



**HARÇ PERFORMANSININ OPTİMUM NANO
GRAFEN PLAKA KULLANIM ORANINA ETKİSİ**

Yaren ŞAHİN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

**Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE
Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER**

2025

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

HARÇ PERFORMANSININ OPTİMUM NANO GRAFEN PLAKA KULLANIM
ORANINA ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yaren ŞAHİN

Danışman: Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER

BAYBURT - 2025

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE ve Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER danışmanlığında, Yaren ŞAHİN tarafından hazırlanan “Harç Performansının Optimum Nano Grafen Plaka Kullanım Oranına Etkisi” başlıklı bu çalışma, 22.05.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ŞAHMARAN

Üye : Prof. Dr. Ahmet Ferhat BİNGÖL

Üye : Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bilal TAYFUR

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Bünyamin ALIM
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE ve Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER danışmanlığında hazırlamış olduğum “Harç Performansının Optimum Nano Grafen Plaka Kullanım Oranına Etkisi” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

22.05.2025
Yaren ŞAHİN



ÖN SÖZ

Çalışma kapsamında nano grafen plakaların farklı su/bağlayıcı sınıflarındaki çimentolu harçlar içerisinde kullanımının değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip 5 farklı harç karışımı tasarlanarak 5 farklı nano grafen oranının harçlara ikamesi yapılmıştır. Çalışmanın yürütülmesi ve tamamlanmasında her türlü desteği sağlayan saygı değer danışman hocalarım Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE' ye ve Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER' e içtenlik ile teşekkür ederim. Ayrıca, bu projeyi destekleyen Karadeniz Teknik Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: FBB-2024-11167

Yaren ŞAHİN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HARÇ PERFORMANSININ OPTİMUM NANO GRAFEN PLAKA KULLANIM ORANINA ETKİSİ

Yaren ŞAHİN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Nurullah ÖKSÜZER

Bayburt-2025, Sayfa: 50

Bu çalışma, nano grafen plaka (nGP) katkısının harç performansına etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip beş farklı harç karışımı tasarlanmış ve bunlara çeşitli oranlarda nano grafen plaka eklenerek fiziksel, mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Kullanılan malzemeler arasında çimento, silis dumanı, kuvars kumu ve süper akışkanlaştırıcı yer almakta olup, karışımlara belirli oranlarda nGP eklenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, taze harç özelliklerini belirlemek amacıyla yayılma tablası deneyi uygulanmış, sertleşmiş harçlar için ise basınç dayanımı, yoğunluk, su emme ve kılcal su emme testleri yapılmıştır. Ayrıca, harçların mikroyapısal gelişimlerini incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, düşük oranlarda nGP katkısı (%0,3 - %0,6) harçların basınç dayanımı ve dayanıklılığını artırırken, %1,2 ve üzerindeki oranlarda mekanik performansın genel olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Özellikle %0,6 nGP içeren karışımların optimum dayanım sağladığı belirlenmiştir. Silis dumanı ve kuvars kumu katkısı içeren serilerde ise nGP katkısının dayanım ve dayanıklılık açısından daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, nano grafen plakanın çimento esaslı malzemelerde optimum oranlarda kullanımının harç performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışma, inşaat mühendisliği alanında yeni nesil nano malzeme katkılarının kullanımı konusunda önemli bulgular sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nano grafen plaka, harç, basınç dayanımı, su emme, mikroyapı.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

EFFECT OF MORTAR PERFORMANCE ON OPTIMUM NANO GRAPHENE PLATE USAGE RATE

Yaren ŞAHİN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hacı Süleyman GÖKÇE

Second Thesis Advisor: Asst. Prof. Dr. Nurullah ÖKSÜZER

Bayburt-2025, Pages: 50

This study aims to determine the effect of nano graphene plate (nGP) additives on mortar performance. Five different mortar mixtures with varying water/binder ratios were designed, and different amounts of nGP were added to investigate their physical, mechanical, and microstructural properties. The materials used in the study included cement, silica fume, quartz sand, and superplasticizer, with specific proportions of nGP incorporated into the mixtures for experimental tests. Experimental studies involved a flow table test to assess fresh mortar properties, while compressive strength, density, water absorption, and capillary water absorption tests were conducted on hardened mortar specimens. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) analysis was performed to evaluate the microstructural developments of the mortars. The results showed that low concentrations of nGP (0.3% - 0.6%) improved the compressive strength and durability of the mortar, whereas concentrations of 1.2% and above resulted in a decrease in mechanical performance. Specifically, mixtures containing 0.6% nGP exhibited optimal strength. In mixtures containing silica fume and quartz sand, the addition of nGP was found to be more effective in enhancing strength and durability. In conclusion, the optimal usage of nano graphene plate in cementitious materials significantly influences mortar performance. This study provides valuable insights into the application of advanced nano-material additives in the field of civil engineering.

Keywords: Nano graphene plate, mortar, compressive strength, water absorption, microstructure.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME.....	III
ÖN SÖZ.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XI
SİMGELER.....	XI
GİRİŞ.....	1
BİRİNCİ BÖLÜM.....	2
1. LİTERATÜR ÖZETİ.....	2
İKİNCİ BÖLÜM.....	10
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	10
2.1. MALZEME.....	10
2.1.1. Çimento.....	10
2.1.2. Silis Dumanı.....	10
2.1.3. Karma Suyu.....	10
2.1.4. Agregası.....	11
2.1.5. Nano Grafen Plaka.....	11
2.1.6. Süper Akışkanlaştırıcı.....	12
2.2. YÖNTEM.....	12
2.2.1. Karışım Oranları.....	12
2.2.2. Karışımın Hazırlanması.....	14
2.3. TAZE BETON DENEYLERİ.....	15
2.3.1. Yayılma Tablası.....	15
2.4.1. Yoğunluk-Su Emme.....	16
2.4.2. Basınç Dayanımı.....	17
2.4.3. Kılcal Su Emme.....	18
2.4.4. Cıvalı Porozimetre.....	18
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	20
3. BULGULAR.....	20
3.1. İŞLENEBİLİRLİK VE KIVAM.....	20
3.2. BASINÇ DAYANIMI.....	22
3.3. YOĞUNLUK VE SU EMME.....	29
3.4. KILCAL SU EMME.....	31
3.5. MİKROYAPISAL ANALİZ.....	34
3.6. BOŞLUK YAPISI.....	40
SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	43
Sonuç.....	43
Tartışma.....	43
Öneriler.....	44

KAYNAKÇA.....	45
ÖZ GEÇMİŞ	50



TABLÖLAR

Tablo 1: Literatürden Elde Edilen Nano Malzeme Katkılı Karışımlarda Gözlemlenen Etkiler	9
Tablo 2: Kullanılan Toz Malzemelerin Kimyasal ve Fiziksel Analizleri	11
Tablo 3: Nano Grafen Malzeme Teknik Özellikleri	12
Tablo 4: Hazırlanan Karışım Oranları	13
Tablo 5: Yayılma Tablası Deney Sonuçları.....	21
Tablo 6: Referansa Göre Basınç Dayanımlarının Yüzdece Değişimi.....	28
Tablo 7: Numunelerin Su Emme Deneyi Sonuçları.....	29
Tablo 8: Numunelerin Lineer Regresyon ile Elde Edilen Kılcallık Katsayıları	32



ŞEKİLLER

Şekil 1: Çimento Hamurunun Mikro Yapısına Silis Dumanının Etkisi	4
Şekil 2: Saf çimento hamuru (a), Nano Silika İçeren Çimento Hamuru (b) Sentetik C-S-H İçeren Çimento Hamuru (c) Hidratasyon Gelişimi	6
Şekil 3: Jübile Kilisesi, İtalya	7
Şekil 4: Karbon Elementinin Allotropları	8
Şekil 5: Aşkale Çimento Fabrikasından Temin Edilen Çimento.....	10
Şekil 6: Karışımda Kullanılan; İnce Agregası (a), Kuvars Kumu (b).....	11
Şekil 7: Karışımlarda Kullanılan Süper Akışkanlaştırıcı.....	12
Şekil 8: Karıştırma İşlemleri İçin Kullanılan Mikser (a), Karışıma nGP Eklenmesi (b)	14
Şekil 9: Manyetik Karıştırıcı	15
Şekil 10: Karışımlarda Kullanılan Küp Numune Boyutları	15
Şekil 11: Hazırlanan Harç Karışımının Yayılma Tablası Üzerinde Kalıba Yerleştirilmesi	16
Şekil 12: Kür Aşamasındaki Numune örnekleri (a), Kür Havuzundan Çıkarıldıktan Sonra Yapılan Ölçüm (b).....	17
Şekil 13: Numunelerin Beton Pres Makinesinde Dayanımının Belirlenmesi	17
Şekil 14: Kılcal Su Emme Deney Düzenegi.....	18
Şekil 15: Tüm Karışım Serileri İçin Yayılma Çapı Değerleri.....	20
Şekil 16: 0,55 s/b (M_W0.55) İçeriğine Sahip Karışım Serisinin Basınç	23
Şekil 17: 0,40 s/b (M_W0.40) Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları	24
Şekil 18: 0,30 s/b (M_W0.30) Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları	25
Şekil 19: MS_W0.40 Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları.....	26
Şekil 20: MS_W0.30 Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları.....	27
Şekil 21: Numunelerin Ortalama Basınç Dayanımları	28
Şekil 22: Su Emme Sonuçlarının Bütün Karışımlar İçin Kıyaslanması	31
Şekil 23: Su Emme ve Kılcallık Katsayısı Arasındaki İlişki.....	34
Şekil 24: SEM Görüntüleri a)M_0.55W_N0 b)M_0.55W_N0.3 c)M_0.55W_N0.6 d)M_0.55W_N1.2 e)M_0.55W_N2.4	35
Şekil 25: SEM Görüntüleri a)M_0.40W_N0 b)M_0.40W_N0.3 c)M_0.40W_N0.6 d)M_0.40W_N1.2 e)M_0.40W_N2.4	36
Şekil 26: SEM Görüntüleri a)M_0.30W_N0 b)M_0.30W_N0.3 c)M_0.30W_N0.6 d)M_0.30W_N1.2 e)M_0.30W_N2.4	37
Şekil 27: SEM Görüntüleri a)MS_0.40W_N0 b)MS_0.40W_N0.3 c)MS_0.40W_N0.6 d)MS_0.40W_N1.2 e)MS_0.40W_N2.4.....	38
Şekil 28: SEM Görüntüleri a)MS_0.30W_N0 b)MS_0.30W_N0.3 c)MS_0.30W_N0.6 d)MS_0.30W_N1.2 e)MS_0.30W_N2.4.....	39
Şekil 29: Tüm Karışımlar İçin Cıva Porozimetre Test Sonuçları.....	40

KISALTMALAR

nGP	: Nano Grafen Plaka
W	: Su/Bağlayıcı
N	: Nano Malzeme Yüzdesi
M	: Harç
MS	: Silisli Harç
ASTM-C	: Amerikan Malzeme ve Testler Derneği (Uluslararası Standart)
GO	: Grafen Oksit
G	: Görünen Porozite
S	: Kütlece Su Emme

SİMGELER

g	: Gram
MPa	: Megapaskal
nm	: Nanometre
g/ dm³	: Gram Bölü Desimetreküp
°C	: Santigrat
w₀	: Etüv Kuru Ağırlık
w₁	: Suyu Doygun Ağırlık
w₂	: Su İçindeki Ağırlık
SiO₂	: Silisyum Dioksit
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
Fe₂O₃	: Demir Oksit
CaO	: Sönmemiş Kireç

GİRİŞ

Günümüzün yapı malzemesi olarak nitelendirilen beton, dünyada sudan sonra en çok tüketilen ikinci malzemedir. İnsanoğlunun varoluşundan itibaren günümüze kadar süregelen, yapılarda önemli bir yere sahiptir. Beton gerektirmeyen inşa neredeyse yoktur. Çimento Romalılar tarafından ilk kez bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Ardından 1850-1860'lı yıllarda bu yapı malzemesi daha geniş alana yayılmıştır. Betonun ideal karışım ve granülometri eğrileri oluşturularak Türkiye’de de beton kullanılmaya başlanmıştır. 2000’li yıllara gelindiğinde ise endüstriyel anlamda betonun gelişimi başta Avrupa ve Amerika olmak üzere pek çok bölgede yaygınlaşmıştır (Paşa, 2018). Beton teknolojisinin son yirmi yıldaki gelişimi, teknik parametrelerde ve bununla bağlantılı çevresel etkilerde önemli bir kalite değişimine yol açmıştır (Anwar, 2010). Sürdürülebilir alternatiflerinin araştırılması, inşaat endüstrisinin gelecekteki çevresel etkilerini hafifleten yapı malzemesi olarak önemini korumaktadır.

Harçlar betonun temel bileşenlerinden biridir ve genellikle çimento, dolgu malzemeleri (kırmataş, kum) ve su içerir. Harç karışımları, farklı miktarda ve oranlarda çimento, su ve agrega içerebilir, bu da betonun özelliklerini belirler. Harç, betonun iç yapısını oluşturan bağlayıcı malzemedir. Harçtaki çimento, su ile reaksiyona girerek hidrasyon sürecini başlatır ve sertleşmeye yol açar. Betonun farklı özelliklerini etkileyen harçlar; mukavemet, dayanıklılık, işlenebilirlik ve sertleşme süreçlerine katkıda bulunur (Li vd., 2017). Harçların doğru hazırlanması ve uygulanması, yapıların uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlamak için son derece önemlidir (Ghaffary & Moustafa, 2020).

Betonun vazgeçilmez üç temel özelliği vardır; sertleşmiş halde yeterli dayanım, taze betonun işlenebilmesi ve dış ortam etkilerine karşı dayanıklılığıdır (Dedeoğlu, 2010). Durabilite veya kalıcılık olarak da bilinen dayanıklılık; “hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan veya betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında, betonun hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyeti” olarak tanımlanmaktadır. Beton hizmet süresi boyunca, bünyesinde yıpranmaya yol açabilecek birçok kimyasal ve fiziksel etmenlerle karşılaşmaktadır. Bu etmenler, doğa koşullarından veya betonun kullanıldığı ortamdan ve/veya betondaki alkalilerle reaktif agregalar arasındaki reaksiyonlardan dolayı meydana gelmektedir. Betonda hasar oluşurken içinde bulunan su, boşluklar ve çatlaklar içerisindeki taşınım önemli yer tutar. Bu yolla birlikte su, zararlı maddeler beton içerisinde etkileşim sağlar. Bu olay sonucunda priz alan beton genişleyerek kimyasal etkileşimlere sebep olur. Isınma– kuruma, donma- çözülme ve aşınma gibi olaylar betonun yıpranmasına yol açacak özellikteki fiziksel olaylardır (Nergiz, 2007). Bu olaylar; yapıda hasar, dayanım kaybı ve yapının hizmet edememesi ile sonuçlanır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. LİTERATÜR ÖZETİ

Günümüzün yapı malzemesi olarak nitelendirilen beton, dünyada sudan sonra en çok tüketilen ikinci malzemedir. İnsanoğlunun varoluşundan itibaren günümüze kadar süregelen, yapılarda önemli bir yere sahiptir. Beton gerektirmeyen inşa neredeyse yoktur. Çimento Romalılar tarafından ilk kez bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Ardından 1850-1860'lı yıllarda bu yapı malzemesi daha geniş alana yayılmıştır. Betonun ideal karışım ve granülometri eğrileri oluşturularak Türkiye’de de beton kullanılmaya başlanmıştır. 2000'li yıllara gelindiğinde ise endüstriyel anlamda betonun gelişimi başta Avrupa ve Amerika olmak üzere pek çok bölgede yaygınlaşmıştır (Paşa, 2018). Beton teknolojisinin son yirmi yıldaki gelişimi, teknik parametrelerde ve bununla bağlantılı çevresel etkilerde önemli bir kalite değişimine yol açmıştır (Anwar, 2010). Betonun çevre dostu ve sürdürülebilir alternatiflerinin araştırılması, inşaat endüstrisinin gelecekteki çevresel etkilerini hafifletme çabalarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, beton teknolojisi sürekli gelişerek inşaat projelerinde önemli bir yapı malzemesi olarak önemini korumaktadır.

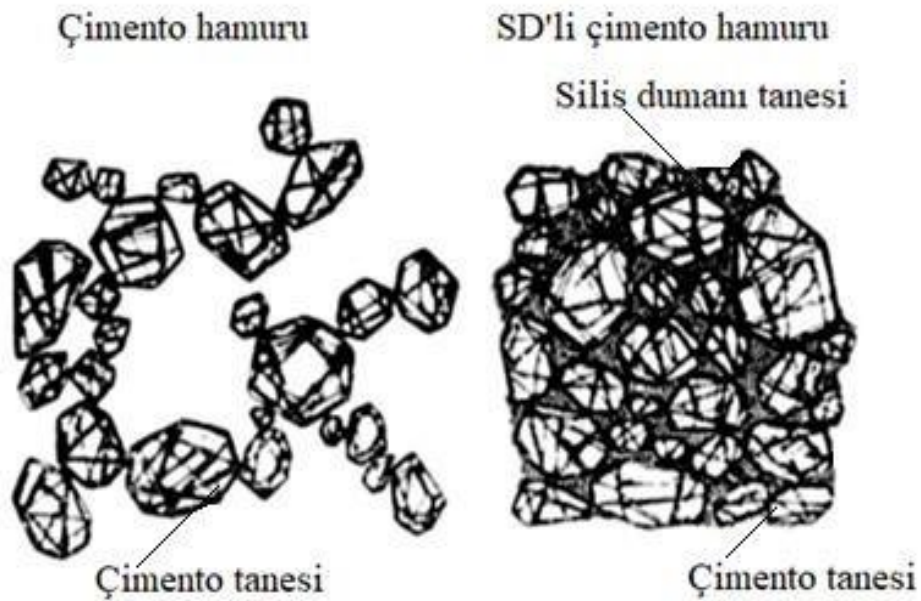
Harçlar betonun temel bileşenlerinden biridir ve genellikle çimento, dolgu malzemeleri (kırmı taş, kum) ve su içerir. Harç karışımları, farklı miktarda ve oranlarda çimento, su ve agrega içerebilir, bu da betonun özelliklerini belirler. Harç, betonun iç yapısını oluşturan bağlayıcı malzemedir. Harçtaki çimento, su ile reaksiyona girerek hidrasyon sürecini başlatır ve sertleşmeye yol açar. Betonun farklı özelliklerini etkileyen harçlar; mukavemet, dayanıklılık, işlenebilirlik ve sertleşme süreçlerine katkıda bulunur (Li vd., 2017). Harçların doğru hazırlanması ve uygulanması, yapıların uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlamak için son derece önemlidir (Ghaffary & Moustafa, 2020).

Betonun vazgeçilmez üç temel özelliği vardır; sertleşmiş halde yeterli dayanım, taze betonun işlenebilmesi ve dış ortam etkilerine karşı dayanıklılığıdır (Dedeoğlu, 2010). Durabilite veya kalıcılık olarak da bilinen dayanıklılık; “hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan veya betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında, betonun hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyeti” olarak tanımlanmaktadır. Beton hizmet süresi boyunca, bünyesinde yıpranmaya yol açabilecek birçok kimyasal ve fiziksel etmenlerle karşılaşmaktadır. Bu etmenler, doğa koşullarından veya betonun kullanıldığı ortamdan ve/veya betondaki alkalilerle reaktif agregalar arasındaki reaksiyonlardan dolayı meydana gelmektedir. Betonda hasar oluşurken içinde bulunan su, boşluklar ve çatlaklar içerisindeki taşınım önemli yer tutar. Bu yolla birlikte su, zararlı maddeler beton içerisinde

etkileşim sağlar. Bu olay sonucunda priz alan beton genişerek kimyasal etkileşimlere sebep olur. Islanma– kuruma, donma- çözülme ve aşınma gibi olaylar betonun yıpranmasına yol açacak özellikteki fiziksel olaylardır (Nergiz, 2007). Bu olaylar; yapıda hasar, dayanım kaybı ve yapının hizmet edememesi ile sonuçlanır.

Çimento, agrega, su kullanımı beton üretimi için yeterlidir ancak günümüzde katkı maddeleri de temel malzemeler arasında yer almaktadır. Sürekli yenilenmekte olan katkı sektörü, ihtiyaçlara cevap verebilecek nitelikte katkıları geliştirmektedir. Bir katkının etkinliği kullanım amacına göre değişir. Katkı kullanımı için beton özellikleri ve ortam koşulları tam olarak belirlenmelidir. Katkılar beton karışımına önceden veya sonradan eklenebilmektedir (Baradan vd., 2012). Beton içerisinde kullanım miktarı, katkıların ayırıcı özelliğidir. Kimyasal katkılar mineral katkılara kıyas ile çok daha düşük miktarda (çimento ağırlığının %0.1-5'i arasında) beton bünyesinde yer alır. Mineral katkılar ise katkı tipine bağlı olarak çok daha yüksek oranlarda (%5-60) kullanılabilir (TS EN 934-2). Kimyasal katkılar çok geniş kimyasal kompozisyon çeşitliliği gösterir ve bu bileşenlerde yapılan değişiklikler katkının özelliğini değiştirebilir (Mehta & Monteiro, 2006). Beton üretiminde en çok kullanılan katkılardan; akışkanlaştırıcı katkılar, 1970'li yıllardan itibaren betonun bünyesinde yer almaya başlamıştır. Özellikle yüksek performanslı beton üretiminde kullanılan bu katkılar, su/çimento oranını düşük tutarken, işlenebilirlik ve dayanıklılık özellikleri üzerinde olumlu etki oluşturmuştur (Kaya, 2010). Çimento oranının azalmasıyla hidrasyon ısısında düşüş gözlenirken, kapiler boşluk ve geçirimsizlik de azalmaktadır (Topçu vd., 2006). Kimyasal katkıların yanı sıra, mineral katkılar da beton karışımına eklenebilir. Mineral katkılar yaygın olarak puzolanik özellikli endüstriyel yan ürünlerdir. Endüstriyel atıklar çimento, harç ve betona ikame veya katkı yoluyla eklenmesi ekonomik açıdan hem çimento ve beton sektörüne hem de bu atıkların ortaya çıktığı sektörlerle fayda sağlar. Mineral katkı türlerinden puzolanlar; antik çağlardan beri kullanılmaktadırlar, kendi başlarına bağlayıcı nitelikte olmayan, ancak ince öğütülmüş halde sönmüş kireçle reaksiyona girerek bağlayıcı bileşenleri oluşturur (Erdoğan, 2003). Yüksek performanslı beton üretiminde tercih edilen puzolanlar beton matrisindeki boşluklu yapıyı doldurabilmektedir (Anwar, 2010). Puzolanların özgül ağırlığı çimentodan daha düşüktür; bu yüzden puzolan katkılı beton karışımında çimento miktarı azaltılmasıyla daha büyük bağlayıcı hamur hacmine ulaşıldığı görülür. Bağlayıcı hamurun hacim artışı, ince taneli katkı kullanımıyla ve ince agreganın durabilitésinin yüksek olmasıyla birlikte işlenebilirlik de artar. Böylece yapılan çalışmalarda da görülür ki puzolan katkılı çimentolarda erken yaş dayanımı katkısız betona göre genellikle daha düşük olur, fakat ileriki yaş dayanımının gelişmesiyle nihai beton dayanımı yüksek olabilmektedir (Gündoğdu, 2010).

Hazırlanan bu tez çalışmasında, katkı olarak kullanılan silis dumanı, mikro silika olarak da bilinmektedir. Silis dumanı, silikon metaller veya ferro silikon alaşımları oluşturmak için kaliteli kuvarsın yüksek sıcaklıktaki bir fırında kok ve ağaç talaşlarıyla ısıtılması sırasında elde edilen yan üründür. Yapısal olarak düzenli şekle sahip olmayan, ultra ince taneli ve yüksek miktarda camsı silis içeriklerinden dolayı puzolanik malzeme türlerindendir. Diğer puzolanlara kıyasla erken dayanımı da artırması silis dumanının avantajlarından (Erdoğan, 2003). Silis dumanına yönelik yapılan ilk çalışmalar, çevreyi koruyabilmek amacıyla yapılmıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte günümüzde silis dumanı özellikle yüksek performanslı betonlar için önemli bir malzeme haline gelmiştir. Silis dumanı genellikle çimentolarda yaklaşık %10 seviyesinde kullanılır (Alemayehu & Lennartz, 2009). Beton karışımlarında silis dumanı kullanımı ile boşluklar Şekil 1’de gösterildiği gibi doldurulur, agrega çimento arasındaki bağ kuvvetlenir, C-S-H esaslı hidratasyon ürünlerinin göreceli olarak artışı sağlanır ve betonun mekanik özelliklerinde genellikle iyileşmeler gözlemlenir (Taşdemir, 1996). Beton karışımının su ihtiyacında, silis dumanı kullanımıyla artış gözlemlenebilmektedir. Artış gösteren su miktarı sebebiyle betonun basınç dayanımı azalmaktadır. Oluşan bu durumu önlemek için, silis dumanı varlığında akışkanlaştırıcı katkı malzemesi kullanılarak arzulanan s/ç oranında karışımlar elde edilir (Paşa, 2018). Genel bir bakış açısıyla karışımlarda, çimento miktarı göz önüne alınarak kullanılan kimyasal ve mineral katkıları; taze betonda işlenebilirliği arttırmak, hidratasyon ısını düşürmek, terleme ve segregasyonu azaltmak, betonun dayanım ve dayanıklılığını arttırmak gibi taze ve sertleşmiş betonun birçok özelliğine etki eder (Erdoğan, 2003).

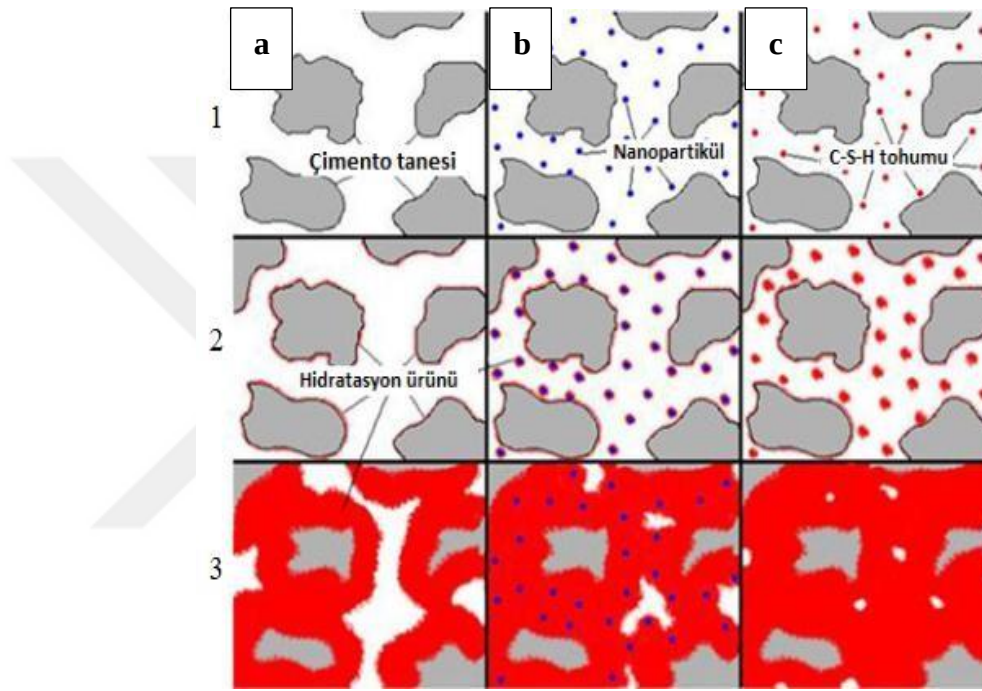


Şekil 1: Çimento Hamurunun Mikro Yapısına Silis Dumanının Etkisi

İlerleyen teknoloji ve endüstriyel üretim yöntemleri sayesinde, çeşitli nano malzemelerinin üretimi ve gelişimi hız kazanmıştır. Bu malzemelerin, ekonomik açıdan farklı sektörler tarafından erişilebilir olması, özellikle yapı malzemeleri gibi alanlarda da kullanılmasına olanak sağlamıştır (Turan, 2011). Nano malzemeler, boyutları nanometre (nm) ölçeğinde olan malzemelerdir (Norhasri vd., 2017). Yapılan çalışmalarda, nano malzemelerin yüksek performanslı kompozitlerde kullanımı, silis dumanı içeren geleneksel karışımlardan daha iyi mekanik özellik gösterdiği görülmüştür (Yu vd., 2014). Bu sebeple nano malzemeler, silika dumanı içeren yüksek performanslı betonların gelişiminde, alternatif bir katkı malzemesi olarak yer almaktadır. Özellikle nanometre ölçeğindeki silika partiküllerinden oluşan nano silika, yüksek yüzey alanı ve reaktif doğası, matris içerisinde kimyasal reaksiyonların başlamasına katkı sunar ve iyileşen agrega-matris geçiş bölgesi (ITZ) betonun mukavemetini artırır (Tepe, 2007). Nano silikanın keşfinden sonra betonda kullanılmak üzere pek çok nano bazlı parçacıklar geliştirildi. Nano alümina, titanyum oksit, karbon nano tüp ve polikarboksilatlar, betonda kullanılan bu nano malzemelerin bazı örnekleridir (Özbora, 2013).

Çimento karışımlarına eklenen nanopartiküller, erken yaş hidrasyon süreçlerinde çekirdeklenme reaksiyonlarını hızlandırarak hidrasyon sürecinin daha hızlı ilerlemesini sağlamaktadır. Bu amaçla en yaygın kullanılan yöntemlerden biri, nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-TiO₂ ve nano-Fe₂O₃ gibi nanopartiküllerin karışıma dahil edilmesidir. Bu tür nano partiküller, geniş reaktif yüzey alanları oluşturarak çok sayıda çekirdeklenme noktasının meydana gelmesine olanak tanır ve bu noktalar hidrasyon reaksiyonlarının başlaması için uygun alanlar sağlar. Özellikle nano-SiO₂ gibi partiküller, puzolanik özellikleri sayesinde C-S-H jeli oluşumunu desteklerken, çimento hamurundaki bileşenlerle kimyasal etkileşime girerek yeni çekirdeklerin oluşmasına katkıda bulunurlar. Örneğin, Birgisson ve arkadaşlarının (2012) yürüttüğü bir çalışmada, bağlayıcı miktarının %10'u kadar nano-SiO₂ ilavesi yapılan betonların 28 günlük basınç dayanımında %26 oranında artış gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada, %15 oranında silis dumanı içeren karışımlarda ise bu artış %10 ile sınırlı kalmıştır. Diğer yandan, bağlayıcının %5'i kadar nano-Al₂O₃ kullanılan bir çalışmada, 28 gün sonunda elastisite modülünde %143'lük bir artış raporlanırken, basınç dayanımında belirgin bir artış tespit edilmemiştir. Nano-ZrO₂ partiküllerinin çimento harcına ilavesiyle, karışımın geçirimsizliğinin azaldığı, mikro yapısının iyileştiği ve basınç dayanımında artış sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca, nano ölçekli kil partiküllerinin kullanımıyla betonun mekanik özelliklerinin geliştiği, klorür geçirimsizliğinin ve rötre miktarının azaldığı çeşitli deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur (Sanchez & Sobolev, 2010). Hidrasyon sürecinin hızlanması, büyük oranda nano parçacıkların yüksek reaktif yüzey alanlarında gerçekleşen kimyasal tepkimelere bağlıdır. Bu nedenle, partiküllerin yüzey alanları ve boyutları, çimento hidrasyonu açısından kritik öneme

sahiptir (Land & Stephan, 2012). Hidratasyonun daha verimli gerçekleşmesi için sentetik C-S-H gibi nano parçacıkların kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Bu yöntemle, normalde zaman alan kristal büyümesi sürecine gerek kalmaksızın, çekirdeklenme evresi atlanarak çimento hidratasyonunun gecikme (uyku) dönemi önemli ölçüde kısaltılmaktadır. (Nicoleau, 2011; Thomas vd., 2009). Nano partikül ilavesiyle hidratasyon kinetiğinin iyileştirilmesine çalışılan her iki yöntemde de hidratasyon ürünlerinin çekirdekleri sadece çimento tanelerinin üzerinde değil aynı zamanda bu nanopartiküllerin üzerinde, çimento taneleri arasında da Şekil 2’de belirtildiği gibi oluşmaktadır (Björnström vd., 2004; Porro vd., 2005).



Şekil 2: Saf çimento hamuru (a), Nano Silika İçeren Çimento Hamuru (b) Sentetik C-S-H İçeren Çimento Hamuru (c) Hidratasyon Gelişimi

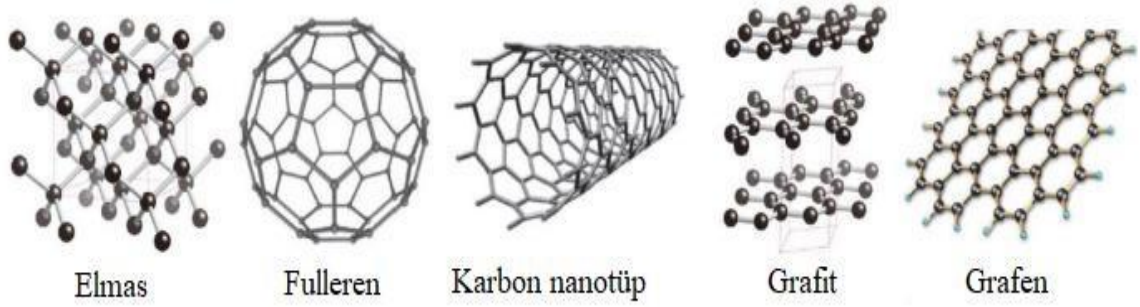
Nano malzemeler, çimentolu kompozitler haricinde de çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Özellikle titanyumdioksit ve silisyumdioksit gibi nano malzemeler, kaplamalar teknolojisinde kullanılmaktadır (Bertolini vd., 2010). Nano kaplama malzeme üretimine öncü olan Wilhelm Barthlott, 1997 yılında lotus etkisini (lotus effect) keşfetmiştir (Şahin, 2019). Lotus etkisi; lotus bitkisinin yapraklarının hidrofobik özelliği ve yaprak yüzeyinin nano yapısından yararlanarak geliştirilmiştir. Günümüzde yüzey malzemesi olarak kullanıldığında, kirin yağmur suyu gibi az miktarda su ile ilgili yapıyı temizlemesiyle minimum enerji tüketimi ve ekonomik kazanç sağlamaktadır (Turunç, 2019).

Yapısında nano malzemeleri içeren kompozitler için ifade edilen nano (yapılı) kompozitler; son zamanlarda sıklıkla karbon allotropları kullanılarak üretilmektedir (Tekin & Çetin, 2021). Bu kapsamda, grafit, aktif karbon, amorf karbon, karbon nanotüpler, fullerenerler

ve grafenler (grafen oksit ve nano grafen plaka) de dahil olmak üzere çeşitli allotroplar önemli nano bileşenleri oluşturmaktır (Kjaernsmo vd., 2018). Beton içerisine karbon nanotüpler (CNT) gibi nano malzemelerin eklenmesiyle daha yüksek dayanımlı, geçirimsizlik özellikleri iyileştirilmiş ve korozyona karşı direnci arttırılmış betonlar elde edilebilmektedir (Bjegovic vd., 2018). Jübile Kilisesi'nin Şekil 3'de bu malzemenin kullanımı ile inşa edildiği bilinmektedir. Grafen birkaç atom kalınlığında, iki boyutlu, kristal bir yapıya sahip, bal peteği şeklinde bir karbon atomlarının diziliminden oluşmaktadır, Şekil 4'te gösterilmiştir. Çelikten yaklaşık olarak 200 kat daha güçlüdür. İçsel çekme dayanımı 130 GPa ve buna karşılık gelen birim deformasyonu 0.25 mm/mm civarında olması, grafeni ölçülmüş en güçlü malzemeden biri yapmaktadır (Vjayaraghavan, 2017). Ayrıca elektromekanik özelliği arzulanan kompozitler için de üstün kullanım potansiyelleri sağlamaktadır.



Şekil 3: Jübile Kilisesi, İtalya



Şekil 4: Karbon Elementinin Allotropları

Bilinen en iyi grafen türevi; grafen oksittir. Grafen ile karşılaştırıldığında, grafen oksit; hidroksil, karboksilik ve epoksi grupları gibi daha fazla aktif oksijen grubuna sahip yüzeye sahiptir. Bu yüzden su içinde daha homojen dağılım gösterirler ve çimentolu kompozitlerin üretiminde avantaj sağlarlar (Vasudevareddy & Chandrasekhar, 2022). Grafen tabakalarının belirli bir yönde istenen kalınlığa düşürüldüğü veya ayrıldığı malzemeler ise nano grafen plaka (nGP) olarak adlandırılır. Bu tabakalar yaklaşık 0.34 nm genişliğinde olabilir (Stankovich vd., 2007).

Literatürde yer alan çalışmalar, nGP'ların mükemmel mekanik, durabilite, elektriksel ve termal özelliklere sahip olduğunu öne sürülmüş olup Tablo 1'de gösterilmiştir. Grafenle karşılaştırıldığında, nGP'lar benzersiz bir morfolojik yapıya sahip olmanın yanı sıra tek katmanlı grafen gibi dikkat çekici mekanik performanslara da sahiptir. Ayrıca, kolay hazırlama süreçleri ve uygun maliyetli olmaları nedeniyle; seramik, polimer veya çimento gibi farklı matrislerde takviye malzemeleri olarak tercih edilebilirler (Jiang vd., 2021). Sürdürülebilir grafen bazlı çimento kompozit adlı çalışmada, çimentoya grafenin dâhil edilmesi ile çimento pastasının sertleştirilmiş özellikleri üzerinde güçlü bir etki ettiği görülmüştür. Çimento bazlı grafen kompozitin basınç dayanımında %30 artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Rehman vd., 2017). Kullanım oranlarının ağırlıkça GO'de %0,02 ve nGP'da %0,03 olduğu bir çalışmada, basınç dayanımının sırasıyla %13 ve %41 arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, nGP'nın çimentonun hidrasyon reaksiyonunu teşvik ettiğini ve hidrasyon ürünlerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Mokhtar vd., 2017). Yapılan farklı bir çalışma ise, nGP'ların çimentonun hidrasyon süreci üzerinde az etkisi olduğunu ve güçlendirme mekanizmasının nGP'larla çimento arasındaki temel fiziksel etkileşimler olduğunu rapor etmiştir (Jing vd., 2017).

Tablo 1: Literatürden Elde Edilen Nano Malzeme Katkılı Karışımlarda Gözlemlenen Etkiler

Nano malzeme tipi	Kompozit	Durabilite etkisi						Kaynakça
		s/b oranı	Kullanım oranı (%)	Optimum oran (%)	Basınç dayanımına etkisi (%)	Kapiler su emme katsayısı	Boşluk oranı değişimi (%)	
GO	Harç	0.45	0-0.09	0.07	+22.25	-	-	(Vasudevareddy & Chandrasekhar, 2022)
	Harç	0.45	0.125-1	1	86	-	+14.6	(Sharma & Kothiyal, 2015)
	Harç	0.45	0-0.06	0.06	-	62	-	(Zeng vd., 2021)
	Harç	0.34	0.01-0.06	0.03	-	-	+13.3	(Mohammed vd., 2015)
	Harç	0.43	0-0.03	0.03	28	-	-	(Krystek, 2019)
nGP	Harç	0.30	0-0.10	0.05	+27.4	-	+19.9	(B. Wang & Shuang, 2018)
	Harç	0.35	0-0.15	0.05	-	-	+26.5	(Ruan vd., 2018)
	RPC	0.14	0.035-	0.14	+34.2	+34.8	+7.3	(Arslan vd., 2022)
	Harç	0.50	0.10	0.025	17	-	-	(Jiang vd., 2021)
	Harç	0.26	0-1	0.05	55	-	-	(Ge vd., 2021)
	UHPCC	0.16	0-0.1	0.05	+42.5	-	+11.5	(Guo vd., 2020)

* Burada + işareti sonuçlarda iyileşmenin olduğunu ve – işareti ise kötüleşmenin olduğunu ifade etmektedir.

Mevcut çalışmaların çoğu, nGP'ların çimento hamuru ve harç matrisindeki özelliklere etkisi ve bunları iyileştirme-değiştirme mekanizmalarına odaklanmışken, bunların harç performanslarına göre optimum kullanım oranlarını inceleyen çalışmalara rastlanılmamıştır.

Bu yüzden harçların mikro yapısındaki temel değişimler dikkate alınarak, nGP'ların kullanım miktarını etkileyen mekanizmaların tam olarak anlaşılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. İlgili tez çalışması, harçların tasarım dayanımlarına göre fiziksel, mekanik, durabilite ve mikroyapı açısından özellikleri incelenerek, nGP'ların optimum kullanım oranlarının nasıl değiştiğinin belirlenmesini amaçlamaktadır.

İKİNCİ BÖLÜM

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. MALZEME

2.1.1. Çimento

Hazırlanan çalışmada çimento olarak Aşkale Çimento Sanayi T.A.Ş' den temin edilen CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentoya ait özellikler Tablo 2' de ve Şekil 5' de gösterilmiştir.



Şekil 5: Aşkale Çimento Fabrikasından Temin Edilen Çimento

2.1.2. Silis Dumanı

Çalışmada Eti Elektrometalurji A.Ş.' den temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Bu malzemeye ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

2.1.3. Karma Suyu

Beton karma suyunda ve yüksek sıcaklıklarda kürleme işlemleri sırasında kullanılan su Bayburt şehir şebekesinden temin edilen içme suyu kullanılmıştır.

Tablo 2: Kullanılan Toz Malzemelerin Kimyasal ve Fiziksel Analizleri

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	SD	KK
SiO	20,09	90,7	95,9
Al ₂ O ₃	4,2	0,5	0,2
Fe ₂ O ₃	3,1	0,9	0,3
CaO	60,2	0,6	1,7
MgO	3,1	1,5	0,2
SO ₃	2,65	-	-
Na ₂ O	0,3	0,6	0,1
TiO ₂	0,4	-	-
K ₂ O	0,8	1	0,1
Özgöl Ağırlık	3,16	2,69	2,85
Renk	Gri	Gri	Açık bej

* SD: Silis dumanı, KK: Kuvars kumu

2.1.4. Agrega

Bu çalışmada ince agrega (standart RİLEM kum), kuvars kumu (0.5-1.0 mm) farklı oranlarda kullanılarak harç karışımları oluşturulmuştur.



Şekil 6: Karışımda Kullanılan; İnce Agrega (a), Kuvars Kumu (b).

2.1.5. Nano Grafen Plaka

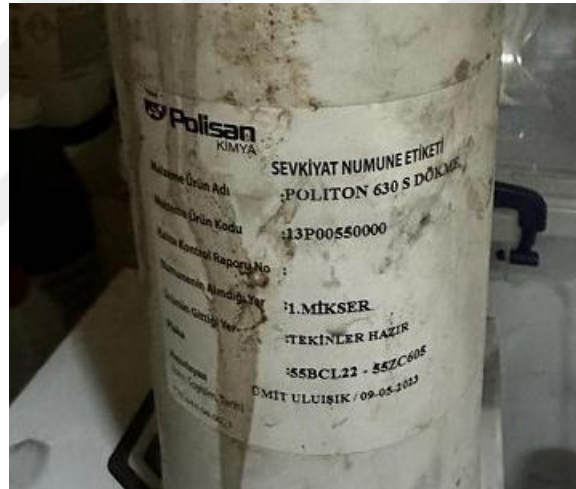
Bu çalışmada Nanografi Nanotechnology A.Ş' den temin edilen nano grafen plaka (nGP) kullanılacaktır. Firmadan temin edilen nano grafen malzemenin teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3: Nano Grafen Malzeme Teknik Özellikleri

Teknik Özellikler	
Safılık (%)	99,9
Kalınlık(nm)	3
Çap (µm)	1,5
Özgül Yüzey Alanı (m ² /g)	320
İletkenlik (s/m)	1400-1900
Renk	Siyah

2.1.6. Süper Akışkanlaştırıcı

Çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı Polisan Kimya firması tarafından üretilen Politon 630 S Dökme, 13P00550000 kodlu kimyasaldır. Şekil 7’de gösterilen süper akışkanlaştırıcı beton katkısı, taze betonda segregasyona neden olmadan yüksek işlenebilirlik sağlar. Düşük S/Ç oranlarına sahip beton karışım tasarımı elde edilir.

**Şekil 7:** Karışımlarda Kullanılan Süper Akışkanlaştırıcı

2.2. YÖNTEM

2.2.1. Karışım Oranları

Bu çalışmada, 3 farklı dayanım serisinin elde edilmesi amacıyla farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip harç karışım serileri hazırlanmıştır. 0.40 ve 0.30 su/bağlayıcı harç serilerinde, sıklıkla kullanılan silis dumanı ve kuvars kumu eklenerek karışımların dayanımları artırılmıştır. Sonuç olarak toplamda 5 farklı harç karışımı elde edilmiştir. Tablo 4’te hazırlanan karışım oranları gösterilmiştir. Karışımların içeriğinin anlaşılabilmesi için notasyon sistemiyle isimlendirilmiştir. Buna göre notasyonda “M” katkısız serileri “MS” ise silis dumanı ve kuvars kumu katkısı içeren serileri göstermektedir. “W” içeriğiyle birlikte su/bağlayıcı miktarının bilgisi, “N” notasyonu ile de karışım içerisine eklenmiş olan nano grafen plaka miktarı

belirtilmiştir. Örnek verilecek olursa “M_W0.30_N0.6” kodlamasında; bağlayıcı olarak çimento bulunmaktadır. Su/bağlayıcı miktarı 0,30 olarak belirtilmiş olup, karışım içerisinde çimento miktarının %0,6 miktarınca da nano grafen plaka eklenmiştir.

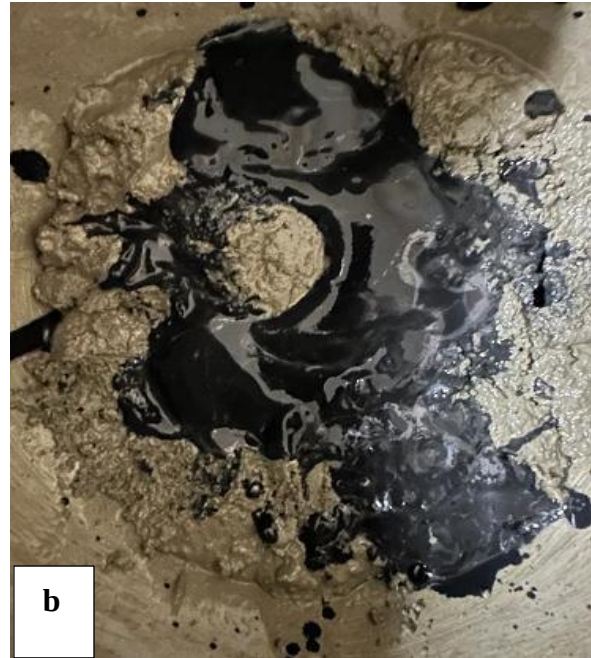
Tablo 4: Hazırlanan Karışım Oranları

Karışım Adı	Çimento (g)	Su (g)	Silis Dumanı (g)	Kum (g)	Kuvars K. (g)	nGP (g)
M_W0.55_N0	439,8					0
M_W0.55_N0.3	438,5					1,32
M_W0.55_N0.6	437,2	241,88	0	1209,4	0	2,64
M_W0.55_N1.2	434,5					5,28
M_W0.55_N2.4	429,2					10,55
M_W0.40_N0	568,8					0
M_W0.40_N0.3	567,1					1,71
M_W0.40_N0.6	565,4	227,54	0	1137,7	0	3,41
M_W0.40_N1.2	562					6,83
M_W0.40_N2.4	555,2					13,65
MS_W0.40_N0	512					0
MS_W0.40_N0.3	510,3					1,71
MS_W0.40_N0.6	508,6	227,54	56,9	1137,7	0	3,41
MS_W0.40_N1.2	505,1					6,83
MS_W0.40_N2.4	498,3					13,65
M_W0.30_N0	770,6					0
M_W0.30_N0.3	768,3					2,31
M_W0.30_N0.6	766	231,19	0	867	96,33	4,62
M_W0.30_N1.2	761,4					9,25
M_W0.30_N2.4	752,1					18,5
MS_W0.30_N0	693,6					0
MS_W0.30_N0.3	691,3					2,31
MS_W0.30_N0.6	689	231,19	77,1	867	96,33	4,62
MS_W0.30_N1.2	684,3					9,25
MS_W0.30_N2.4	675,1					18,5

*M: Harç, MS: Silisli harç, W: su/çimento oranı, N: Nano grafen plaka

2.2.2. Karışımın Hazırlanması

Bu çalışmada, 25 farklı harç karışım serileri tasarlanmıştır. Hazırlanan karışımda öncelikle mikser Şekil 8.a'da gösterildiği gibi; çimento ve su koyularak önce 140 rpm hızda 1-2 dakika ardından kontrollü bir şekilde 280 rpm hızda 1 dakika boyunca homojen karışım elde edilene kadar karıştırıldı. Ardından kum ilave edilerek karıştırma işlemine yaklaşık 2 dakika daha devam edildi. Karışımlar hazırlanırken gerek duyulması halinde akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapıldı. Katkısız seriler için bu işlemler periyodik olarak tekrarlandı istenen işlenebilirlik ve kıvamda olan karışım, temizlenip yağlanmış olan kalıplara, yerleştirme tekniklerine uygun olarak yerleştirildi. 0,30 ve 0,40 s/b oranına sahip harç serilerinde, silis dumanı katkısıyla veya katkısız olmak üzere 5 farklı harç karışımı hazırlandı. Katkısız seriye ilave olarak 4 farklı kullanım oranında, (%0.30, 0.60, 1.2, 2.4) nano grafen katkılı harç karışımlar oluşturuldu. Karışıma öncelikle çimento ve suyu karıştırarak başlandı, 140 rpm hızda 1-2 dakika karıştırıldı. Ardından kum, kuvars kumu (MS serileri için) ve gerekli karışımlara silis dumanı ilavesi yapıldı. Bu karışım hazırlandıktan sonra nGP katkılı serileri oluşturmak için; su miktarının yarısının içerisine nGP eklenerek manyetik karıştırıcı yardımıyla nano malzemenin homojen dağılması sağlandı. Elde edilen bu homojen karışım çimento hamuruna ilave edildi. Bu karışım önce 140 rpm hızda 1-2 dakika karıştırıldı. Ardından 2 dakika da 280 rpm hızında karıştırıldı karışımın kıvamına göre akışkanlaştırıcı ilavesi yapılarak kalıplara yerleştirildi.

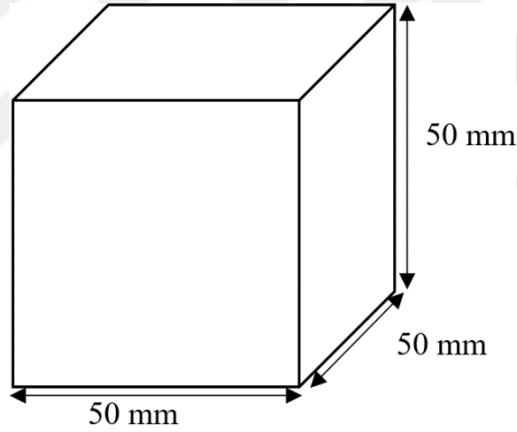


Şekil 8: Karıştırma İşlemleri İçin Kullanılan Mikser (a), Karışıma nGP Eklenmesi (b)



Şekil 9: Manyetik Karıştırıcı

Her bir karışım serisinden 6'şar numune şeklinde toplamda 25 karışım için $50 \times 50 \times 50$ mm ebatlarında 150 numune hazırlanmıştır. Şekil 10'da ebatlar sembolize edilmiştir.



Şekil 10: Karışımlarda Kullanılan Küp Numune Boyutları

2.3. TAZE BETON DENEYLERİ

2.3.1. Yayılma Tablası

Hazırlanan karışımların kıvamını belirleyebilmek için yayılma tablası deneyi uygulandı. Karıştırma kabından alınan harç, yayılma tablasının üzerindeki kalıbın içerisine gerekli yerleştirme koşullarına göre yarısı dolacak şekilde yerleştirildi. Ardından diğer yarısı yerleştirilerek, üst yüzey mala ile temizlendi. Yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra, kalıp çıkarıldı Şekil 11'de gösterilmiştir. TS EN 12350-5 standartlarına uygun olarak 25 vuruş uygulandı. Ardından tablanın iki ekseninden yayılma çapı değerleri okundu, okunan değerlerin ortalaması kaydedildi.



Şekil 11: Hazırlanan Harç Karışımının Yayılma Tablası Üzerinde Kalıba Yerleştirilmesi

2.4. SERTLEŞMİŞ BETON DENEYLERİ

2.4.1. Yoğunluk-Su Emme

Çalışmada 50x50x50 mm ebatlarındaki küp numuneler kür havuzundan çıkardıktan sonra; suya doygun ağırlığı (w_1) Şekil 12’de gösterildiği gibi ve su içerisindeki ağırlıkları (w_2) 0,001 g hassasiyetindeki tartı ile tartılarak sonuçlar kaydedildi. Sonrasında $105\pm5^\circ\text{C}$ ’de 24 saat boyunca hava sirkülasyonlu etüvde bekletilen numuneler tekrar tartılarak, etüv kurusu (w_0) ağırlıkları elde edildi. Su emme hesaplanırken aşağıda verilen formül kullanılır.

$$S = \frac{w_1 - w_0}{w_0} 100 \quad (1)$$

$$G = \frac{w_1 - w_0}{w_1 - w_2} \times 100 \quad (2)$$

G: Görünen porozite (%),

S: Kütlece su emme (%),

w_0 : Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g),

w_1 : Numunenin suya doygun ağırlığı (g),

w_2 : Numunenin su içindeki ağırlığı (g).



Şekil 12: Kür Aşamasındaki Numune örnekleri (a), Kür Havuzundan Çıkarıldıktan Sonra Yapılan Ölçüm (b)

2.4.2. Basınç Dayanımı

90 gün boyunca kür havuzunda bekletilen numuneler, kür havuzundan çıkarıldıktan sonra $105 \pm 5^\circ\text{C}$ 'de 24 saat boyunca etüvde bekletildi. Etüvden çıkarıldıktan sonra numunelerin ortam sıcaklığına gelmeleri beklendi. Ardından beton pres makinesine sırasıyla koyulan numunelere Şekil 13'deki gösterildiği gibi yükleme yapılarak basınç dayanımları elde edildi. Basınç dayanımı deney yöntemi ile ilgili TS EN 12390-4' e uyulmuştur.



Şekil 13: Numunelerin Beton Pres Makinesinde Dayanımının Belirlenmesi

2.4.3. Kılcal Su Emme

Hazırlanan numuneler, $55\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de hava sirkülasyonlu etüvde bünyesindeki suyu tamamen kaybedinceye etüvde bekletildi. Ardından numuneleri su ile temas edecek olan kısımlarının çevresi buharlaşmayı engellemek amacıyla yüksek su geçirmezlik özelliğe sahip silikonla kaplandı. Numuneler deneye tabi tutulması için özel düzenek hazırlanmış ve kap numune taban alanına su temas edecek şekilde 2-3 mm geçecek şekilde su ile dolduruldu. Silikon ile kaplanarak deney yapmaya hazır hale getirilen numuneler 0,01 g hassasiyetdeki tartı ile ilk ağırlıkları tartılmış ve deney düzeneğine Şekil 14'te gösterildiği gibi yerleştirildi. Numuneler daha sonra ASTM C 1585 standardına uygun olarak 0,1, 5, 10, 20 ve 30. dakikada, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6. saatte ve 1, 2, 3, 5, 6, 7 ve 8. günlerde bez ile yüzeyindeki fazla su alınarak ağırlık okumaları yapıldı.



Şekil 14: Kılcal Su Emme Deney Düzeneği

2.4.4. Cıvalı Porozimetre

Beton numunelerinin porozite özelliklerini belirlemek amacıyla cıvalı porozimetre yöntemi uygulanmıştır. Numune hazırlığı aşamasında test edilecek beton parçaları yaklaşık 1–2 cm³ hacme sahip olacak şekilde kırılmış ve seçilmiştir. Numunelerden alınan bu küçük örneklerin kuru ve temiz olmasına özen gösterilmiştir. Analizler AutoPore V serisi cihaz ile gerçekleştirilmiştir. AutoPore V serisi sistemler ulaşmak istenen gözenek boyutuna göre 33.000 psi ya da 60.000 psi basınca ulaşacak şekilde 2 farklı seride sunulmaktadır. İş yüküne bağlı olarak da 3 portlu ya da 6 portlu olarak seçeneklere sahiptir.

Cıvalı porozimetre yöntemi ile beton içerisindeki boşlukların hacmi, boyutu ve dağılımını belirlemek için sonuçlar sunulmaktadır. AutoPore V cihazı, numune içerisine farklı basınçlar altında cıva enjekte ederek boşlukların çaplarına göre doluluk oranlarını tespit etmektedir. Deney sürecinde cıva, boşluk çapı büyük olan gözeneklerden başlayarak artan

basınçla daha küçük gözeneklere kadar nüfuz etmektedir. Bu sayede, numunelerin toplam porozite değeri ile birlikte, mikro ve makro gözenek dağılımları da ayrıntılı olarak analiz edilebilmektedir. Elde edilen veriler, özellikle betonun geçirimsizlik, dayanıklılık ve mekanik performansına doğrudan etki eden mikroyapı özelliklerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışma kapsamında cihazın sağladığı yüksek çözünürlüklü gözenek analizi, nGP katkısının beton iç yapısı üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından temel veri kaynağı olmuştur.

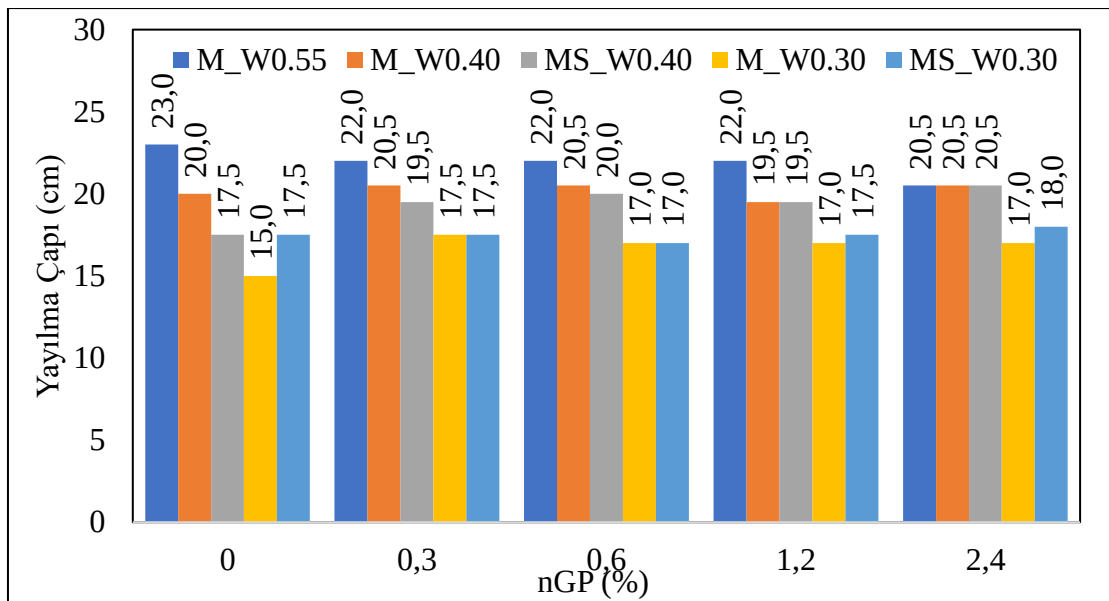


ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

3.1. İŞLENEBİLİRLİK VE KIVAM

Yayılma tablası deneyi ile farklı dozajlarda nGP ikamesi ile çimento esaslı kompozitlerin reolojik davranış hakkında bilgi edinilmektedir. Tüm serilerde tutarlı bir eğilim gözlemlenmektedir. Akışkanlıkta azalma, özellikle daha düşük s/b oranlarına sahip karışımlarda ve silis dumanı içeren karışımlarda (MS serisi) belirgindir Şekil 15 ve Tablo 5’te ilgili sonuçlar gösterilmiştir. Silis dumanı ve nGP katkısı; ince partikül boyutlarına ve yüksek yüzey enerjilerine sahip olduğundan, karıştırma suyu talebini artırır ve taze harcın işlenebilirliğini daha da kısıtlar. Genel olarak akışkanlıkta bir azalma eğilimi gözlemlense de orta düzeydeki nGP dozajları (toplam bağlayıcı ağırlığının %0.6'ya kadar) karışımların işlenebilirliğini önemli ölçüde bozmaz. Bu, nGP eklemenin optimum oranı olduğunu ve bu orandan sonra olumsuz etkinin mekanik ve dayanıklılık performansındaki potansiyel faydaları gölgelediğini gösterir. Optimum oran, ileri düzeyde çimento esaslı kompozitlerin tasarımı için özellikle önemlidir çünkü hem taze hem de sertleşmiş özelliklerin optimize edilmesine olanak tanır. Ayrıca, yayılma tablası yayılmasındaki değişkenlik, daha düşük s/b oranlarına sahip karışımlarda ve MS serisinde daha büyüktür; bu da bu sistemlerin, karışım bileşimi ve nano malzeme dozajındaki değişikliklere karşı daha yüksek bir duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, nGP katkılı çimento esaslı malzemelerle çalışırken karışım tasarım parametrelerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 15: Tüm Karışım Serileri İçin Yayılma Çapı Değerleri

Özetle, bu bulgular, nGP'ler gibi nano malzemelerin eklenmesinin, işlenebilirlik ve performansı dengelemek için karışım oranlarının dikkatlice optimize edilmesini gerektirdiği konusunda literatürdeki genel görüşü doğrulamaktadır. Gözlemlenen eğilimler, partikül boyutu dağılımı, yüzey kimyası ve su isteğinin, ileri düzey çimento esaslı sistemlerin reolojik davranışını belirlemede nasıl karmaşık bir etkileşimde bulunduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 5: Yayılma Tablası Deney Sonuçları

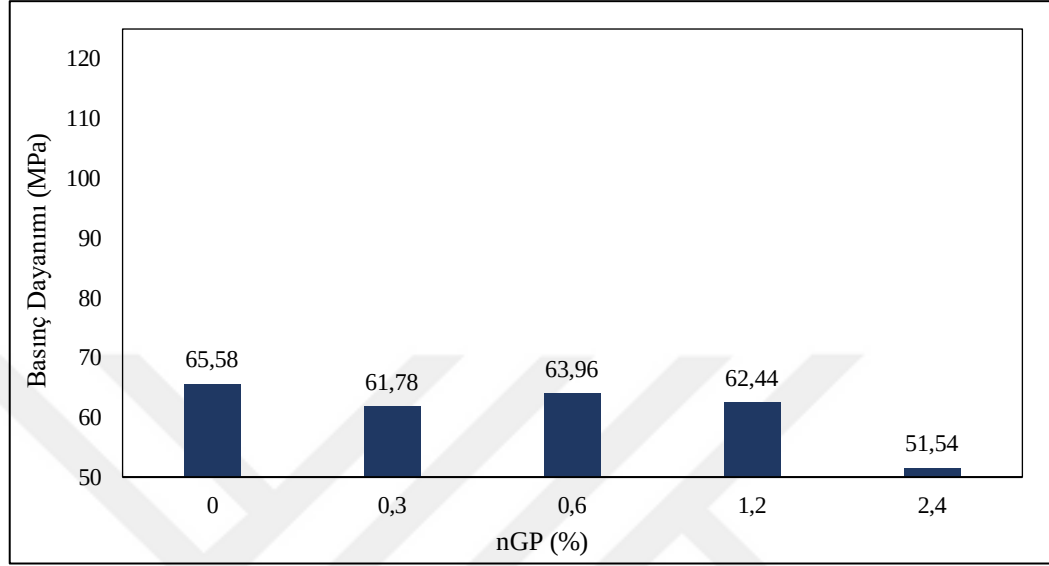
Karışım Adı	Çimento (g)	Su (g)	Silis Dumanı (g)	Kum (g)	Kuvars Kumu (g)	Süper akışkanlaştırıcı Katkı	nGP (g)	Yayılma Çapı
M_W0.55_N0	439,8						0	23
M_W0.55_N0.3	438,5						1,32	22
M_W0.55_N0.6	437,2	241,88	0	1209,4	0	0	2,64	22
M_W0.55_N1.2	434,5						5,28	22
M_W0.55_N2.4	429,2						10,55	20,5
M_W0.40_N0	568,8					0	0	20
M_W0.40_N0.3	567,1					3,12	1,71	20,5
M_W0.40_N0.6	565,4	227,54	0	1137,7	0	3,29	3,41	20,5
M_W0.40_N1.2	562					3,66	6,83	19,5
M_W0.40_N2.4	555,2					9,03	13,65	20,5
MS_W0.40_N0	512					0	0	17,5
MS_W0.40_N0.3	510,3					2,52	1,71	19,5
MS_W0.40_N0.6	508,6	227,54	56,9	1137,7	0	3,1	3,41	20
MS_W0.40_N1.2	505,1					3,35	6,83	19,5
MS_W0.40_N2.4	498,3					6,81	13,65	20,5
M_W0.30_N0	770,6					2,51	0	15
M_W0.30_N0.3	768,3					4,22	2,31	17,5
M_W0.30_N0.6	766	231,19	0	867	96,33	4,75	4,62	17
M_W0.30_N1.2	761,4					5,23	9,25	17
M_W0.30_N2.4	752,1					9,13	18,5	17
MS_W0.30_N0	693,6					3,42	0	17,5
MS_W0.30_N0.3	691,3					4,4	2,31	17,5
MS_W0.30_N0.6	689	231,19	77,1	867	96,33	4,82	4,62	17
MS_W0.30_N1.2	684,3					5,21	9,25	17,5
MS_W0.30_N2.4	675,1					9,91	18,5	18

3.2. BASINÇ DAYANIMI

Hazırlanan beton karışımına çimento ağırlığının %0,3'ten %2,4' e kadar nGP eklenerek üretilen betonların basınç dayanımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerde; düşük dayanımlı karışımlarda, %0,3 nGP katkısıyla -%5,79 oranında azalan basınç dayanımı değerleri gözlenmiştir. Alınan referans numunesine göre, basınç dayanımında artış belirlenmemiştir. %2,4 nGP katkılı karışımlarda dayanımın %21,42 oranında azalarak en düşük dayanım seviyeleri ölçülmüştür. 0,30 su/bağlayıcı içeren karışımların basınç dayanım sonuçları nGP miktarının artışıyla birlikte kıyaslamalı Şekil 16'da da gösterilmiştir. Buna göre referans numunelerinde 65,58MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. Referans numuneye kıyasla nGP oranın artmasıyla birlikte %0,3, %0,6, %1,2 ve %2,4 oranlarındaki basınç dayanımları sırasıyla -%5,79, -%2,48, -%4,79 ve -%21,42 oranında değiştiği belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı nGP içermeyen referans karışımlarda 65,58 MPa olarak, en düşük basınç dayanımı ise %2,4 nGP içerikli karışımlarda 61,78 MPa olarak ölçülmüştür. nGP oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımlarında azalmalar olduğu özellikle %2,4 oranına kayda değer bir azalma olduğu görülmektedir. Azalmış mekanik performansın temel nedenlerinden biri, çimentolu matris içinde GO'nun düzgün bir şekilde dağılmasının zorluğudur. Wang ve diğerlerinin belirttiği gibi, çimento harçlarının mekanik özellikleri kullanılan GO'nun çapından önemli ölçüde etkilenir; daha büyük çaplar, mekanik mukavemeti artırmak için gerekli olan mikro çatlakların daha iyi köprülenmesine ve tıkanmasına yol açabilir (Wang vd., 2019). Ancak, GO düzgün bir şekilde dağılmazsa, aglomerasyona yol açabilir, bu da takviye edici etkilerini azaltır ve hatta matris içinde zayıf noktalar oluşturabilir (Wang vd., 2016). GO'nun bir takviye olarak etkinliği, genellikle zayıf dağılım tarafından engellenen çimento yapısına sorunsuz bir şekilde entegre olma yeteneğine bağlıdır (Karakouzian vd., 2021). Dahası, GO ile çimentonun hidrasyon ürünleri, özellikle kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) arasındaki etkileşim de mekanik performansı etkileyebilir.

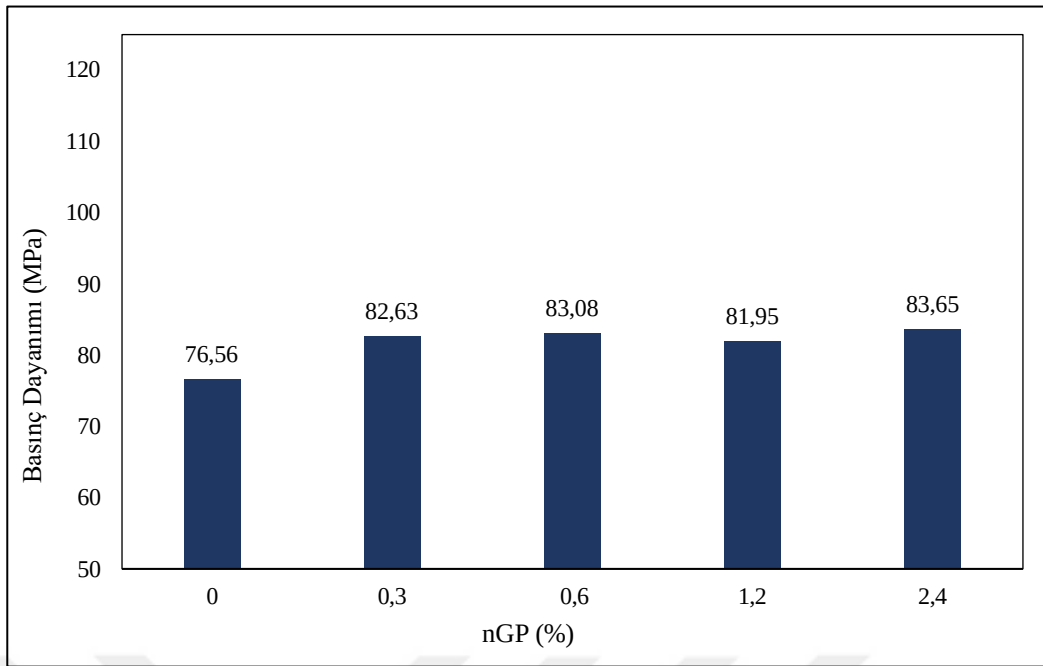
Bazı çalışmalar GO'nun C-S-H oluşumunu artırabileceğini ve hidrasyonu hızlandırabileceğini ve bunun da mekanik özellikleri iyileştirebileceğini belirtirken (Krystek, 2019), diğerleri aşırı GO içeriğinin bu hidrasyon ürünlerinin optimum oluşumunu bozabileceğini öne sürmektedir. Örneğin, Zheng ve diğerleri, GO'nun çimentolu malzemelerin mikro yapısını değiştirebileceğini, ancak GO miktarındaki dengesizliğin beklenen C-S-H morfolojisinin değişmesi nedeniyle optimum olmayan mekanik özelliklere yol açabileceğini vurgulamaktadır (Zheng vd., 2017). Bu bozulma, yük altında çatlamaya daha yatkın olan daha az kohezif bir matrisle sonuçlanabilir. M_W0.55 karışım serilerinde de matris ve ara yüzde bulunan boşluk miktarının fazlalığından kaynaklı olarak %2,4 oranına kadar nGP katkısının

mekanik performanslar üzerinde belirgin bir etkisi görülememiştir. %2,4 oranında ise mekanik performanslarda belirgin azalmalar görülmüş, literatürde de belirtildiği gibi nGP miktarındaki dengesizliğin sonucu olarak optimum olmayan dayanım kaybı oluşmuştur. Optimum serinin nGP içermeyen seri olduğu, nGP katkısının düşük dayanımlı serilerde kullanılmasının mekanik olarak olumlu bir etki oluşturmadığı belirlenmiştir.



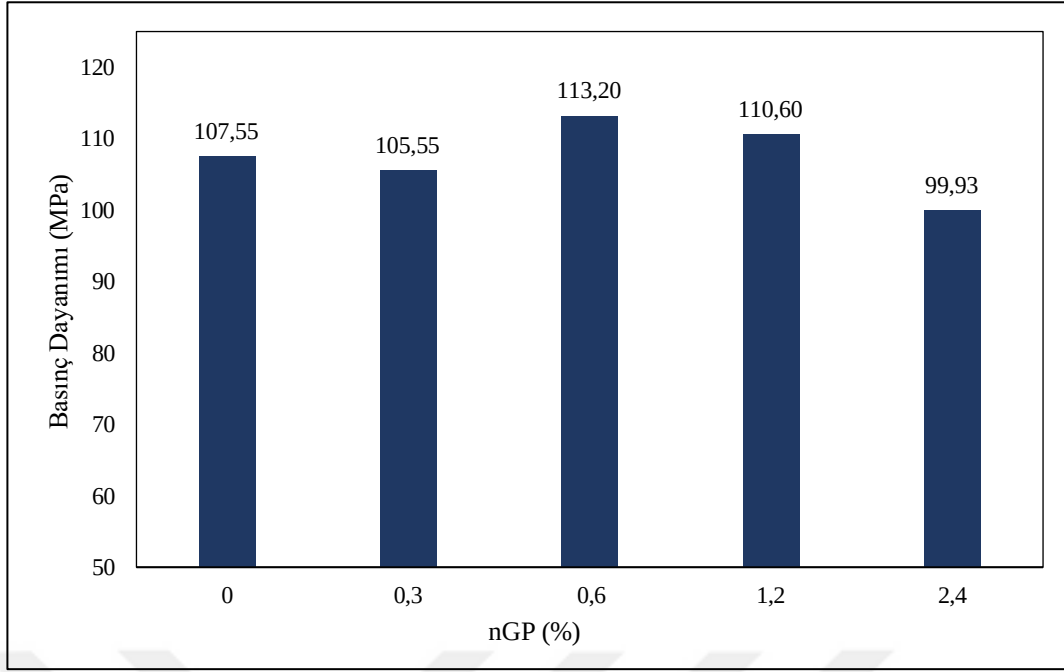
Şekil 16: 0,55 s/b (M_W0.55) Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları

Dayanımı Sonuçları 0,40 su/bağlayıcı içeren karışımlarda; nGP katkılı karışım serilerinde (%0,3, %0,6, %1,2, %2,4) basınç dayanımlarının referans numuneye kıyasla basınç dayanımlarının arttığı belirlenmiştir. Şekil 17’ de basınç dayanım değerleri gösterilmiştir. 0,55 s/b içeren serilere kıyasla 0,40s/b içerikli serilerde mekanik mukavemetlerde artışlar olduğu belirlenmiştir. Basınç mukavemetinin 75 MPa üzerinde olmasıyla aynı karışım türünde negatif yönün aksine pozitif yönde etkiler belirlenmiştir. Nano grafen matris içerisinde iyi dağıtıldığında betonun mikro yapısında güçlü bağlar oluşturarak iç yapısındaki mikro çatlakların yayılmasını engellemektedir (Chuah vd., 2014). Bu sayede daha homojen ve yoğun bir yapıya sahip bir karışım elde edilmiş olup, dayanımlardaki artışlarla sonuçlanmıştır. Buna kıyasla %2,4 oranına erişildiğinde %0,6 oranına kıyasla belirgin bir artış belirlenmemiştir. Fayda/dayanım açısından incelendiğinde artan nGP oranının kayda değer bir sonuca ulaşamadığı belirtilebilir. %1,2 oranında ise %0,6 oranına kıyasla basınç dayanımında bir miktar azalma olduğu görülmektedir. Özellikle yüksek oranlardaki nano malzeme oranlarındaki homojen karıştırma zorluğu ve dispersiyon kaynaklı problemlerden kaynaklı olabileceği şeklinde yorumlanabilir.



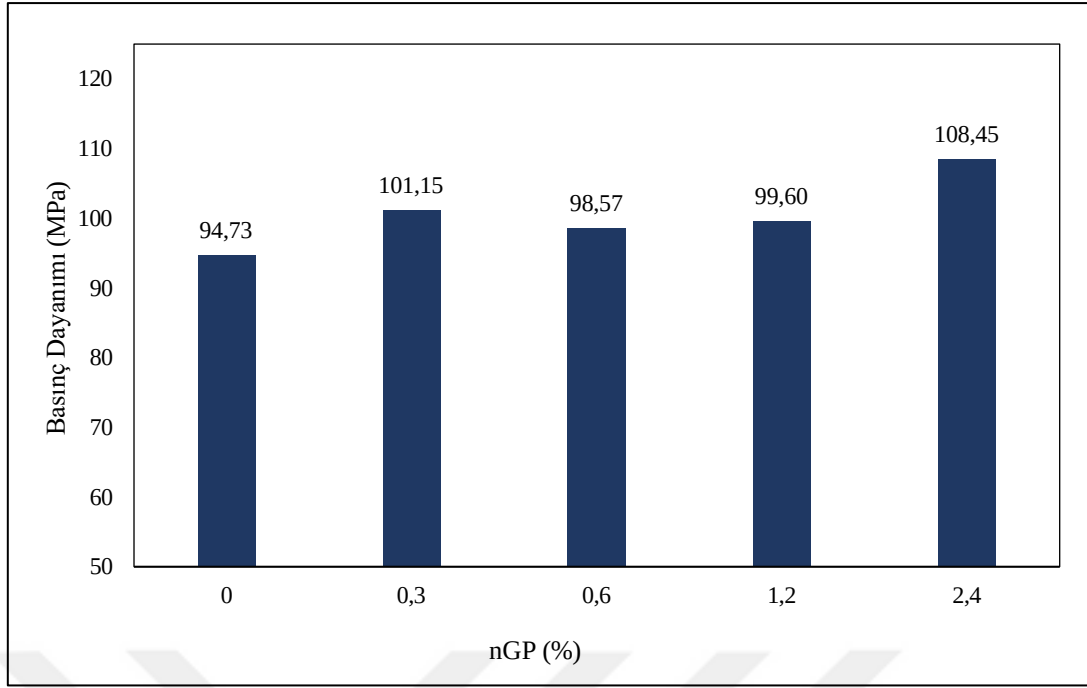
Şekil 17: 0,40 s/b (M_W0.40) Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları

0,30 su/bağlayıcı içeren karışımların basınç dayanım sonuçları Şekil 18’de gösterilmiştir. Buna göre referans numunelerinde 107,55 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı %0,6 nGP katkı oranıyla 113,20 MPa olarak, en düşük basınç dayanımı ise %2,4 nGP içerikli numunede 99,93 MPa olarak ölçülmüştür. nGP oranının artmasıyla birlikte özellikle %2,4 oranına kayda değer bir azalma olduğu görülmektedir. Karışım serilerinde nGP katkısı arttıkça matris ile nano grafen arasındaki bağlantı kalitesi de önem kazanır. Eğer nGP ile matris arasında yeterli bağlanma sağlanmazsa, malzeme içindeki zayıf bağlantı alanları oluşur. Oluşan bu zayıf bölgeler, özellikle yüksek basınç altında daha kolay deformasyona uğrayabilir. Yüksek nGP oranlarında, bu tür bağlantı zayıflıkları daha belirgin hale gelebilir ve kompozit malzeme üzerindeki basınç yükü düzgün dağılmadığı için malzeme dayanımında düşüş gözlemlenir. Yüksek nGP içeriği; kompozit malzemelerin basınç dayanımını olumsuz etkileyebildiği ve malzemenin iç yapısındaki zayıf bağlantı alanlarını artırarak dayanımı zayıflattığını göstermiştir. Li ve diğerlerinin yaptığı çalışmada da yüksek basınç altındaki performans, yalnızca grafen içeriği değil, aynı zamanda grafen ile matris arasındaki güçlü bağların varlığına da dikkat çekmiştir. Grafen katkısının yüksek olduğu durumlarda, dağılım problemleri ve zayıf ara yüzey etkileşimleri kompozitlerin basınç dayanımını olumsuz etkilenebileceği öne sürülmüştür (Li vd., 2017). Bu nedenle, nGP içeriği ve karışım içerisindeki dağılımındaki denge kompozitlerin yüksek basınç altındaki performansı için kritik öneme sahip olduğu görülmüştür. Optimum serinin %0,6 nGP içeren seri olduğu, yüksek oranda (%1,2 ve %2,4 nGP) katkının bu serilerde kullanılmasının mekanik olarak olumlu bir etki oluşturmadığı hatta %2,4 nGP oranında etkinin olumsuz yöne doğru değişeceği görülmüştür.



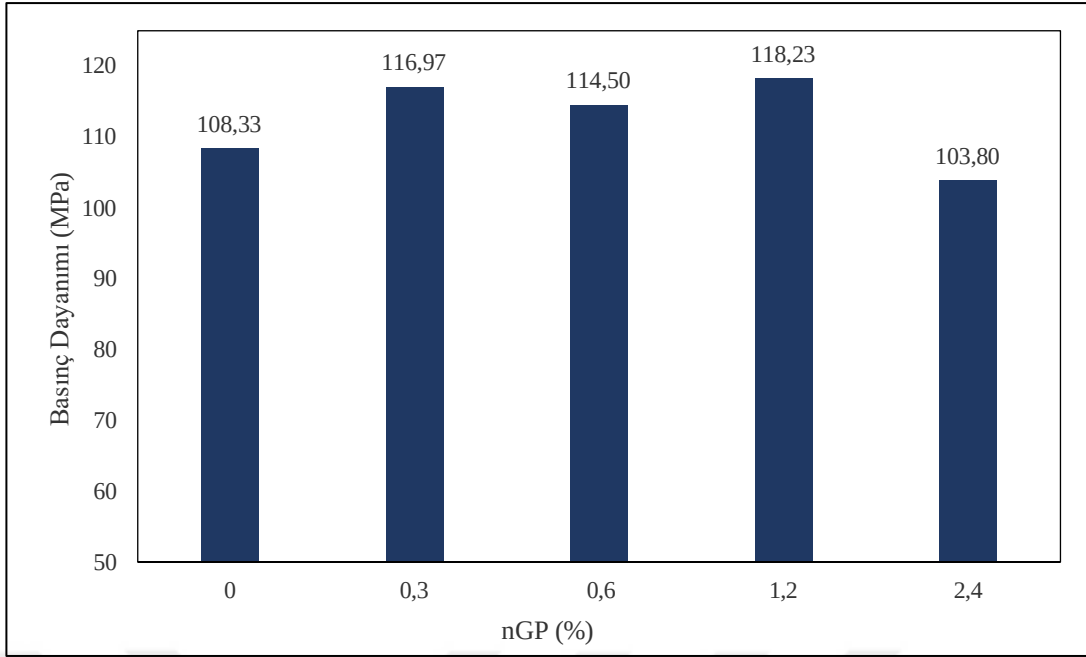
Şekil 18: 0,30 s/b (M_W0.30) Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları

MS_W0.40 (silis dumanı ve kuvars kumu içeren, 0,40s/b) serilerinin basınç dayanım sonuçları Şekil 19'da gösterilmiştir. Buna göre referans numunelerinde 94,73 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı %2,4 nGP katkı oranıyla 108,45 MPa, en düşük basınç dayanımı ise referans karışımında elde edilmiştir. nGP oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımlarında azalma ve artışta lineer bir değişimin olmadığı görülmüştür. Silis dumanı katkısı ile mikroyapıyı iyileştirmek, basınç dayanımında artış sağlayabilmek amaçlanmıştır. Kullanılan katkının karışımlarda bu özellikleri sağlayabilmesi için; uygun su/bağlayıcı oranı kullanılıp karışımın homojenliği sağlanmalı, optimum seviyede silis dumanı kullanılmalıdır. Kullanım miktarına bağlı olarak dayanım artışı sağlarken aşırı kullanımı beton karışımlarında işlenebilirlik sorununu meydana getirebilir. Bu serilerde, silis dumanı katkısız orta dayanımlı serilere göre basınç dayanımlarında artış olduğu görülmüştür. Burada nGP katkıları aynı iken silis dumanı kullanımının basınç dayanımına olumlu etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 19: MS_W0.40 Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları

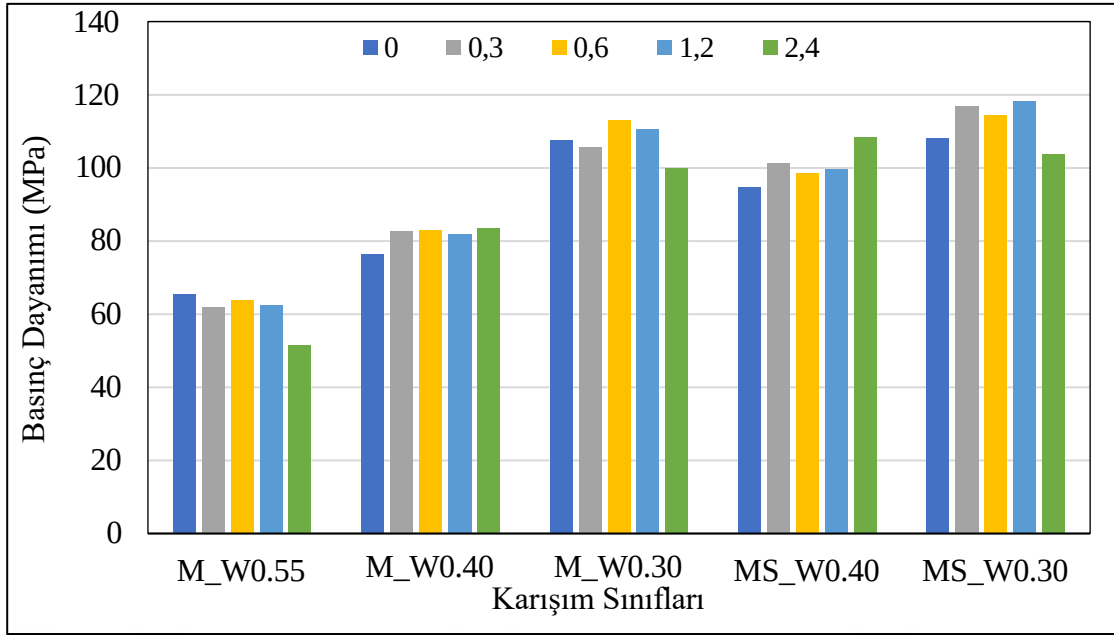
MS_W0.30 (silis dumanı ve kuvars kumu içeren, 0,30s/b) karışımların basınç dayanım sonuçları Şekil 20’de gösterilmiştir. Buna göre referans numunelerinde 108,33 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı %1,2 nGP katkı oranıyla 118,23 MPa olarak, en düşük basınç dayanımı ise %2,4 nGP içerikli numunede 103,80 MPa olarak ölçülmüştür. Hazırlanan bu serilerde, silis dumanı katkısız yüksek dayanımlı serilere göre basınç dayanımı artışı sağlanırken; iki seride de %2,4 nGP içerikli karışımda minimum basınç değeri elde edilmiştir. Bu serilere bakılarak yüksek miktarda nGP kullanımı ile maksimum basınç dayanımı elde edilmediği görülmüştür. Karışımda kullanılan kuvars kumu ve silis dumanı, betonun basınç dayanımını artırmak için etkili parametrelerdendir. Bu malzemelerin doğru oranlarda kullanılması, betonun mekanik özelliklerinde iyileştirmeler meydana getirebilir. Uzbaş ve Aydın yaptıkları çalışma ile Portland çimentosu yerine ağırlıkça farklı oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve silis dumanı+ uçucu kül kullanarak incelemeler yapmıştır. Sonuçlara göre, silis dumanı kullanılan betonlarda ise her yaşta kontrol numunesine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Basınç dayanımının en yüksek değeri, çimento yerine, belli oranlarda (%10-15) kullanılan silis dumanı ve uçucu kül katkısı kullanıldığında elde edilmiştir (Uzbaş & Aydın, 2018).



Şekil 20: MS_W0.30 Karışım Serilerinin Basınç Dayanımı Sonuçları

Yapılan bu deneyler ışığında elde edilen basınç dayanımı değerleri tüm karışımlar için karşılaştırmalı biçimde Şekil 21’ de gösterilmiştir. M_W0.55 serilerde nGP katkısının basınç dayanımına olumlu etki göstermediği görülmüştür. MS_W0.30 dayanımlı karışım serilerinde

%2,4 nGP katkısı ile, referans numunesine göre en düşük basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Bu seriler için optimum nGP kullanım oranı %0,6 ve %1,2 olarak belirlenmiştir. Bu serilerin haricinde olan; M_W0.40 içerikli karışımlarda %1,2 nGP katkısı, MS_W0.40 karışım serilerinde ise %0,6 nGP katkısı ile referans dayanımdan sonra en düşük basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Elde edilen bu verilere bakıldığında %2,4 nGP katkısı M_W0.40 ve MS_W0.40 serilerde optimum kullanım miktarı olarak belirlenmiştir.



Şekil 21: Numunelerin Ortalama Basınç Dayanımları

Yüksek miktarda katkı kullanımı M_W0.40 içerikli seriler için basınç dayanımına olumlu etki ederken M_W0.30 içerikli serilerde aynı etkiyi meydana getirmemiştir. Karışım türü değiştikçe ideal kullanım oranı da değişmektedir. Silis dumanı ve nano grafen, birlikte kullanıldığında, betonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırabilir. Ancak, her iki malzemenin optimum oranlarda kullanılması gereklidir. Kullanılan nGP katkı miktarı arttırıldığında karışım suyu içerisinde manyetik karıştırıcı yardımıyla homojen karışım eldesi sağlanmaya çalışılsa da matris içinde partiküllerin etkili dağılamaması dayanımda azalışa sebep olabileceği görüşüne ulaşılabilir. 90 gün sonunda farklı dayanım sınıflarına ait üretilen 50x50x50mm boyutlarındaki numunelerin ortalama referans numuneye kıyasla basınç dayanımı değişim oranları Tablo 6 'da verilmiştir. En yüksek değişim MS_W0.40 içeriğinin %2,4 oranında %114,48 olarak elde edilirken, en düşük değişim ise M_W0.55 serisinin %2,4 nGP içerikli karışımında %78,58 olarak belirlenmiştir.

Tablo 6: Referansa Göre Basınç Dayanımlarının Yüzdece Değişimi

nGP (%)	M-W0.55 (%)	M-W0.40 (%)	M-W0.30 (%)	MS-W0.40 (%)	MS-W0.30 (%)
0	100	100	100	100	100
0,3	94,21	107,94	98,14	106,77	107,97
0,6	97,52	108,52	105,25	104,05	105,69
1,2	95,21	107,04	102,84	105,14	109,14
2,4	78,58	109,27	92,92	114,48	95,82

3.3. YOĞUNLUK VE SU EMME

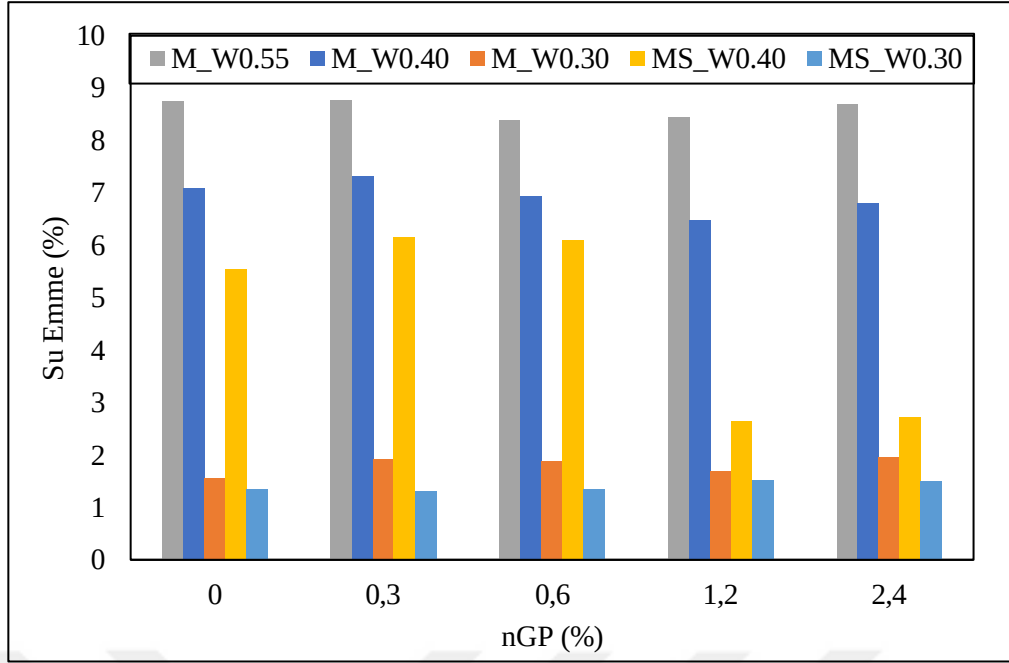
50x50x50mm boyutlarında üretilen numuneler su emme deneyine tabi tutulmuştur. nGP katkı ve nGP katkısız seriler için elde edilen sonuçlar Tablo 7’ de gösterilmiştir.

Tablo 7: Numunelerin Su Emme Deneyi Sonuçları

Karışım Sınıfı	Su Emme (%)	Görünür Porozite (%)	Yoğunluk (gr/dm ³)
M-W0.55-N0	8,75	18,08	2,06
M-W0.55-N0.3	8,77	18,19	2,07
M-W0.55-N0.6	8,38	17,59	2,09
M-W0.55-N1.2	8,44	17,67	2,09
M-W0.55-N2.4	8,69	18,06	2,08
M-W0.40-N0	7,09	15,14	2,13
M-W0.40-N0.3	7,32	15,37	2,1
M-W0.40-N0.6	6,93	14,87	2,14
M-W0.40-N1.2	6,48	14,02	2,17
M-W0.40-N2.4	6,8	14,68	2,16
MS-W0.40-N0	1,56	3,5	2,24
MS-W0.40-N0.3	1,92	4,26	2,24
MS-W0.40-N0.6	1,88	4,22	2,25
MS-W0.40-N1.2	1,69	3,8	2,25
MS-W0.40-N2.4	1,96	4,41	2,26
M-W0.30-N0	5,55	12,27	2,21
M-W0.30-N0.3	6,19	13,35	2,17
M-W0.30-N0.6	6,1	13,31	2,18
M-W0.30-N1.2	2,64	5,92	2,24
M-W0.30-N2.4	2,71	5,1	2,26
MS-W0.30-N0	1,34	3,04	2,26
MS-W0.30-N0.3	1,31	2,96	2,26
MS-W0.30-N0.6	1,34	3,04	2,27
MS-W0.30-N1.2	1,51	3,42	2,27
MS-W0.30-N2.4	1,49	3,37	2,26

*M: Harç, MS: Silisli harç, W: su/çimento, N: Nano grafen plaka

Beton karışımlarında su emme, yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişki, betonun genel özelliklerini etkileyen parametrelerdir. Yapılan su emme deneyi sonucunda; M_W0.55_N0.6 içerikli karışım serileri içerisinde %0,6 nGP katkılı karışımlarda, en düşük su emme değeri %8,38 olarak bulunmuştur. Şekil 22’de deneye ait sonuçlar gösterilmiştir. Su emme değerine paralel olarak, porozite değeri %17,59 olarak bulunan serinin %0,6 nGP katkılı seri olduğu görülmüştür. Su emme ve porozite arasında ilişkinin doğrusal olduğu, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirleyen temel faktörlerden olduğu bilinmektedir. %0,6 nGP katkılı seride yoğunluk değeri $2,09 \text{ gr/dm}^3$ olup seri içerisindeki en yüksek değerdir. Betonun yoğunluğu, içindeki agregaların, çimentonun ve suyun toplam miktarına bağlıdır. Genel olarak, daha yoğun betonlar, daha fazla çimento ve agrega içerir ve daha yüksek basınç dayanımı gösterir. Bu karışım serileri içinde referans numunesi harici, en yüksek basınç dayanımı değeri yoğunluğunda yüksek olduğu %0,6 nGP katkılı seri ile elde edilmiştir. 0,40 s/b serilerinde ise M_W0.40_N1.2 içerikli karışımlarda, en düşük su emme değeri %6,48 olarak bulunmuştur. %14,02 olarak bulunan minimum porozite değeri %1,2 nGP katkılı seri olduğu görülmüştür. Yoğunluk değeri $2,17 \text{ gr/dm}^3$ olup seri içerisindeki en yüksek değerdir. Bu karışım serileri içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri yoğunluğunda yüksek olduğu ($2,16 \text{ gr/dm}^3$) %2,4 nGP katkılı seridir. 0.30 s/b içerikli serilerde ise; %1,2 nGP katkılı karışımlarda, en düşük su emme değeri %2,64 olarak bulunmuştur. Porozite değeri %5,10 olarak bulunan, %2,4 nGP katkı içerdği görülmüştür. %2,4 nGP katkılı seride yoğunluk değeri $2,26 \text{ gr/dm}^3$ olup seri içerisindeki en yüksek değerdir. Bu karışım serileri içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri %0,6 nGP katkılı seri ile elde edilmiştir. MS_W0.40 içeriğinde en düşük su emme değeri katkısız seride %1,56 olarak bulunmuştur. Su emme değeri doğrultusunda, porozite değeri %3,5 olarak bulunan serisinde yine katkısız seri olduğu gözlemlenmiştir. %2,4 nGP katkılı seride yoğunluk değeri $2,26 \text{ gr/dm}^3$ olup seri içerisindeki en yüksek değerdir. Bu karışım serileri içerisinde maksimum basınç dayanımı değeri %2,4 nGP katkılı seride bulunmuştur. MS_W0.30 serisinde ise; %0,3 nGP katkılı karışımlarda, en düşük su emme değeri %1,31 olarak bulunmuştur. Porozite değeri %2,96 olarak bulunan serinine yine %0,3 nGP katkı içerdği görülmüştür. %0,6 ve %1,2 nGP katkılı seride yoğunluk değeri $2,27 \text{ gr/dm}^3$ olup seri içerisindeki en yüksek değerdir. Yoğunluk arttıkça betonun dayanımı genellikle artar, ancak bu da su miktarına ve agregaların özelliklerine bağlıdır. Bu karışım serileri içerisinde en yüksek basınç dayanımı değeri %1,2 nGP katkılı seri ile elde edilmiştir.



Şekil 22: Su Emme Sonuçlarının Bütün Karışımlar İçin Kıyaslanması

Genel olarak su emme oranları incelendiğinde karışımların kendi içerisindeki nGP oranlarının artmasıyla su emme oranlarında kayda değer değişiklikler ölçülememiştir. Eklenen nGP'nin tane boyutunun nano büyüklüklerde olması, nano boyutlardaki boşlukların dolmasında etken olduğundan, Arşimet prensibi kullanılarak yapılan bu ölçümde kayda değer farklılıklar gözlemlenmemiştir. Buna karşın, dayanım parametresinin değiştirilmesiyle elde birlikte su emme oranlarında da kayda değer farklılıklar belirlenmiştir. Özellikle M_W0.30 ve MS_W0.30 serilerinde, düşük su/çimento oranından kaynaklı boşluk miktarlarının da azaldığı görülmektedir. Yüksek su emme betonun gözenekli yapısını arttırırken dayanımın düşmesine neden olabilir. Betonun su emme kapasitesinin sınırlandırılması ve porozitesinin azaltılması, betonun dayanıklılığını arttırmak için kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, su/çimento oranı, kütleme koşulları ve kullanılan agregaların özellikleri gibi faktörler dikkatlice seçilerek betonun su emme ve porozite özellikleri optimize edilmelidir.

3.4. KILCAL SU EMME

ASTM C 1585 standardı esas alınarak gerçekleştirilen kılcal su emme deneyi sonuçlarına uygulanan lineer regresyon ile elde edilen kılcallık katsayıları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8: Numunelerin Lineer Regresyon ile Elde Edilen Kılcallık Katsayıları

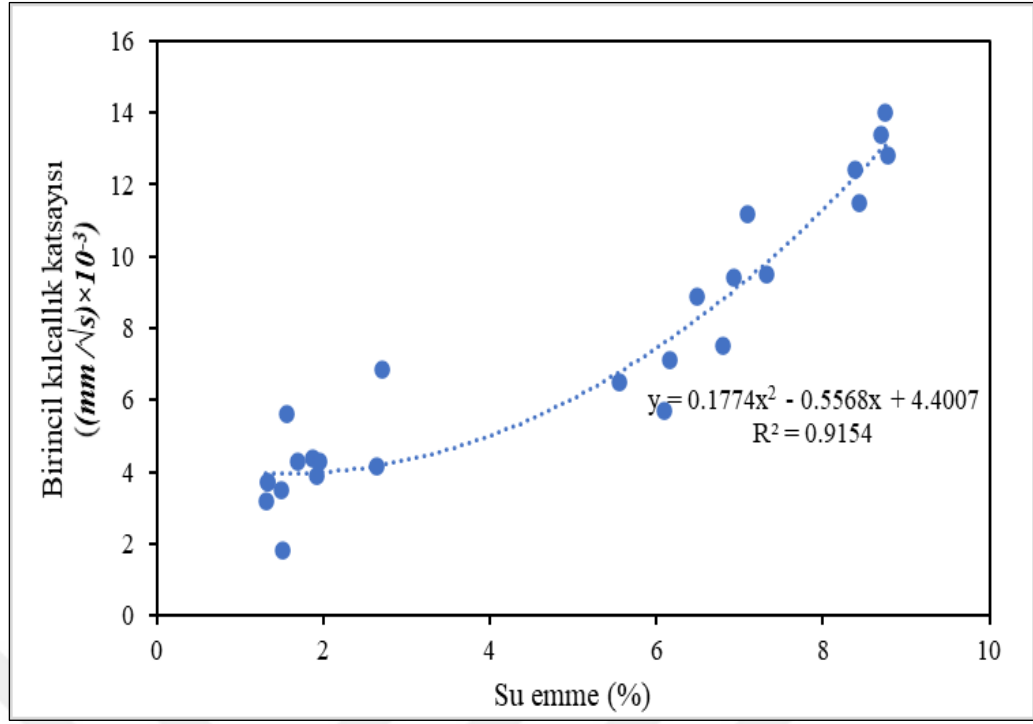
Karışım Sınıfı	Birincil Kılcallık Katsayısı (mm / $\sqrt{s}$) $\times 10^{-3}$	İkincil Kılcallık Katsayısı (mm / $\sqrt{s}$) $\times 10^{-3}$
M_W0.55_N0	14,00	5,60
M_W0.55_N0.3	12,80	4,35
M_W0.55_N0.6	12,40	3,70
M_W0.55_N1.2	11,50	3,50
M_W0.55_N2.4	13,40	3,80
M_W0.40_N0	11,20	3,20
M_W0.40_N0.3	9,50	2,80
M_W0.40_N0.6	9,40	2,80
M_W0.40_N1.2	8,90	1,90
M_W0.40_N2.4	7,50	1,00
MS_W0.40_N0	5,60	0,50
MS_W0.40_N0.3	3,90	0,45
MS_W0.40_N0.6	4,40	0,30
MS_W0.40_N1.2	4,30	0,30
MS_W0.40_N2.4	4,30	0,20
M_W0.30_N0	6,50	0,90
M_W0.30_N0.3	7,10	1,10
M_W0.30_N0.6	5,70	0,93
M_W0.30_N1.2	4,15	1,20
M_W0.30_N2.4	8,90	1,50
MS_W0.30_N0	3,70	0,40
MS_W0.30_N0.3	3,20	0,30
MS_W0.30_N0.6	3,70	0,35
MS_W0.30_N1.2	1,80	0,30
MS_W0.30_N2.4	3,50	0,20

Tablo 8'deki verilere bakıldığında; birincil kılcallık katsayıları genel olarak en yüksek serilere s/b oranı 0,55 olan karışımlarda, ikincil kılcallık katsayıları incelendiğinde ise yine en yüksek katsayılara s/b oranı 0,55 olan serilerde erişilmiştir. En yüksek birincil kılcallık katsayısına 0,55 s/b içerikli serilerin nGP içermeyen referans karışımında %14,00 olarak ölçülmüştür. En düşük birincil kılcallık katsayısına ise MS_W0.30_N1.2 serisinde 1.80 olarak belirlenmiştir. En yüksek ikincil kılcallık katsayısına ise yine 0,55 s/b içerikli serilerin nGP içermeyen referans karışımında 5,60 olarak ölçülmüştür. En düşük ikincil kılcallık katsayısına ise MS_W0.30_N2.4 karışımında 0,20 olarak ölçülmüştür. Dayanımın artmasıyla birlikte her

iki katsayı da azalmıştır. İkincil kılcallık katsayılarının en düşüğünün belirlendiği seride (MS_W0.30) karışımlardaki farklı nGP oranlarında kayda değer değişiklikler ölçülememiştir. Kılcal su emme, beton ve harç gibi yapı malzemelerindeki boşluklar ve kapiler sistemler aracılığıyla suyun emilme hızını ve miktarını ölçer. Bu özellikler, malzemelerin dayanıklılığı, geçirgenliği ve uzun vadeli performansı açısından kritik öneme sahiptir. Birincil kılcallık katsayısı, malzeme içindeki boşlukların ve kapiler yapının başlangıçtaki su emme hızını temsil eder. Bu çalışmada, birincil kılcallık katsayısının $1,80-14,00 \text{ (mm/}\sqrt{\text{s}}\text{)} \times 10^{-3}$ aralığında ölçülmesi, nano grafen katkısının kapiler emme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Daha düşük değerler, daha yoğun ve kompakt bir mikro yapının geliştiğine işaret eder. İkincil kılcallık katsayısı ise doymuş haldeki su emme hızını yansıtır. $0,20 - 5,60 \text{ (mm/}\sqrt{\text{s}}\text{)} \times 10^{-3}$ aralığındaki değerler, farklı karışım tasarımlarıyla harç içindeki kapiler yapının kontrol edilebildiğini ortaya koyar. Daha düşük değerler, malzeme içindeki boşlukların ve geçirgenliğin azaldığını, yani daha az su emildiğini gösterir.

Dayanım sınıflarına göre değerlendirme yapıldığında, 0,55 s/b içerikli karışımların daha yüksek su emme katsayılarına sahip olması, daha yoğun ve kompakt bir mikro yapının önemini vurgulamaktadır. 0,40 ve 0,30 s/b oranlarında ise daha düşük su emme, bu karışımların daha düşük geçirgenlikli ve daha uzun ömürlü olabileceğini gösterir. Dayanım artışı, daha az boşluklu ve daha sıkı bir yapı oluşumunu sağlar. MS içerikli karışımlarda su emme katsayılarını düşürmesi ise, nano grafen ile birlikte gerçekleşen pozolanik reaksiyonlar sonucu oluşan yoğun ve az geçirgen bir mikroyapının geliştiğini kanıtlar. Bu, yüksek performanslı ve daha dayanıklı harç/beton tasarımları için kritik bir avantaj sağlar. Sonuç olarak, harç ve beton karışımlarında nano malzeme teknolojisindeki gelişmeler, özellikle nano grafen ve silis dumanı kullanımı, daha yüksek dayanım, daha düşük geçirgenlik ve daha uzun ömürlü ürünler elde edilmesine olanak tanır.

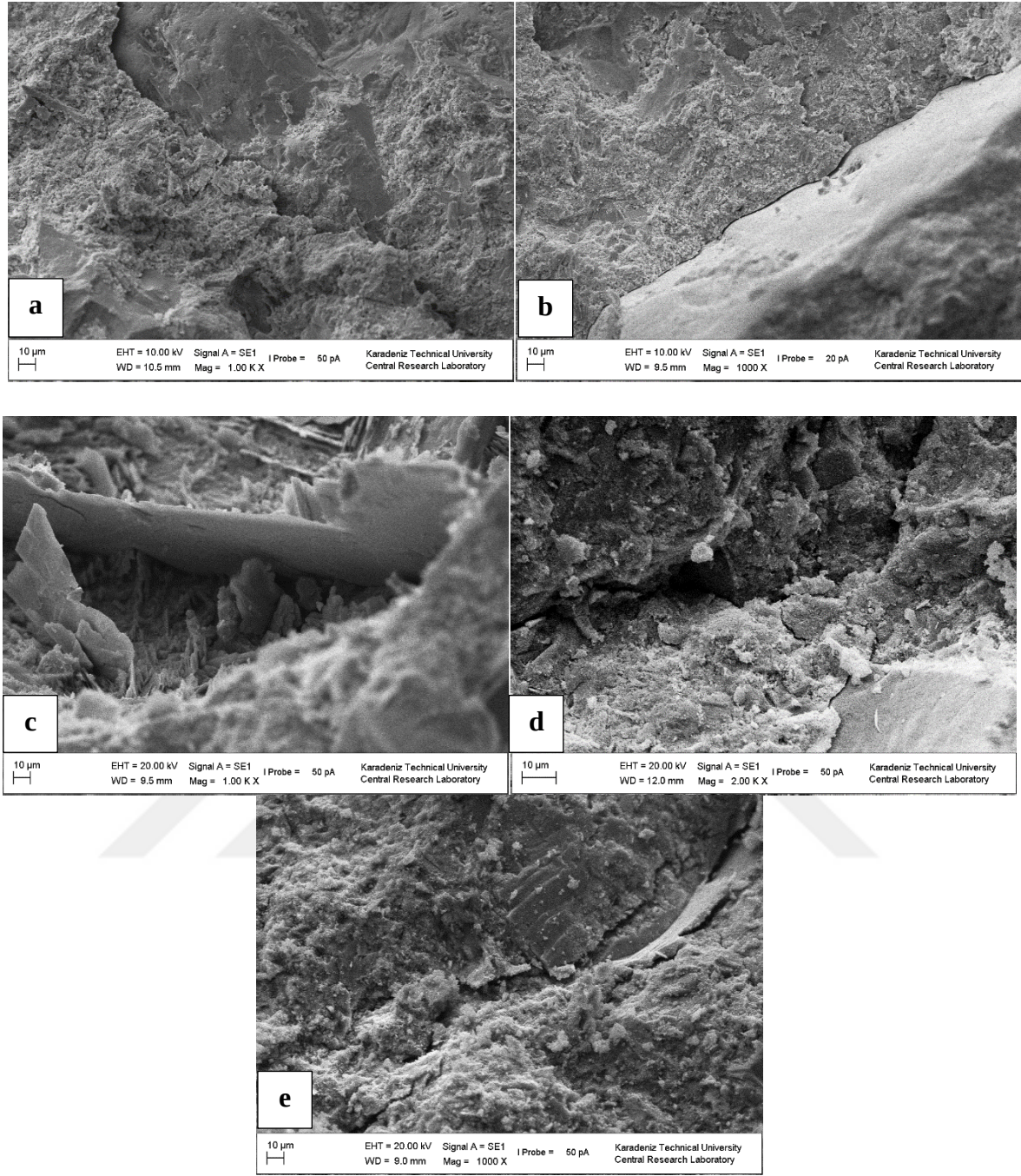
Şekil 23'de numunelerin su emme ile kılcal su emme değerleri arasındaki ilişki gösterilmiştir. Veriler pozitif doğrusal bir eğilim oluşturmaktadır. Buna göre, su emme yüzdesi arttıkça, kılcal su emme de genellikle artmıştır. Güçlü pozitif korelasyon ve yüksek R^2 değeri, bu iki özellik arasında güvenilir bir doğrusal ilişki olduğunu göstermektedir.



Şekil 23: Su Emme ve Kılcallık Katsayısı Arasındaki İlişki

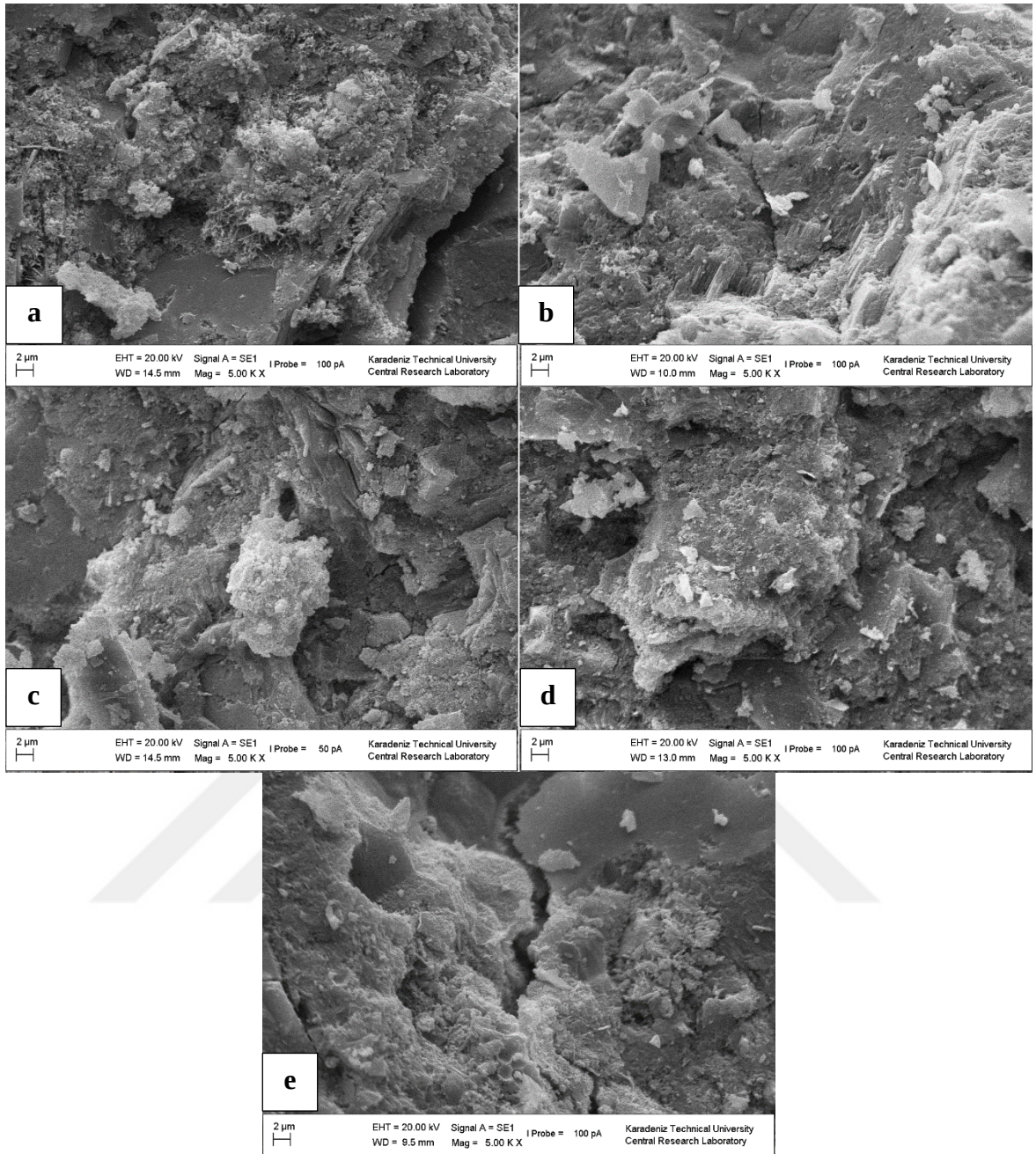
3.5. MİKROYAPISAL ANALİZ

Şekil 24’de numunelerden su/bağlayıcı oranı 0.55 olan karışımlar için 90 gün kür sonucunda alınan parçalar üzerinde çekilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri tüm numuneler için incelendiğinde nano grafenlerin bu teknoloji ile incelenmesi mümkün değildir. Fakat inceleme metodu daha çok genel mikroyapı, boşluklar ve çimento hidratasyon ürünleri görülebilmekte ve mikro yapıdaki bozulmalar boşluk durumu vb. durumlarla ilgili bilgi sahibi olunabilmektedir.



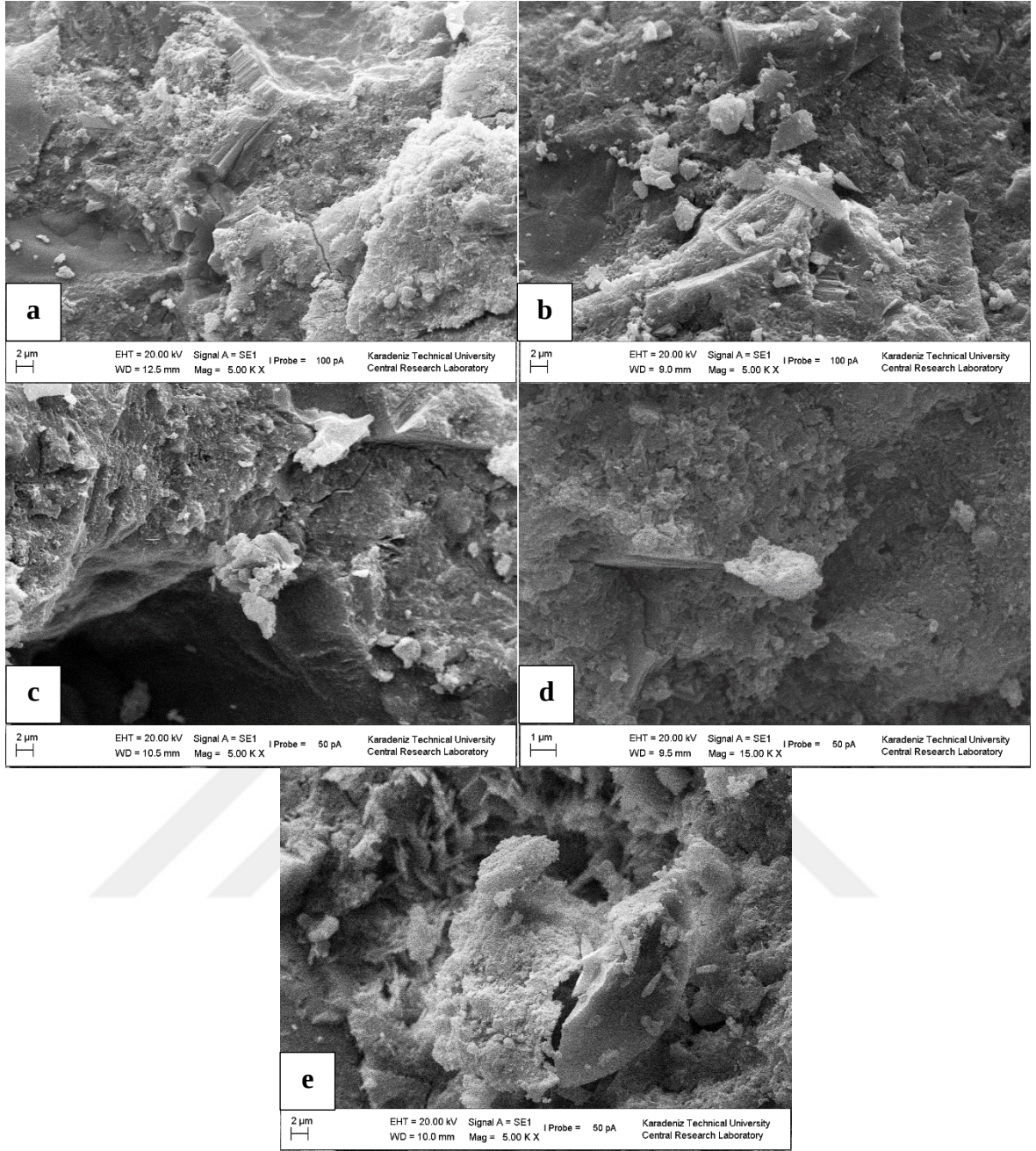
Şekil 24: SEM Görüntüleri a)M_0.55W_N0 b)M_0.55W_N0.3 c)M_0.55W_N0.6 d)M_0.55W_N1.2 e)M_0.55W_N2.4

Şekil 25 incelendiğinde düşük nano oranlarında (N0 ve N0.3) daha kompakt bir yapı olduğu, nano miktarının artmasıyla birlikte mikro yapının farklılaşmaya başladığı ve homojen dağılımını kaybettiği görülmektedir. Homojen şekilde dağılamayan nGP tanelerinin mikroyapı içerisindeki homojen dağılımı olumsuz etkilemesiyle birlikte mekanik performanslarda azalmaların gözlemlenmesi, su emme ve kapiler su emme verilerinin de olumsuz etkilenmesiyle örtüşmüştür.



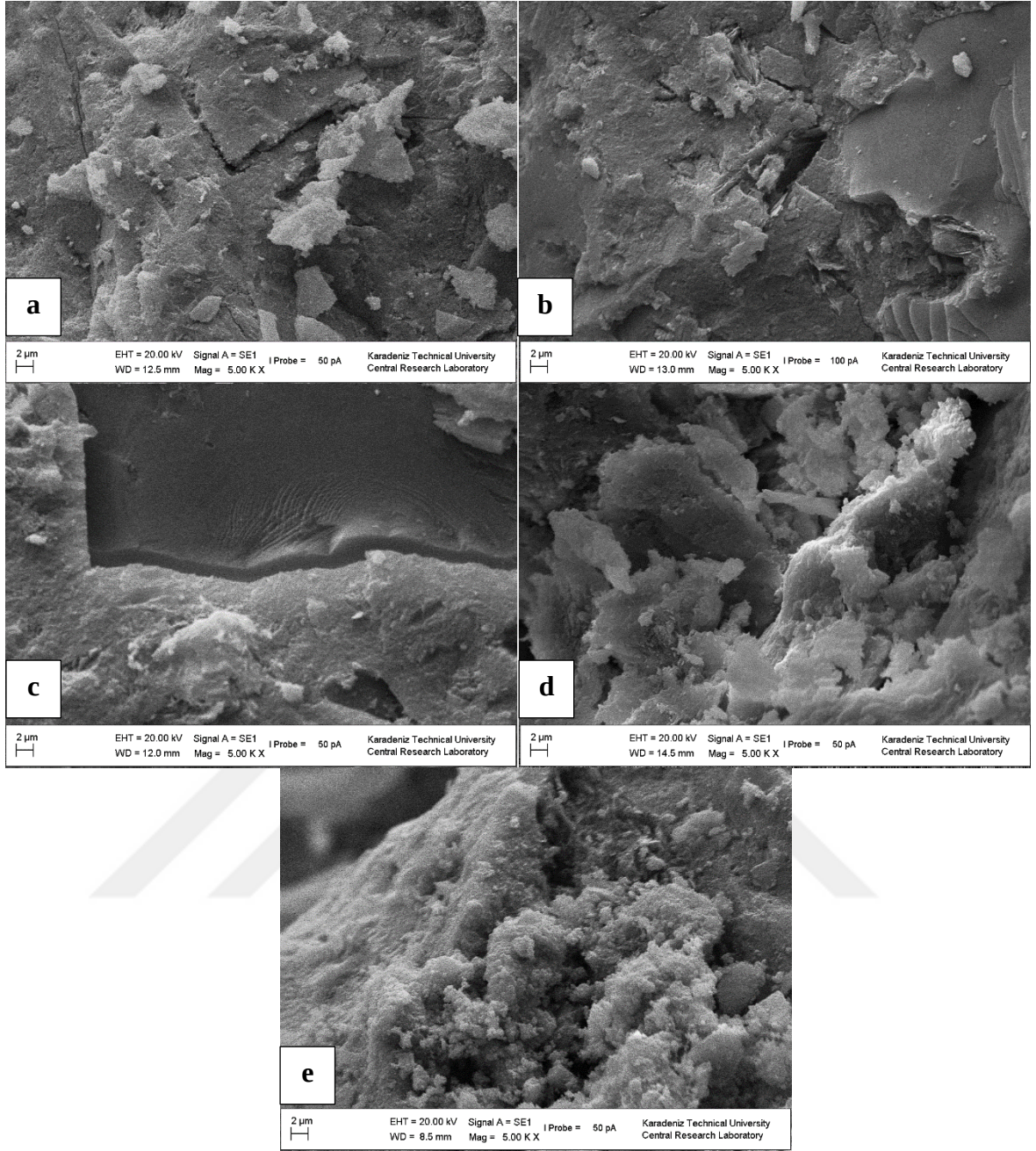
Şekil 25: SEM Görüntüleri a)M_0.40W_N0 b)M_0.40W_N0.3 c)M_0.40W_N0.6 d)M_0.40W_N1.2 e)M_0.40W_N2.4

Şekil 26’da 0,40 su/bağlayıcı oranlı karışımlara ait numunelerin 90 gün sonrasında çekilmiş olan taramalı elektron mikroskop görüntüleri verilmiştir. Görseller incelendiğinde, mikroyapı içerisinde nGP ilavesiyle birlikte anlamlı bir farklılık oluşmadığı görülmektedir. İlave olarak eklenen nGP’nin mekanik performanslar ve su-emme performanslarında da anlamlı bir farklılık oluşturmadığı, az miktarda performansı iyileştirdiği belirlenmişti. Bu sonuçla örtüşür şekilde SEM görüntülerinde de anlamlı farklılıklar oluşmadığı gözlemlenmiştir.



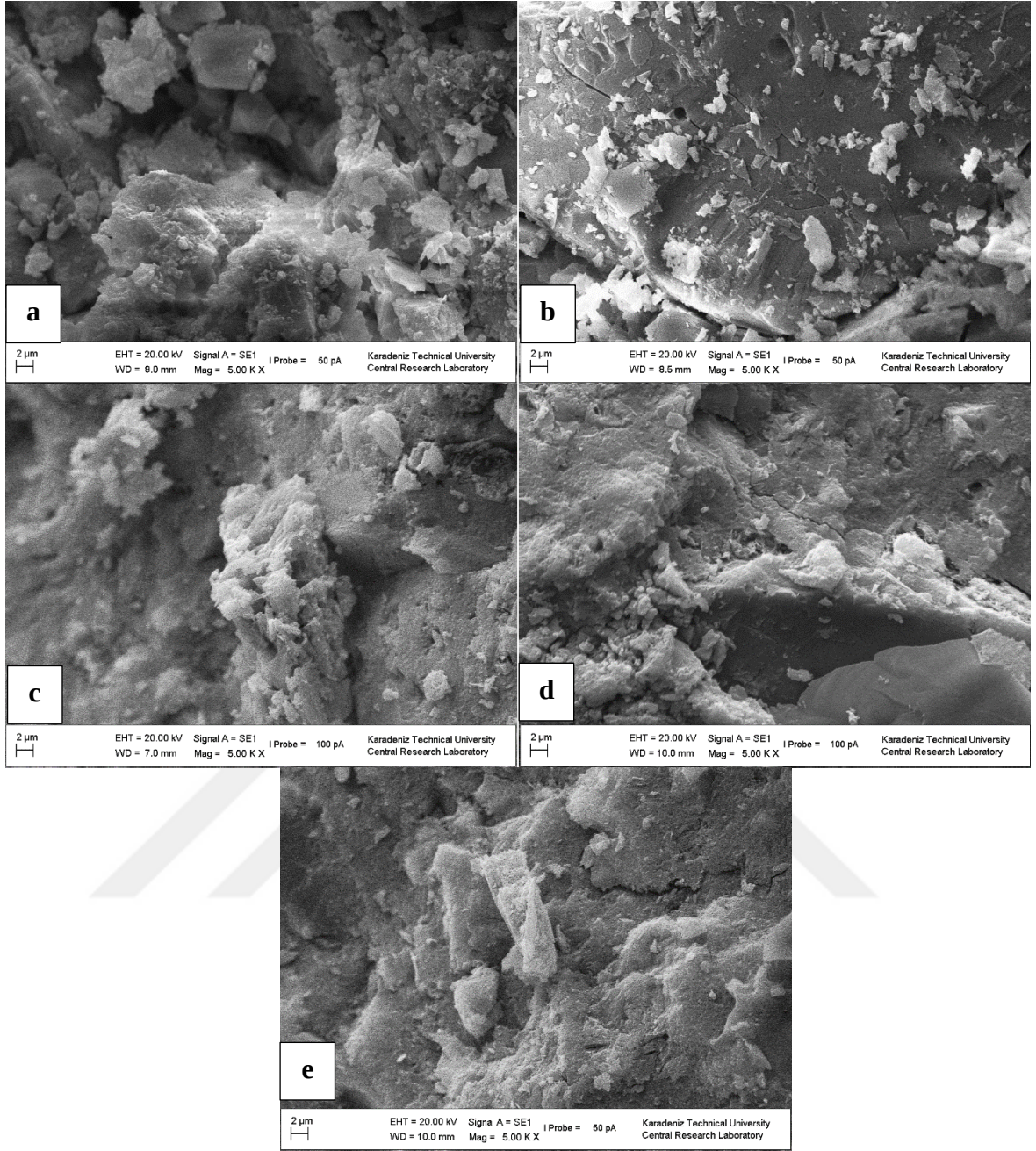
Şekil 26: SEM Görüntüleri a)M_0.30W_N0 b)M_0.30W_N0.3 c)M_0.30W_N0.6 d)M_0.30W_N1.2 e)M_0.30W_N2.4

Şekil 27’de 0,30 su/bağlayıcı oranına ait karışımlar için 90 gün sonrasında çekilmiş olan elektron mikroskop görüntüleri sunulmuştur. Mekanik performanslarda nGP oranının %1,2 oranına kadar iyileştiği, %2,4 oranında ise mekanik performanslarda kayıp olduğu belirlenmişti. SEM görüntülerinde de anlaşılaacağı üzere Şekil 26a, 26b, 26c ve 26d görsellerinde homojen bir yapının olduğu, Şekil 26d görselinde ise bu homojenitenin kaybolduğu, etrenjit-CaOH, CSH ve boşlukların olduğu görülmektedir. Fazla miktarda eklenmiş olan nGP’nin homojenliği olumsuz yönde etkidiği, mekanik performansları olumsuz etkileyebileceği daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir (Arslan vd., 2022; Wang vd., 2019).



Şekil 27: SEM Görüntüleri a)MS_0.40W_N0 b)MS_0.40W_N0.3 c)MS_0.40W_N0.6 d)MS_0.40W_N1.2 e)MS_0.40W_N2.4

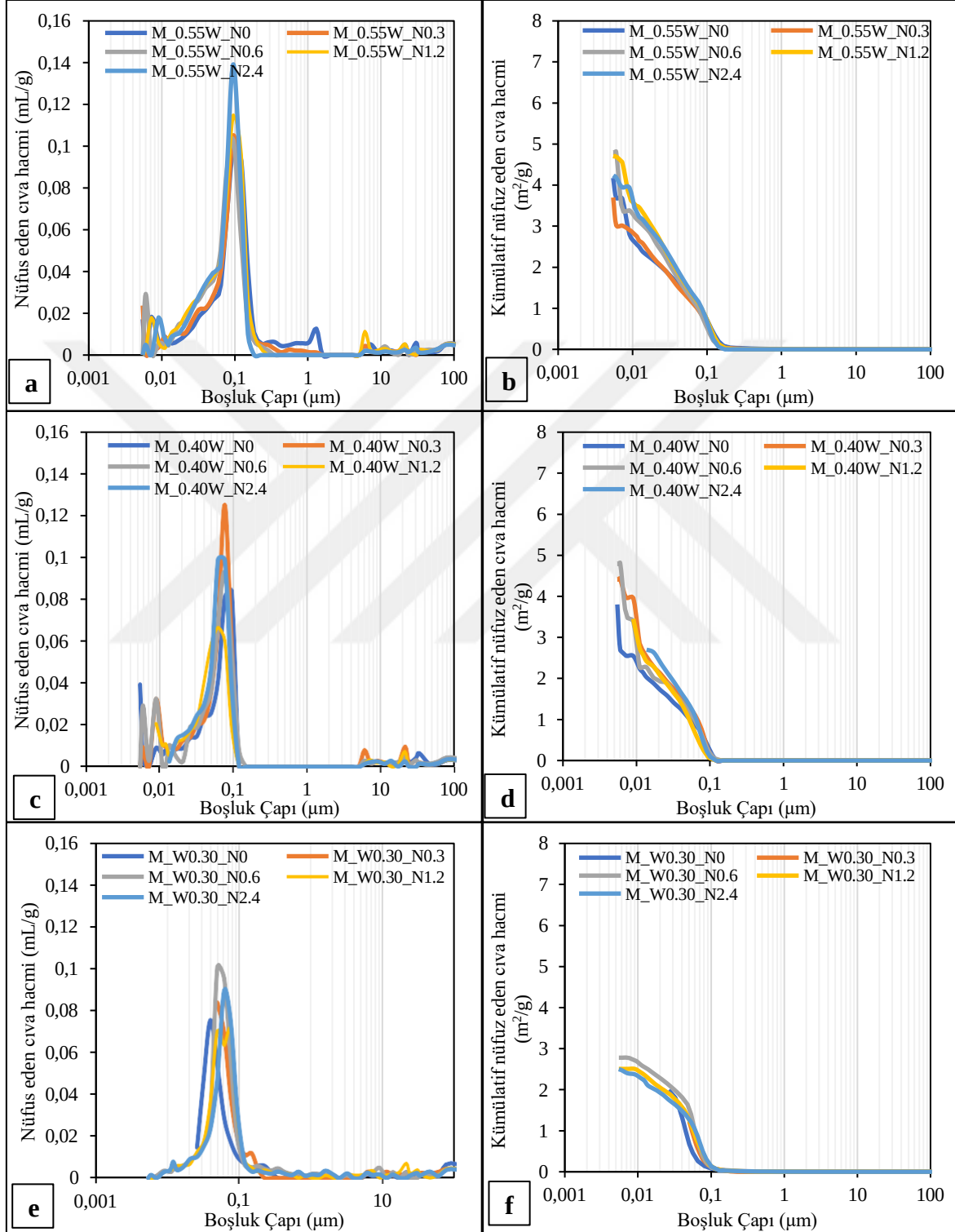
Şekil 27 ve Şekil 28’de sırasıyla su/bağlayıcı oranı 0,30 ve 0,40 olan silis dumanı ve kuvars kumu içerikli karışımlarının taramalı elektron mikroskobu ile çekilmiş olan mikro yapı görüntüleri sunulmuştur. Her iki karışım türünde de nGP oranının artmasıyla birlikte matris-agrega ara yüzlerinde iyileşmeler olduğu mekanik performanslara olumlu etki olarak dönüt sağladığı gözlemlenmiştir.

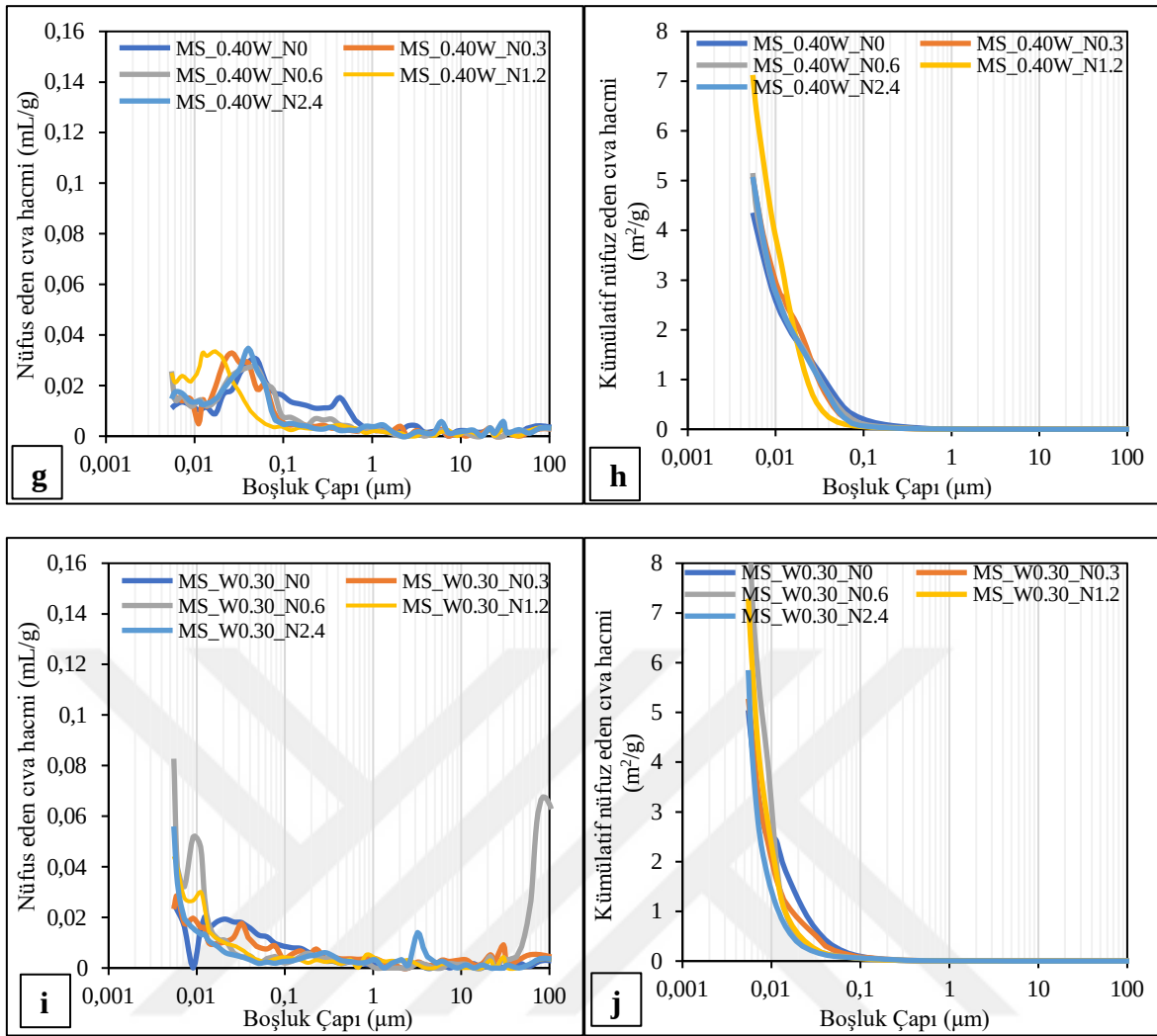


Şekil 28: SEM Görüntüleri a)MS_0.30W_N0 b)MS_0.30W_N0.3 c)MS_0.30W_N0.6 d)MS_0.30W_N1.2 e)MS_0.30W_N2.4

3.6. BOŞLUK YAPISI

Şekil 29’da her bir gözenek boyutu aralığına giren cıva hacminin ve harçlara giren birikmiş cıva hacminin sonuçları gösterilmektedir.





Şekil 29: Tüm Karışımlar İçin Cıva Porozimetre Test Sonuçları

Karışımlara göre boşluk çapları incelendiğinde, azalan su/çimento oranıyla birlikte boşluk çaplarının da azaldığı, daha kompakt bir yapı olduğu, su emme-porozite, basınç dayanımı gibi sonuçlarla da örtüştüğü görülmektedir. En yüksek boşluk miktarına 0.55s/b oranında, en düşük boşluk çaplarına ise 0.30s/b oranının silis dumanı ve kuvars kumu içerikli MS serilerinde erişildiği belirlenmiştir.

Şekil 29a-f’de gösterildiği üzere 0,55 s/b oranından 0,30 s/b oranına doğru ilerledikçe tekil boşluk miktarları ve toplam boşluk miktarlarında azalmalar olduğu görülebilmektedir. Beklenildiği üzere artan mekanik performanslarla ve azalan su miktarıyla birlikte matris içerisindeki boşluk miktarları azalmıştır. Şekil 29g ve Şekil 29i incelendiğinde Şekil 29c ve Şekil 28e’ye kıyasla tekil boşluk miktarlarında bariz bir azalma olduğu açıktır. Fakat Şekil 29h ve Şekil 29j’ye göre toplam boşluk miktarlarının arttığı açıkça görülebilmektedir. Özellikle nano malzeme miktarı %0,6 , %1,2 ve %2,4 oranlarında bu artış daha belirgin hale gelmiştir. Eklenen silis ve kuvars kumu ile birlikte benzer miktarda büyük kapiler gözenek, daha fazla

miktarda orta kapiler gözenek ve daha az miktarda küçük jel gözenekleri oluşmuştur. Azalan küçük jel gözenekleriyle birlikte matris içerisine eklenen silis dumanının reaksiyonlara destek olması ve hamurdaki C-S-H miktarının artırmasıyla jel boşluklarının azalmasını ilişkilendirilebilir (Fraga vd., 2025). Dolayısıyla silis dumanı ve nano malzemelerin kullanımı hamurların toplam gözeneklerinde farklılıklar oluşturabilir ve bunun neticesinde literatürle örtüşen şekilde mekanik performansları artırabilmiştir (Liu vd., 2023; Pinheiro vd., 2023; Xu vd., 2023).



SONUÇ, TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Sonuç

Bu çalışmada, nano grafen plaka (nGP) katkısının 0,55, 0,40 ve 0,30 su/bağlayıcı oranlarına sahip harçlar üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- 0,55 Su/Bağlayıcı Oranı: Bu oranla hazırlanan harçlarda nGP katkısının basınç dayanımına olumlu bir etkisi gözlemlenmemiştir. Özellikle %2,4 oranında nGP katkısı, mekanik dayanımı önemli ölçüde düşürmüştür. Mikro yapı analizleri, bu oran için nGP'nin matris içinde düzensiz dağıldığını ve boşluk oluşumuna neden olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, düşük dayanımlı harçlarda nGP katkısının kullanımı önerilmemektedir.

- 0,40 Su/Bağlayıcı Oranı: Orta dayanımlı harçlarda nGP katkısının olumlu etkileri daha belirgin hale gelmiştir. %0,6 ve %1,2 oranlarında nGP katkısı, basınç dayanımını artırmış ve mekanik performansı iyileştirmiştir. Ancak, %2,4 nGP katkılı karışımlarda, mekanik performansta belirgin bir artış gözlemlenememiştir. Su emme ve kılcal su emme deneyleri, bu oranlarda nGP kullanımının harç geçirimsizliğini artırdığını göstermiştir. Bu nedenle, 0,40 su/bağlayıcı oranına sahip harçlar için %0,6 ve %1,2 nGP kullanımının en uygun katkı miktarı olduğu belirlenmiştir.

- 0,30 Su/Bağlayıcı Oranı: Yüksek dayanımlı harçlarda, %0,6 oranındaki nGP katkısının en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak, %2,4 nGP oranında dayanım kaybı meydana gelmiştir. Mikroyapısal analizlerde, yüksek miktarda nGP'nin çimento matrisinde topaklanmaya neden olduğu ve mekanik zayıflıklara yol açtığı tespit edilmiştir. Yüksek dayanımlı serilerde, nGP katkısının homojen dağılmasının kritik öneme sahip olduğu ve yüksek oranlarda kullanımının mikro yapı üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği gözlemlenmiştir.

Tartışma

nGP katkısının harç performansı üzerindeki etkisi, kullanılan su/bağlayıcı oranına bağlı olarak değişmektedir. 0,40 ve 0,30 su/bağlayıcı oranlarında belirli miktarlarda nGP katkısı dayanımı artırırken, 0,55 oranında herhangi bir olumlu etki gözlemlenmemiştir. Optimum kullanım miktarı 0,40 oranında %0,6 -%1,2, 0,30 oranında ise %0,6 olarak belirlenmiştir.

Öneriler

Bu çalışma, nano malzemelerin çimento esaslı yapı malzemelerinde verimli kullanımına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, nGP'nin daha homojen dağılması için farklı dispersiyon tekniklerinin uygulanmasını araştırarak, malzeme performansını daha da iyileştirmeye odaklanabilir.



KAYNAKÇA

- Alemayehu, E., & Lennartz, B. (2009). Virgin volcanic rocks: Kinetics and equilibrium studies for the adsorption of cadmium from water. *Journal of Hazardous Materials*, 169(1–3), 395–401. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.109>
- Anwar, I. I. (2010). *Katkıların beton performansına etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 269780)
- Arslan, S., Öksüzer, N., & Gökçe, H. S. (2022). Improvement of mechanical and transport properties of reactive powder concrete using graphene nanoplatelet and waste glass aggregate. *Construction and Building Materials*, 318, 126199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126199>
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K. T., Aydan, S., Yardımcı, M. Y., Topal, A., & Öztürk, A. U. (2012). *Beton*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.
- Bertolini, C., Crivellaro, A., Marciniak, M., Marzi, T., ve Socha, M. 2010, Nanostructured Materials For Durability And Restoration Of Wooden Surfaces In Architecture And Civil Engineering. World Conference On Timber Engineering (WCTE)Vol. 31.
- Birgisson, B., Mukhopadhyay, A. K., Geary, G., Khan, M., & Sobolev, K. (2012), *Nanotechnology in Concrete Materials*. Transportation Research Board.
- Bjegovic, D., Serdar, M., & Stirmer, N. (2018). Nanotechnology Applied To Create A New Generation Of Multifunctional Construction Materials. *Annual Of The Croatian Academy Of Engineering*, 21, 183–204.
- 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>
- Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., & Duan, W. H. (2014). Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 73, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>
- Dedeoğlu, R. Ş. (2010). *Akışkanlaştırıcı Katkı Maddelerinin Beton Üzerine Etkilerinin İncelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 274724)
- Demirtürk, D. (2017). *Yüksek performanslı betonların karışım tasarım yöntemlerine yönelik bir çalışma* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 472770)
- Erdoğan, Y. T. (2003). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.
- Ge, Z., Qin, J., Sun, R., Guan, Y., Zhang, H., & Wang, Z. (2021). The Effect of the Addition of Graphene Nanoplatelets on the Selected Properties of Cementitious Composites. *Frontiers in Built Environment*, 7. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.673346>

- Ghaffary, A., & Moustafa, M. A. (2020). Synthesis of Repair Materials and Methods for Reinforced Concrete and Prestressed Bridge Girders. *Materials*, 13(18), 4079.
- Gündoğdu, D. (2010). *Kolloid silikanın uçucu küllü harçların mekanik özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 292033)
- Guo, L., Wu, J., & Wang, H. (2020). Mechanical and perceptual characterization of ultra-high-performance cement-based composites with silane-treated graphene nano-platelets. *Construction and Building Materials*, 240, 117926.
- Jiang, Z., Sevim, O., & Ozbulut, O. E. (2021). Mechanical properties of graphene nanoplatelets-reinforced concrete prepared with different dispersion techniques. *Construction and Building Materials*, 303, 124472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124472>
- Jing, G., Ye, Z., Lu, X., & Hou, P. (2017). Effect of graphene nanoplatelets on hydration behaviour of Portland cement by thermal analysis. *Advances in Cement Research*, 29(2), 63–70. <https://doi.org/10.1680/jadcr.16.00087>
- Karakouzian, M., Farhangi, V., Farani, M. R., Joshaghani, A., Zadehmohamad, M., & Ahmadzadeh, M. (2021). Mechanical Characteristics of Cement Paste in the Presence of Carbon Nanotubes and Silica Oxide Nanoparticles: An Experimental Study. *Materials*, 14(6), 1347. <https://doi.org/10.3390/ma14061347>
- Kaya, H. (2010). *Yüksek fırın cürufu katkılı betonda su/çimento oranının etkinlik katsayısına ve kırılma parametrelerine etkisi* (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 293986)
- Kjaernsmo, H., Kakay, S., Fossa, K. T., & Gronli, J. (2018). The Effect of Graphene Oxide on Cement Mortar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 362, 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/362/1/012012>
- Krystek, M. (2019). Mechanical Properties of Cement Mortar with Graphene Oxide. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 12(1), 91–96. <https://doi.org/10.21307/acee-2019-008>
- Land, G., & Stephan, D. (2012). The influence of nano-silica on the hydration of ordinary Portland cement. *Journal of Materials Science*, 47(2), 1011–1017. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5881-1>
- Li, X., Liu, Y. M., Li, W. G., Li, C. Y., Sanjayan, J. G., Duan, W. H., & Li, Z. (2017). Effects of graphene oxide agglomerates on workability, hydration, microstructure and compressive strength of cement paste. *Construction and Building Materials*, 145, 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.058>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*.
- McGraw-Hill. Mohammed, A., Sanjayan, J. G., Duan, W. H., & Nazari, A. (2015). Incorporating graphene oxide in cement composites: A study of transport properties. *Construction and Building Materials*, 84, 341–347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.083>
- Mokhtar, M. M., Abo-El-Enein, S. A., Hassaan, M. Y., Morsy, M. S., & Khalil, M. H. (2017). Mechanical performance, pore structure and micro-structural characteristics of graphene oxide nano platelets reinforced cement. *Construction and Building Materials*, 138, 333–339.

- Nergiz V. (2007). *Yüksek dayanımlı betonlarda durabilite ve işlenebilirlik*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 201025)
- Nicoleau, L. (2011). Accelerated growth of calcium silicate hydrates: Experiments and simulations. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1339–1348. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.012>
- Norhasri, M. M., Hamidah, M. S. and Fadzil, A. M. (2017). Applications of using nano material in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 133, 91-97. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.005>
- Oganov, A. R., Hemley, R. J., Hazen, R. M., & Jones, A. P. (2013). Structure, Bonding, and Mineralogy of Carbon at Extreme Conditions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 75(1), 47–77. <https://doi.org/10.2138/rmg.2013.75.3>
- Özbora, A. A., Tarhan, M., & Engin, Y. (2013). Nanoteknolojinin Betonun Geleceğindeki Rolü. *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildirileri*.
- Paşa, O. (2018). *Uçucu kül ve silis dumanı katkılı yüksek dayanımlı betonların kalıcılık özellikleri*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 517763)
- Porro, A., Dolado, J. S., Campillo, I., Erkizia, E., de Miguel, Y., de Ibarra, Y. S., & Ayuela, A. (2005). Effect of Nanosilica Additions on Cement Pastes. In *Applications of Nanotechnology in Concrete Design* (pp. 87–96). Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/10.1680/aonid.34082.0009>
- Rehman, S., Ibrahim, Z., Memon, S., Javed, M., & Khushnood, R. (2017). A Sustainable Graphene Based Cement Composite. *Sustainability*, 9(7), 1229. <https://doi.org/10.3390/su9071229>
- Ruan, Y., Han, B., Yu, X., Zhang, W., & Wang, D. (2018). Carbon nanotubes reinforced reactive powder concrete. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 112, 371-382.
- Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
- Sharma, S., & Kothiyal, N. C. (2015). Influence of graphene oxide as dispersed phase in cement mortar matrix in defining the crystal patterns of cement hydrates and its effect on mechanical, microstructural and crystallization properties. *RSC Advances*, 5(65), 52642–52657. <https://doi.org/10.1039/C5RA08078A>
- Stankovich, S., Dikin, D. A., Piner, R. D., Kohlhaas, K. A., Kleinhammes, A., Jia, Y., Wu, Y., Nguyen, S. T., Ruoff, R. S. 2007. Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide. *Carbon*, 45 (7) : 1558-1565.
- Şahin, O. Z. (2019). *Nanoteknolojik ürünlerin giydirmce cephe sektörü bağlamında araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 559201)
- Taşdemir, C. (1996). Mikrofiller malzemelerin betonun mekanik özelliklerine etkisi. *4. Ulusal Beton Kongresi*, 175–187.

- Tekin, C., & Çetin, A. (2021). Nanoteknoloji ve nano mimari. *Politik ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 8(1), 47–54.
- Tepe, A. (2007). *Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 222310)
- Thomas, J. J., Jennings, H. M., & Chen, J. J. (2009). Influence of Nucleation Seeding on the Hydration Mechanisms of Tricalcium Silicate and Cement. *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(11), 4327–4334. <https://doi.org/10.1021/jp809811w>
- Topçu, İ. B., Canbaz, M., & Karakurt, C. (2006). Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 9(1), 59–63.
- Turan, O. (2011). Bir fırsat penceresi: inşaat sektöründe nanoteknoloji. *BETON Prefabrikasyon Dergisi*, 97.
- Turunç, S. (2019). *Nanoteknolojik yapı malzemelerinin Türk yapı sektöründe kullanımı*. (Yüksek lisans tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 613806)
- Uzbaş, B., & Aydın, A. C. (2018). Uçucu kül ve silis dumanlı betonların mekanik özelliklerinin xrd ile incelenmesi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 1- 22.
- Vasudevareddy, P., & Chandrasekhar Reddy, K. (2022). Effect of graphene oxide and nano silica on mechanical and durability properties of cement mortar. *Materials Today: Proceedings*, 60, 1042–1050. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.234>
- Vjayaraghavan, D. A. (2017). *How strong is graphene* <http://www.graphene.manchester.ac.uk/discover/video-gallery/what-is-graphene/how-strong-is-graphene>
- Wang, B., Jiang, R., & Wu, Z. (2016). Investigation of the Mechanical Properties and Microstructure of Graphene Nanoplatelet-Cement Composite. *Nanomaterials*, 6(11),200. <https://doi.org/10.3390/nano6110200>
- Wang, B., & Shuang, D. (2018). Effect of graphene nanoplatelets on the properties, pore structure and microstructure of cement composites. *Materials Express*, 8(5), 407–416. <https://doi.org/10.1166/mex.2018.1447>
- Wang, Y., Yang, J., & Ouyang, D. (2019). Effect of Graphene Oxide on Mechanical Properties of Cement Mortar and its Strengthening Mechanism. *Materials*, 12(22), 3753. <https://doi.org/10.3390/ma12223753>
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). Effect of nano-silica on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount. *Construction and Building Materials*, 65, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.063>
- Zeng, H., Qu, S., & Qin, Y. (2021). Microstructure and transport properties of cement-based material enhanced by graphene oxide. *Magazine of Concrete Research*, 73(19), 1011–1024. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00558>
- Zheng, Q., Han, B., Cui, X., Yu, X., & Ou, J. (2017). Graphene-engineered cementitious



ÖZ GEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimimi Trabzon’da tamamlamıştır. Erzurum Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi almıştır. Ardından Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü, Yapı Malzemeleri alanında Yüksek Lisans eğitime başlamıştır. Bu süreç içerisindeyken banka sınavlarına girmiştir. Hali hazırda İstanbul ilinde bir bankada aktif olarak çalışmaktadır.

