiannis, N., & Logothetidis, S. (2011). Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Materials Science and Engineering: B*, 176(19), 1580–1584. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.05.005>