



**ATIK CAM TOZU AGREGASI KULLANILARAK
ÜRETİLEN REAKTİF PUDRA BETONLARIN FİZİKSEL
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE GRAFEN OKSİTİN
ETKİSİ**

Serdar ARSLAN

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı (Atatürk Üniversitesi ile
Ortak)**

**Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE
2021**

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞI (ATATÜRK
ÜNİVERSİTESİ İLE ORTAK)

**ATIK CAM TOZU AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN REAKTİF PUDRA
BETONLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE GRAFEN OKSİTİN
ETKİSİ**

(Effect of Graphene Oxide on Physical and Mechanical Properties of Reactive Powder
Concrete Produced by Using Waste Glass Powder Aggregate)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar ARSLAN

Danışman: Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE

Bayburt
Ocak, 2021

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE danışmanlığında, 182004010 numaralı Serdar ARSLAN tarafından hazırlanan “Atık Cam Tozu Agregası Kullanılarak Üretilen Reaktif Pudra Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Grafen Oksitin Etkisi” adlı bu çalışma 13.01.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile başarılı/başarısız kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Gürkan YILDIRIM

İmza:

Jüri Üyesi : Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Özer SEVİM

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

...../...../.....

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Atık Cam Tozu Agregası Kullanılarak Üretilen Reaktif Pudra Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Grafen Oksitin Etkisi” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

... / ... / 2021

İmza

Serdar ARSLAN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesi ve araştırılmasında, tecrübesi ve hoşgörüsü ile çalışmaya yön veren ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Doç. Dr. H. Süleyman GÖKÇE'ye sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazımında ve yapılan deneyler esnasında bilgi birikimini benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen saygı değer hocam Arş. Gör. Nurullah ÖKSÜZER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca laboratuvar çalışmalarında deney malzemesi desteği sunan Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. İlhami DEMİR'e ve çalışmalarında malzeme desteği sağlayan BASF Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş firmasına teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında bana destek olan ve beni yalnız bırakmayan anneme, babama ve tüm aileme, anlayışından ve desteğinden dolayı sevgili eşim Eda Melike ARSLAN'a ve son olarak bütün yorgunluğumu unutturan ve bana çalışma azmi veren sevgili oğlum Mete Alp ARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK CAM TOZU AGREGASI KULLANILARAK ÜRETİLEN REAKTİF PUDRA BETONLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE GRAFEN OKSİTİN ETKİSİ

Serdar ARSLAN

Ocak 2021, 66 Sayfa

Bu çalışmada, 3 nm kalınlığında nano grafen oksit (nGO) Reaktif Pudra Beton (RPB) üzerinde etkisi ve nGO katkılı atık cam tozunun RPB içerisinde agrega olarak kullanılması incelenmiştir. Çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde geleneksel RPB kompozit matrisinin yapısına kütlece %0,035, %0,07, %0,14, %0,21, %0,35 ve %0,70 oranında nano grafen oksit eklenerek RPB'nin gelişimi planlanmıştır. Diğer parametreler sabit tutulup numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, kılcal su emme, su emme, ultrases geçiş hızı, hızlı klorür geçirimsizliği ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Üretimde su/bağlayıcı oranı 0,16 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Hazırlanan numunelerde 50 MPa ön sıkıştırma ve 2 gün $90\pm5^{\circ}\text{C}$ etüv kürü uygulanmıştır. RPB'de çimento yerine kütlece %0,14 grafen oksitle güçlendirilmiş betonun, geleneksel Reaktif Pudra Betonla karşılaştırıldığında basınç mukavemetinde %24 artış, eğilme mukavemetinde %103 artış ve su geçirgenliğinde %80'lik bir azalma olduğunu göstermiştir. Büyük yüzey alanına sahip nGO'nun geleneksel RPB içerisinde sadece %0,14 oranında kullanılması ile birlikte betonun mekanik özellikleri üzerinde, özellikle eğilme dayanımının iyileştirilmesinde önemli etki sağladığı görülmüştür. Çalışmanın ikinci bölümünde ise RPB'de %0,14 nGO kullanılmasıyla karışımında optimum sonuçları veren RPB_{G0,14} karışımı referans numune olarak alınıp agrega yapısındaki kuvars kumu (KK) azaltılarak yerine kademeli olarak ağırlıkça %10, %20, %30, %40, %50 oranlarında atık cam tozu (ACT) kullanılmıştır. Yapılan deneylerde; %30 oranında ACT kullanılmasıyla basınç dayanımında %8, eğilme dayanımında %17 artış olduğunu ve su geçirgenliğinde ise %9 azalma olduğunu göstermiştir. ACT'nin RPB matrisinde kullanılabileceği ve %30 oranında ACT kullanılmasıyla dayanım-durabilite özelliklerinden kayıp vermeden çevreye duyarlı, daha ekonomik bir malzeme üretilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Reaktif pudra beton, nano grafen oksit, kuvars kumu, atık cam tozu.

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

EFFECT OF GRAPHENE OXIDE ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF REACTIVE POWDER CONCRETE PRODUCED BY USING WASTE GLASS POWDER AGGREGATE

Serdar ARSLAN

January 2021, 66 Pages

In this study, the effect of nano graphene oxide (nGO) with a thickness of 3 nm on reactive powder concrete (RPC) and the use of waste glass powder as aggregate in RPC, incorporating nGO have been examined. This study consists of two parts. In the first part of the study, the development of RPC has been investigated by adding nano graphene oxide to the structure of traditional RPC composite matrix at varying rates such as 0.035%, 0.07%, 0.14%, 0.21%, 0.35% and 0.70% by weight. By keeping other parameters constant, compressive and flexural strength, capillary water absorption, water absorption, ultrasound pulse velocity, rapid chloride ion permeability and abrasion tests were carried out on the samples. The water/binder ratio was kept constant at 0.16 throughout the process. A pre-compression of 50 MPa and 2 days of $90\pm 5^{\circ}\text{C}$ drying oven curing have been applied to the prepared samples. It indicated that concrete reinforced with 0.14% graphene oxide by weight of cement in RPC had a 24% increase in compressive strength, a 103% increase in flexural strength and an 80% decrease in water permeability, as compared to traditional reactive powder concrete. With the use of only 0.14% of nGO with a large surface area in traditional RPC, it was found to have a significant effect on the mechanical properties of concrete, especially in improving bending strength. Using 0.14% nGO in RPC, a mixture of RPCG0.14, which gave optimal results in its mixture, was taken as a reference sample and reducing the quartz sand (QS) in its aggregate structure, waste glass powder (WGP) was used instead gradually, at the rates of 10%, 20%, 30%, 40% and 50% by weight of quartz sand. With the use of 30% WGP in the experiments performed, it was found that there was an 8% increase in compressive strength, a 17% increase in flexural strength and a 9% decrease in water permeability. It has been observed that wGP can be used in RPB matrix, and with the use of 30% WGP, an environmentally friendly and more economical material can be manufactured without losing its strength and durability properties.

Key Words: Reactive powder concrete, nano graphene oxide, quartz sand, waste glass powder.

İÇİNDEKİLER

ETİK VE BİLDİRİM SAYFASI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZ	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xii

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş	1
-------------	---

İKİNCİ BÖLÜM

Kaynak Özetleri	3
Reaktif Pudra Betonu	3
Nano Grafen Oksit	7
Atık Cam Tozu	8

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem	10
Materyal	10
Kullanılan malzemeler ve özellikleri.	10
Çimento.	10
Silis dumanı.	10
Karma Suyu.	10
Agrega.	11
Çelik lifler.	12
Nano grafen oksit.	13
Hiperakışkanlaştırıcı.	14

Yöntem.....	15
Karışımın hazırlanması.	15
Elek analizi.	17
Karışım oranları.....	18
Numune boyutları ve şekilleri.	19
Ön sıkıştırma işlemi.	20
Isıl işlem programı.	21
Sertleşmiş beton deneyleri.	22
Üç noktalı eğilme deneyi.....	22
Basınç deneyi.....	23
Su emme deneyi.	24
Ultras ses Geçiş Hızı Deneyi.	25
Kılcal su emme deneyi.	26
Hızlı klorür geçirimsizliği.....	28
Aşınma deneyi.	30

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları ve Tartışma.....	32
Eğilme Deneyi	32
Basınç Deneyi	34
Eğilme ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki.....	36
Yoğunluk ve Su Emme Sonuçları.....	37
Kılcal Su Emme Deneyi	39
Su Emme ve Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları Arasındaki İlişki	41
Ultras ses Geçiş Hızı Deneyi.....	41
Ultras ses Geçiş Hızı ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	44
Aşınma Deneyi	44
Aşınma ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	48
Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi.....	48
Sonuç ve Öneriler	51

Sonuçlar	51
Öneriler	53
Kaynakça.....	54
Ekler.....	58
Öz geçmiş.....	66



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. <i>Literatürlerden Elde Edilen RPB için Çeşitli Karışım Oranları (Richard, & Cheyrezy, 1995), (Matte, & Moranville, 1999) ve (Staquet, & Espion, 2002, June).</i>	4
Tablo 2. <i>Kanada Quebec RPB Karışım Oranları, kg/m³ (Richard, & Cheyrezy, 1995).</i>	5
Tablo 3. <i>RPB'nin Ana Uygulamaları.</i>	6
Tablo 4. <i>Çimento, SD, Kuvars ve Cam Kumunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.</i>	11
Tablo 5. <i>Mikro Çelik Lif Numunelerinin Teknik Özellikleri.</i>	12
Tablo 6. <i>Nano Grafen Oksitin Teknik Özellikleri.</i>	13
Tablo 7. <i>Hiperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri.</i>	14
Tablo 8. <i>Elek Analizi Sonuçları.</i>	17
Tablo 9. <i>nGO Eklenen RPB'lerin Kütlece Karışım Oranları.</i>	18
Tablo 10. <i>ACT Eklenen RPB'lerin Kütlece Karışım Oranları.</i>	19
Tablo 11. <i>Ultrases Geçiş Hızı Deneyi IS 13311 Standartlarına Göre Sınıflandırma.</i>	26
Tablo 12. <i>Hızlı Klorür Geçirirmliliği Deneyi ASTM C 1202 Standartlarına Göre Sınıflandırma.</i>	30
Tablo 13. <i>Deneyde Kullanılan Numunelerin Ortalama Basınç Dayanımları.</i>	34
Tablo 14. <i>nGO Katkılı Numunelerin Su Emme Deneyi Sonuçları.</i>	38
Tablo 15. <i>ACT Katkılı Numunelerin Su Emme Deneyi Sonuçları.</i>	38
Tablo 16. <i>nGO İçeren Numunelerin Lineer Regresyon ile Elde Edilen Kılcallık Katsayıları.</i>	40
Tablo 17. <i>ACT İçeren Numunelerin Lineer Regresyon ile Elde Edilen Kılcallık Katsayıları.</i>	40
Tablo 18. <i>nGO İçeren Numunelerin UGH Deneyi IS 13311 Standartlarına Göre Sınıflandırma.</i>	42
Tablo 19. <i>ACT İçeren Numunelerin UGH Deneyi IS 13311 Standartlarına Göre Sınıflandırma.</i>	43
Tablo 20. <i>nGO İçeren Numunelerin ASTM C 944/ C944M-19 Standartlarına Göre Yapılan Ortalama Aşınma Deneyi Sonuçları.</i>	45
Tablo 21. <i>ACT İçeren Numunelerin ASTM C 944/ C944M-19 Standartlarına Göre Yapılan Ortalama Aşınma Deneyi Sonuçları.</i>	47

Tablo 22. <i>nGO İçeren Numunelerin ASTM C 1202 Standardına Göre Sınıflaması.</i>	49
Tablo 23. <i>ACT İçeren Numunelerin ASTM C 1202 Standardına Göre Sınıflaması.</i>	49
Tablo 24. <i>nGO İçeren Numunelerin Ortalama UGH Deney Sonuçları.</i>	63
Tablo 25. <i>ACT İçeren Numunelerin Ortalama UGH Deney Sonuçları.</i>	64
Tablo 26. <i>nGO İçeren Numunelerin Klorür İyon Geçirgenliği Deney Sonuçları.</i>	65
Tablo 27. <i>ACT İçeren Numunelerin Klorür İyon Geçirgenliği Deney Sonuçları.</i>	65



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Aşkale çimento fabrikasından alınan çimento.	10
Şekil 2. 0-400 µm kuvars kumu (a), 500-1000 µm kuvars kumu (b) ve 500-1000 µm atık cam kumu (c).....	12
Şekil 3. Mikro çelik lifler.....	13
Şekil 4. Nano grafen oksitin görüntüsü.....	14
Şekil 5. Hiperakışkanlaştırıcı.	15
Şekil 6. Karıştırmada kullanılan mikser (a), Mikro çelik lif eklenmesi (b).	16
Şekil 7. Manyetik karıştırıcı.....	16
Şekil 8. Agregalara ait granülometri eğrileri.	18
Şekil 9. Dikdörtgen prizma ve silindir numune boyutları.....	19
Şekil 10. Dikdörtgen prizma ve silindir numunelerin sıkıştırılması için tasarlanan kalıplar....	20
Şekil 11. Deneyde kullanılan basınç makinası.	21
Şekil 12. Yüksek sıcaklık küründe kullanılan etüv.....	21
Şekil 13. Kür rejimi.....	22
Şekil 14. Eğilme deneyi düzeneği.....	22
Şekil 15. Eğilme deneyi.	23
Şekil 16. Su içerisindeki havadaki ağırlıkları tartılan tartı.....	24
Şekil 17. Ultrases geçiş hızı deneyine ait bir görüntü.....	25
Şekil 18. Hava sirkülasyonlu etüv.....	26
Şekil 19. Kılcal Su Emme deney düzeneği.	27
Şekil 20. Hızlı klorür geçirimsizliği cihazı.	29
Şekil 21. Aşınma deney düzeneği.	31
Şekil 22. nGO içeren numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.	32
Şekil 23. ACT içeren numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.	33
Şekil 24. nGO içeren numunelerin ortalama basınç dayanımları.	35
Şekil 25. ACT içeren numunelerin ortalama basınç dayanımları.	36

Şekil 26. nGO ve ACT içeren numunelerin eğilme dayanımı-basınç dayanımı grafiği.	37
Şekil 27. RPBG0,14 karışımı kapiler su emme katsayısı.	39
Şekil 28. nGO ve ACT içeren numunelerin kapiler su emme-su emme grafiği.	41
Şekil 29. nGO içeren numunelerin ortalama UGH deney sonuçları.	42
Şekil 30. ACT içeren numunelerin ortalama UGH deney sonuçları.	43
Şekil 31. nGO ve ACT içeren numunelerin UGH ve basınç dayanımı grafiği.	44
Şekil 32. nGO içeren numunelerin ortalama aşınma deneyi sonuçları.	46
Şekil 33. ACT içeren numunelerin ortalama aşınma deneyi sonuçları.	47
Şekil 34. nGO ve ACT içeren numunelerin basınç dayanımı ve aşınma kaybı grafiği.	48
Şekil 35. RPB karışımı kapiler su emme katsayısı.	58
Şekil 36. RPBG0,035 karışımı kapiler su emme katsayısı.	58
Şekil 37. RPBG0,07 karışımı kapiler su emme katsayısı.	59
Şekil 38. RPBG0,21 karışımı kapiler su emme katsayısı.	59
Şekil 39. RPBG0,35 karışımı kapiler su emme katsayısı.	60
Şekil 40. RPBG0,70 karışımı kapiler su emme katsayısı.	60
Şekil 41. RPBC10 karışımı kapiler su emme katsayısı.	61
Şekil 42. RPBC20 karışımı kapiler su emme katsayısı.	61
Şekil 43. RPBC30 karışımı kapiler su emme katsayısı.	62
Şekil 44. RPBC40 karışımı kapiler su emme katsayısı.	62
Şekil 45. RPBC50 karışımı kapiler su emme katsayısı.	63

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

Kısaltmalar

A	: Amper
ACT	: Atık Cam Tozu
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyal Topluluğu)
HA	: Hiperakışkanlaştırıcı
KK	: Kuvas Kumu
nGO	: Nano Grefen Oksit
RPB	: Reaktif Pudra Beton
Rpm	: Revolutions Per Minute (Dakikadaki devir sayısı)
SD	: Silis Dumanı
TSE	: Türk Standartları Ensütüsü
UGH	: Ultrases Geçiş Hızı

Simgeler

a	: Numunenin Suya Temas Eden Alanı
a₀	: Çentik Boyu
A_c	: Deney Numunesi Kesit Ortalama Alanını
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
B	: Numune Kalınlığı
CaO	: Sönmemiş Kireç
Ca(OH)₂	: Kalsiyum- Hidroksit
Ca/Si	: Kalsiyum Bölü Silikat
COOH	: Karboksil Grubu
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
d	: Suyun Yoğunluğu
F	: Kırılma Yüğü

f_c	: Basınç Dayanımı
Fe_2O_3	: Demir Oksit
G	: Görünen Porozite
gr	: Gram
σ_{net}	: Eğilme Dayanımı
H	: Numune Kesitinin Yüksekliği
I	: Kapiler Su Emme
I	: Numunenin Mesnetler Arası Uzaklık
I_0	: Gerilim uygulandıktan hemen sonraki akım
I_t	: t. Dakikada Devreden Geçen Akım
K_2O	: Potasyum Oksit
L	: Beton Numunenin Yüzeyleri Arasındaki Mesafe
MgO	: Magnezyum Oksit
m_t	: t Süresinde Numune Ağırlığındaki Gram Cinsinden Değişim
Na_2O	: Sodyum Oksit
P	: Kırılmaya Neden Olan Yük
$P\%$	: Toplam Elekten Geçen Yüzdesi
Q	: Toplam Geçen Yük
Q_s	: Düzeltme Toplam Geçen Yük
Q_x	: Numuneden Geçen Akım Miktarı
s	: Zaman
S	: Kütlece Su Emme
S	: Kılcallık katsayısı
SiO_2	: Silis
SO_3	: Kükürt Trioksit
t	: Ultrasonik Cihazda Kaydedilen Süre
TiO_2	: Titanyum Dioksit

V	: Volt
v	: Ultrases Geçiş Hızı
w0	: Numunenin Etüv Kuru Ağırlığı
w1	: Numunenin Yaş Ağırlığı
w2	: Numunenin Su İçindeki Asılı Ağırlığı
×	: Standart Olmayan Numunenin Çapı
°C	: Santigrat Derece
%	: Yüzde



BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Nanoteknolojinin gelişimi ile son yıllardaki gelişmeler, küçük boyutlardaki malzemeleri araştırma olanağı sağlamıştır. Nanobilimdeki gelişmeler yapı malzemesi alanında da çalışmalara gereksinim duyulduğunu göstermekte ve bu alanda çalışmalar yapılmaktadır. Bunların başında ise nanobilimin beton teknolojisi üzerindeki etkileri gelmektedir (Perker, 2010). Nano yapıdaki malzemelerin davranışları binalar, köprüler, yollar ve mühendislik yapıları beton matrisinde iyileştiren bir özellik olmasına olanak tanımaktadır. Yüksek performanslı yapılarda ise bu nano değişim yüzyıllar boyunca kalıcı, yüksek mukavemete sahip ve performansı yüksek yapılar elde etmek için kullanılmıştır (Demirdöven, & Arditi, 2012, Eylül).

2010 yılı nobel fizik ödülünün grafen hakkındaki deneylerinden dolayı Andre Geim ve Konstantin Novoselov'a verilmesi dikkatleri bu malzeme üzerine çekmiştir. Grafenin çelikten 200 kat daha dayanıklı olmasına karşın esnek olması, yüksek ısı dayanımı ve düşük su geçirimsizliği özelliği ile yeni nesil yüksek dayanımlı kompozit betonlarda kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Grafenin ekonomik ve iyi kalitede üretilerek enerji, havacılık, otomotiv, yapı-inşaat gibi birçok alanda kullanılabilecek ürünler yapıldığı bilinmektedir. Araştırmacılar geri dönüşüme dayalı ve düşük maliyette grafen üretimi yapmayı başarmışlardır. Bu sayede çevreye de olumlu etki yapabilecek çimento bağlayıcı kompozitlerin de üretilmesinin yolu açılmıştır. Çimento bağlayıcı kompozitlerde nano grafen oksit (nGO) potansiyel kullanımı son yıllarda yoğun bir şekilde incelenmesine rağmen, bugüne dek grafen içeren benzer araştırmalar sınırlı kalmıştır. Günümüzde RPB'nin grafen oksit etkisi ile güçlendirilmesi üzerine çalışmalar ise yeni ve çok sınırlı kalmıştır. (Wang, Dong, Yu, & Han, 2020).

Dünya'da endüstriyel atıkların depolanması büyük sorun teşkil etmekte ve atık malzemelerin belirli yerlerde depolanması veya yok edilmesinde zorluklar yaşanmaktadır. Bu problemlerin çözümü ancak atık malzemelerin geri dönüşümde yeniden kullanılması ile mümkündür (Gönen, Onat, Cemalgil, Yılmaz, & Altuncu, 2012). Atık malzemelerin beton teknolojisinde kullanılması ise bilinen bir uygulamadır ve bilim dünyasının en önemli araştırma alanlarından biri de atık malzemelerin yeni alanlarda değerlendirilmesi olmuştur (Demirel, & Öz, 2017).

RPB yüksek mukavemetli olmasına karşın, bu kadar yüksek mukavemeti elde etmek için yüksek üretim maliyeti ortaya çıkmaktadır. RPB üretiminde en yüksek maliyeti çimento ve kuvars kumu (KK) oluşturmaktadır. RPB'nin sektörde daha fazla kullanılabilmesi için üretim maliyetinin azaltılması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda inşaat sektöründe düşük maliyetle hammadde kullanılması ile RPB'nin ekonomik olarak avantajlı bir yapı malzemesi olması mümkündür. Bu düşünce ile bu çalışmanın önemli bir diğer konusu da, ucuz bir hammadde olan atık cam tozunun (ACT) RPB'de kademeli olarak yerine kullanılması olmuştur.

Bu çalışma iki bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde geleneksel RPB kompozit matriste kullanılan çimento yerine kütlece %0,035, %0,07, %0,14, %0,21, %0,35 ve %0,70 oranında nGO eklenerek RPB'nin geliştirilmesi ve daha etkin kompozit oluşturulması amaçlanmıştır. Diğer parametreler sabit tutulup numuneler üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, kılcal su emme, su emme, hızlı klorür iyonu geçirimsizliği, ultrases geçiş hızı ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde ise RPB'de nGO etkisinde en iyi sonuçları veren karışımın yapısında agrega olarak kullanılan KK azaltılarak yerine kademeli olarak KK yerine ikame olarak %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında ACT kullanılması ile RPB matrisinde atık ham maddenin değerlendirilmesi ve çevreye olumlu kompozitler üreterek mekanik davranışlarını geliştirmek amaçlanmıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

Kaynak Özetleri

Reaktif Pudra Betonu

Reaktif pudra betonu, yüksek çimento içeriğine ve düşük su/çimento oranına sahip ultra yüksek performanslı sınıfına giren bir beton türüdür (İpek, 2009). Richard ve Cheyrezy 90'lı yılların başlarında RPB ile ilgili ilk deneysel çalışmaları yapmış ve bu çalışmalar üzerinde tasarım ve mekanik özelliklerini geliştirme ile ilgili birçok araştırmada bulunmuşlardır. Yapılan çalışmalarda farklı ısıtma işlem programı ve ön basınç uygulanan yaklaşık 200 MPa ve 800 MPa basınç dayanımına ulaşan iki farklı kompozit geliştirmişlerdir (Richard, & Cheyrezy, 1995). RPB'lerin 200 ve 800 MPa arasında farklı programlarla değişkenlik gösteren, 25 ile 150 MPa arasında çekme dayanımları gösteren ve kırılma enerjileri yaklaşık 30000 J/m^2 yeni kuşak kompozitler olduğundan bahsetmiştir (Topçu, & Karakurt, 2005). RPB karışım tasarımı için şimdiye kadar deneysel çalışmalar yapılmıştır. Tablo 1 literatürlerden elde edilen RPB için çeşitli karışım oranlarını göstermektedir.

Tablo 1. *Literatürlerden Elde Edilen RPB için Çeşitli Karışım Oranları (Richard, & Cheyrezzy, 1995), (Matte, & Moranville, 1999) ve (Staquet, & Espion, 2002, June).*

Malzemeler	Richard ve Cheyrezzy						Matte ve Moranville	Staquet ve Espion
	RPB 200				RPB 800			
	Lifsiz		Lifli		Silis Agregalar	Çelik Agregalar		
Çimento	1	1	1	1	1	1	1	1
Silis Dumanı	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23	0,325	0,324
Kuvars Unu	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39	0,3	0,3
Kum	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-	1,43	1,43
Su	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19	0,2	0,23
Süperkanlaştırıcı	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019	0,018	0,021
Mikro Çelik Lif (L=12 mm)	-	-	0,175	0,175	-	-	0,275	0,218
Mikro Çelik Lif (L=3 mm)	-	-	-	-	0,63	0,63	-	-
Çelik Agregalar	-	-	-	-	-	1,49	-	-
Sıkıştırma (MPa)	-	-	-	-	50	50	-	-
Buhar Kürü (°C)	20	90	20	90	250-400	250-400	90	90

RPB’de kullanılan pirinç kaplı mikro çelik lifler kompozitin eğilme dayanımında artışa neden olmaktadır. Ayrıca çelik lifler betonda oluşan çatlak oluşumunu azaltması ya da oluşacak çatlakları geciktirmesinde büyük katkı sağlamaktadır (Yazıcı, & Yalçınkaya, 2011). Bu özellikleri ile RPB düşük su/çimento oranı ile birlikte mikro çelik liflerin de katkısıyla normal beton ve yüksek dayanımlı betonlara kıyasla çok daha iyi performans göstermektedir. Dolayısıyla RPB içerisinde %1’den %3’e kadar kullanılan mikro çelik lifler yüksek dayanımlı betonlardan yaklaşık 10 kat eğilme dayanımını ve yaklaşık 300 kat kırılma enerjisini arttırdığı gözlemlenmiştir (Yazıcı, Beglarigale, & Yalçınkaya, 2013, Kasım). RPB’nin sünek ve geçirimsiz olmasının yanında daha iyi mekanik özelliklere de sahiptirler. Bu betonlarda ince taneli çimento, silis dumanı ve kuvars kumunun yanında çelik lifler de kullanılmaktadır. Çelik liflerin kullanımından dolayı yüksek enerji yutma potansiyeline sahip olan bu betonlar, darbe etkisine veya patlamaya maruz kalan yerlerde kullanılmaktadır (Fu, & Wang, 1994). 1997 yılında RPB ile yapılmış olan Kanada’nın Quebec şehrinde Sherbrook köprüsünde kullanılan malzemelerin karışım oranları Tablo 2’de gösterilmiştir.

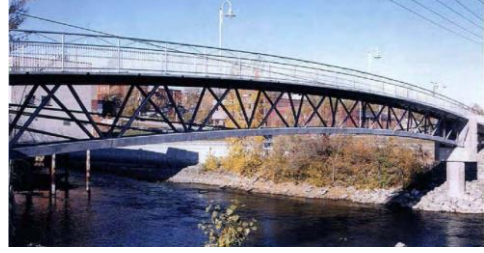
Tablo 2. Kanada Quebec RPB Karışım Oranları, kg/m³ (Richard, & Cheyrezy, 1995).

	Çimento	KK	SD	Kum	Su	Süper Akışkanlaştırıcı	Çelik Lif
RPB	750	210	230	1010	195	17	190

Tablo 3'te görsel olarak gösterilen 60 m uzunluğunda yaya ve bisiklet yolu olan Sherbrook köprüsü RPB'nin gelişmesiyle birlikte, malzeme kullanımının optimize edilmesi, uzun ömürlü ve çevreye duyarlı yapılar inşa edilebildiğini gösteren bir örneklerden bir tanesidir. Bugüne kadar yapılan araştırmalar ve gözlemler, RPB'nin kullanımını şimdiye kadar imkânsız olan yeni yapılarla genişletme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Şimdiye kadar RPB'nin bazı ana uygulamaları Tablo 3'te gösterildiği gibidir:

Tablo 3. RPB'nin Ana Uygulamaları.

Quebec-Kanada'da bulunan Sherbrook köprüsü Temmuz 1997 Dünyanın ilk RPB dolgulu çelik boru kompozit yaya köprüsü (Blais, & Couture, 1999).



Japonya'daki Sakata-Mirai Yaya Köprüsü (Rebentrost, & Cavill, 2006, September).



Shepherd'ın Gully Creek'teki köprü Avustralya'nın Sidney kentinde bulunan dünyadaki normal karayolu trafiği için inşa edilmiş ilk RPB köprü yapısıdır (Sadrekarimi, 2007).



Türkiye'de RPB ile üretilen yağmur suyu ve rögar kapakları (Taşdemir, Bayramov, Kocatürk, & Yerlikaya, 2004).



RPB'de iri agregaların olmaması ile beton içerisinde daha yoğun bir yapının oluştuğu görülmektedir (Özalp, 2016). Bu durum maliyette yüksek artışlara sebep olmaktadır. Ayrıca RPB üretiminde kullanılan çimento miktarı normal betona oranla 2 kat daha fazla olduğu için maliyetleri arttırdığı, beton hidrasyon ısını arttırdığı ve yüksek çimento kullanılması (üretim esnasında yüksek CO₂ salınımı) ile de çevreci olmadığı görülmektedir. Bu açıdan RPB'nin atık malzemeler ile geliştirilmesi geleneksel betona göre daha fazla ihtiyaç duyulan bir beton türü olarak görülmektedir.

Nano Grafen Oksit

Grafen oksit ilk olarak 1958 yılında Hummers ve Offeman'ın geliştirdiği metot ile ortaya çıkmıştır (Hummers, & Offeman, 1958). Grafen geniş yüzey alanı, ısı iletkenliği ve yüksek young modülü ile sıra dışı bir malzeme olarak nitelendirilebilir. Bu özellikleriyle grafenin çok fazla uygulama alanı olduğu bilinmektedir (Bedeloğlu, & Taş, 2016). Bunlardan bazıları aşağıda literatür çalışması ile verilmiştir.

Devasena ve Karthikeyan'nın (2015) yaptığı çalışmada, Betona yapılan grafen oksit ilavesi, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme dayanımı arttırdığı, eğilme dayanımını yaklaşık %4 ve basınç dayanımını yaklaşık %11 artırmak için sadece %0,1 grafen oksit gerektiği gözlemlenmiştir. Pan vd. (2015) grafen oksit-çimento kompozitinin mekanik özellikleri ve mikroyapısı adlı çalışmada, Portland çimento macununun mekanik özelliklerini geliştirmek için grafen oksit kullanılmış. Ağırlıkça %0,05 grafen oksit uygulaması basınç dayanımını sırasıyla %15-33 ve eğilme dayanımını %41-59 oranında artırabildiği gözlemlenmiştir. Antonio, German ve Raymundo (2016) grafen oksit, nanomalzemelerin düşük dozlarda açıklanan etkisinin betonda daha iyi direnç, mikroyapı ve mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılması için önemli olduğundan bahsetmiştir. Ayrıca yaptığı çalışmada basınç mukavemeti, kontrol örneğine kıyasla 28 günde %5'e kadar grafen oksit içeriği ile maksimum %57,4 artış gözlenmiş ve %4 grafen oksit içeriği ile eğilme dayanımında yaklaşık %65 artış gözlemlenmiştir. Kumaravel ve Balaji (2016) matrisinin yapısına %0,1 grafen oksit eklenmesi ile eğilme mukavemetini yaklaşık %4 basınç dayanımı %11 arttırdığını ve ayrıca grafen oksitin çimento hamurunun hidrasyon derecesini ve çimento matrisinin yoğunluğunu arttırarak daha dayanıklı bir ürün üretildiğini gözlemlenmiştir. Rehman, Zainah, Shazim, Javed ve Khushnood (2017) sürdürülebilir grafen bazlı çimento kompozit adlı çalışmada, çimentoya grafenin dâhil edilmesi ile çimento pastasının sertleştirilmiş özellikleri üzerinde güçlü bir etki göstermiştir. Çimento bazlı grafen kompozitin basıçta %30 artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Dimov vd. (2018, August) grafenle güçlendirilmiş betonun, normal betonla karşılaştırıldığında basınç mukavemetinde %146, eğilme mukavemetinde %79,5 artış ve su geçirgenliğinde normal betona kıyasla neredeyse %400'lük bir azalma olduğunu göstermiş. Kompozitte kullanılan grafen oksitin işlevsellik ve kararlılık açısından inşaat sektöründe nano-beton için faydalı olacağı belirtilmiştir. Uygunoğlu ve Şimşek (2019) çimento oranının %0, %0,5 %1, %1,5 ve %2'si kadar grafen oksit kullanarak numuneler üzerinde eğilme ve basınç dayanımı testleri yapmış. Sonuçlar incelendiğinde basınç dayanımında ise %0,5 kullanım oranında %44 oranında artış görülmüş olup %5'ten fazla grafen oksit kullanımında ise dayanımların azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Ayrıca GO'nun elektriksel iletkenlik

değerlerinde de önemli artışlar elde edilmiştir. Wang vd. (2020) farklı gerilme oranlarının grafen oksit takviyeli reaktif pudra betonların mekanik özellikleri adlı deneysel çalışmasında yarı statik yükler altında, grafenin dahil edilmesinin reaktif pudra betonun basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığını gözlemlemiştir. Grafenin dahil edilmesinin Reaktif Pudra Betonun basınç dayanımını önemli ölçüde arttırdığını grafen içeriği sadece %0,5 olduğunda, betonun basınç dayanımı %40,2 arttığını ve reaktif pudra betonun darbe dayanıklılığı %117 artırıldığını gözlemlenmiştir.

Son zamanlarda nGO geri dönüşüm prosesi ile elde edilmiş ve düşük maliyetle üretimi yapılmaya başlanmıştır. Maliyetin düşürülmesi grafenin yapı sektöründe ve altyapı havaalanı yolları gibi sektörlerde daha uygun ve daha sağlam kompozitler üretilebileceğini göstermektedir. Çimento kompozitlerinde grafen oksitin potansiyel kullanımı son yıllarda yoğun bir şekilde incelenmesine rağmen, bugüne dek grafen içeren benzer araştırmalar sınırlı kalmıştır. Yapılacak yeni çalışmamızda da geleneksel Reaktif Pudra Betonun nGO ile geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Atık Cam Tozu

Endüstriyel fabrikalardan çıkan atık malzemeler örnek olarak plastikler, kullanım ömrünü tamamlamış malzemeler, camlar, metal parçaları çevreye olumsuz anlamda zarar vermektedir. Verilen bu zararı en aza indirmek için ise alternatif geri dönüşüm yolları planlanarak bu atık malzemelerin tekrar değerlendirilmesi üzerine çalışmalar mevcuttur (Demirel, & Öz, 2017). Bu planların başında ise inşaat teknolojisinde atık malzemelerin değerlendirmesi gelmektedir. Atık malzemeler üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bu malzemelerden cam tozunun beton mukavemetini arttırdığı görülmüştür. Cam tozu ile ilgili yapılan çalışmalar ise şu şekildedir.

Rawaa (2015) petrol ürünleri ve atık cam tozunun reaktif pudra beton üzerinde etkileri üzerinde yaptığı çalışmada, toplam 58 küp ve 48 prizma ile yapılan deneylerde cam atığı değişimi %0, %25, %50 ve %100 ile dökülmüş ve test edilmiştir. Sonuçlar, cam atıklarının kuvars kumu yerine %25 değiştirilmesi ile Reaktif Pudra Betonun basınç mukavemetini %4,35 ve eğilme mukavemetinde ise %2,6 arttırdığını, cam atıklarının yüzdesi %25'ten fazla arttırıldığında basınç ve eğilme dayanımında azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kushartomo, Bali ve Sulaiman (2015) cam tozunun Reaktif Pudra Beton üzerinde etkileri üzerine yaptığı çalışmada 95°C ısıtma işlem programıyla cam tozu kuvars kumu yerine %20 oranında kullanımının Reaktif Pudra Betondaki basınç dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Orhan ve Esen (2017) 50 µm boyutlarında pencere camlarının öğütülmesi sonucu elde edilen

artık cam tozu ile betona çimento miktarının ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 oranlarında ilave edilmiştir. 7, 28, 90 gün standart su kür uygulanan numunelerde en iyi sonuçları %10 ve %15 oranında verdiği görülmüştür. Sudhanshu ve Bharat'ın (2017) atık cam tozunun betonun basınç dayanımı üzerine etkileri adlı çalışmasında, Atık cam tozunu %5'ten %35'e kadar kademeli olarak çeşitli yüzdelerde ince agrega yerine kullanmıştır. Atık cam tozunun % 25'lik bir optimum yüzdeyle eklenmesi ile geleneksel betona oranla daha fazla mukavemete sahip olduğu gözlemlenmiştir. Demiss, Oyawa ve Shitote (2017) cam tozu ve pirinç kabuğu külü içeren geri dönüşümlü reaktif toz betonunun basınç dayanımı üzerine deneysel inceleme adlı çalışmasında, Reaktif Pudra Betonda bulunan silis dumanı yerine pirinç kabuğu külü ve atık cam tozu üç farklı yüzde %80-20, %50-50 ve %25-75 ile kullanılmış, %80 oranında pirinç kabuğu külü ve %20 atık cam tozu ile değiştirilmesiyle ortalama %9.5 daha büyük basınç mukavemetine sahip çevre dostu bir beton üretilebildiği gösterilmiştir. Uzun, Çöğürücü ve Keskin (2018) cam tozunun beton basınç dayanımına etkisi adlı çalışmasında betonda kullanılan çimento yerine cam tozunun %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılarak ve buhar kürü uygulanan karışımlarda cam tozunun beton basınç dayanımını %20 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Demiss vd. (2018) Reaktif Pudra Betonun mekanik mukavemetleri, silis dumanının uçucu kül ve atık cam tozu ile değiştirilmesi ile basınç dayanımı artmış, %75 uçucu kül ve %25 cam tozu kullanılarak, 28 günlük standart kürlemede %0.38 daha fazla mukavemet elde edildiği gözlemlenmiştir.

Atık cam tozu konusunda ise, Reaktif Pudra Beton üzerinde ACT'nin agrega olarak kullanılması üzerine çalışmalar kısıtlı kalmıştır. Yapılacak bu çalışmalarla birlikte literatürde eksikliği fark edilen Reaktif Pudra Betonun geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda nGO takviyesiyle ve daha ekonomik bir agrega kullanımıyla literatüre katkıda bulunulması hedeflenerek, RPB'nin kullanım alanların genişletilmesi ve daha çevreci bir kompozit üretileceği düşünülmektedir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Materyal ve Yöntem

Materyal

Bu bölümde üretimde kullanılan malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Kullanılan malzemeler ve özellikleri.

Çimento.

Üretimde kullanılan çimento Aşkale çimento fabrikasından alınmış olan ve Şekil 1’de gösterilen CEM I 42,5R çimento tipi kullanılmıştır. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4’te gösterilmiştir.



Şekil 1. Aşkale çimento fabrikasından alınan çimento.

Silis dumanı.

Çalışmada kullanılan silis dumanı Bayburt Üniversitesi Dost Kimya Endüstriyel Hammaddeler firmasından temin edilen SiO_2 minerali içeren peletlenmiş ithal bir üründür. Bu ürüne ait firmadan alınan fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4’te verilmiştir.

Karma Suyu.

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

Agrega.

Deneylerde kullanılan kuvars kumu, Des-Mark Endüstriyel kumlar firmasından temin edilmiş olup 0–400 μm ve 500-1000 μm aralıktaki iki farklı sınıfta bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan cam tozu ise Karsan Cam tozu ve Cam Kürecik firmasından temin edilmiş olup 500-1000 μm çapındadır. Kuvars ve cam kumu numunelerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4'te görseli ise Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 4. Çimento, SD, Kuvars ve Cam Kumunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.

Kimyasal Bileşim (%)	Çimento	SD	KK	ACT
SiO	20,09	90,82	97-99	70,22
Al₂O₃	5,01	-	0,01	1,6
Fe₂O₃	2,73	-	0,01	0,52
CaO	64,47	-	-	11,33
MgO	1,95	-	-	-
SO₃	2,65	-	-	-
Na₂O	-	-	0,37	-
K₂O	-	-	-	15,69
TiO₂	-	-	0,07	-
Özgül Ağırlık	3,16	2,69	2,85	2,6
Renk	Gri	Gri	Beyaz	Beyaz



(a)

(b)



(c)

Şekil 2. 0-400 μm kuvars kumu (a), 500-1000 μm kuvars kumu (b) ve 500-1000 μm atık cam kumu (c).

Çelik lifler.

Bu çalışmada kullanılan pirinç kaplı mikro çelik lif, AFB Metal firmasından temin edilmiş olup 6 mm uzunluğa ve 0,16 mm çapa sahip pirinç kaplı düz çelik mikro lifler kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan mikro çelik lifler Şekil 3'te gösterilmiş olup teknik özellikleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Mikro Çelik Lif Numunelerinin Teknik Özellikleri.

Teknik Özellikler	
Boy (mm)	6
Çap (mm)	0,16
Narinlik	37,5
Özgül Ağırlık	7,171
Çekme Dayanımı (MPa)	2250



Şekil 3. Mikro çelik lifler.

Nano grafen oksit.

Bu çalışmada Şekil 4'te gösterilen 3 nm kalınlığında nano grafen oksit kullanılmıştır. Nanografi firmasından temin edilen nano grafen oksitin teknik özellikleri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Nano Grafen Oksitin Teknik Özellikleri.

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



Şekil 4. Nano grafen oksitin görüntüsü.

Hiperakışkanlaştırıcı.

Çalışmada kullanılan hiperakışkanlaştırıcı (HA) yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan BASF Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş firması tarafından üretilen MasterGlenium ACE3460 kodlu kimyasaldır. Şekil 5’te gösterilen hiperakışkanlaştırıcı su/çimento oranını azaltan yüksek işlenebilirlikli bir kimyasaldır. Betonun yüksek mukavemet kazanmasında oldukça etkilidir. Bu malzemeye ait üretici tarafından sunulan teknik özellikler Tablo 7’de sunulmaktadır.

Tablo 7. Hiperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri.

Teknik Özellikler	
Klor İyon İçeriği (%)	$\leq 0,10$
Alkali İçeriği (%)	$\leq 3,0$
pH Değeri	5-7
Renk	Sarı
Özgül Ağırlık (kg/lt)	1,07 – 1,11



Şekil 5. Hiperakışkanlaştırıcı.

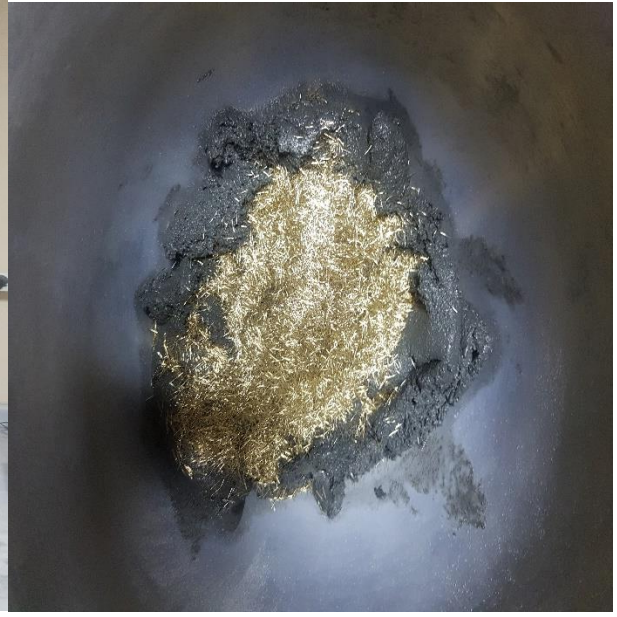
Yöntem

Karışımın hazırlanması.

Bu çalışmanın ilk aşamasında çimento, SD, KK, lif, su ve HA sabit tutulmuştur. Grafen oksitinin etkisinin ideal oranının bulunması hedeflenerek, %0,035, %0,07, %0,14, %0,21, %0,35 ve %0,70 oranlarında karışıma eklenmiştir. Karışımda öncelikle Şekil 6'da gösterilen karıştırıcı ile çimento, silis dumanı ve kuvars kumu 2 dakika kadar kuru bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra su miktarının yarısının içerisinde nGO eklenerek homojen bir şekilde dağılması için Şekil 7'de gösterilen manyetik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Su içerisinde dağıtılan nGO kuru karışım üzerine eklenerek 140 rpm hızında karıştırılmaya başlanmıştır. Harç karıştırma işlemi devam ederken kalan su ve katkı karıştırılarak karışıma eklenmiştir. 60 saniye boyunca karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karışım ideal kıvama ulaştıktan sonra mikro çelik lifler (hacimce %2 oranında) üzerine eklenerek 280 rpm hızında karışım 1 dakika daha karıştırılmıştır (Şekil 6).



(a)



(b)

Şekil 6. Karıştırmada kullanılan mikser (a), Mikro çelik lif eklenmesi (b).



Şekil 7. Manyetik karıştırıcı.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde ise ilk çalışmada nGO katkısı ile en iyi sonucu veren numune referans olarak alınmıştır. Deneyde çimento, SD, lif, su, nGO ve HA oranları sabit tutulmuştur. Matris yapısında sadece agregat tipinin değiştirildiği 6 farklı karışım tasarlanmıştır. Yine ilk karışımında olduğu gibi matris yapısındaki çimento, silis dumanı ve agregalar önce 2 dakika kadar kuru bir şekilde 140 rpm hızında karıştırılmıştır. Sonra suyun yarısı beton karışımına eklenmiştir. Harç karıştırma işlemi devam ederken kalan su ve katkı karıştırılarak karışıma eklenerek 60 saniye daha karıştırma işlemi yapılmıştır. Karışım ideal kıvamı aldıktan sonra en son mikro çelik lifler eklenerek karışım 280 rpm hızında karışım 1 dakika daha karıştırılmıştır. Mikro çelik lifler karışım kıvam almasından sonra eklenmesiyle matris

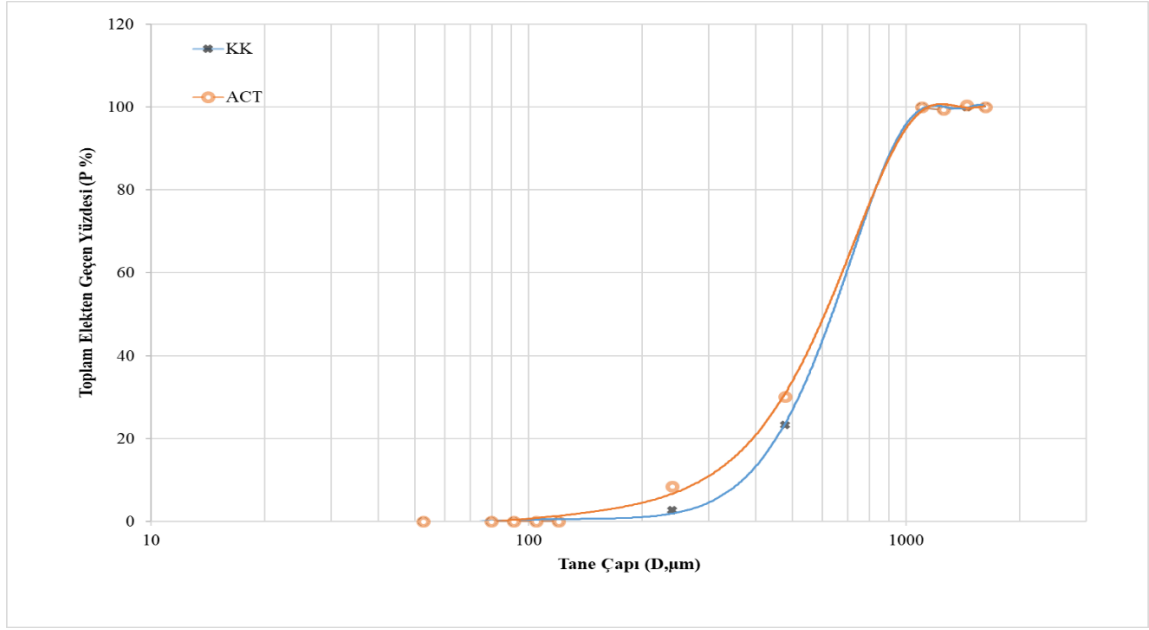
içerisinde toplanma yapmadan kalıba dökülmesi sağlanmıştır. Numuneler kalıp içerisine doldurulmadan önce kalıp ayırıcı yağ ile kalıp yağlanmış ve yerleştirilmesinde ise tokmaktama yöntemi kullanılmıştır.

Elek analizi.

Reaktif pudra betonlarda silis dumanı ile ince taneli agreganın çimento hamuru içerisinde kullanılması ile betonda mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlamaktadır (Dallaire, Aitcin, & Lachemi, 1998). Ayrıca beton karışımında ince taneli agrega kullanılması mikro boşlukların azalmasına eğilme ve basınç dayanımında ise artış olmasında neden olmaktadır (Topçu, Gülbandır, & Koca, 2018). Bu amaçla Kuvars kumu için 0-400 µm, 500-1000 µm ve ACT için 500-1000 µm tane aralığındaki agregalardan numuneler alınarak tane dağılımlarının (granülometri) belirlenmesi amacıyla elek analizi deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneye ait sonuçlar Tablo 8’de ve çalışmada kullanılan agregaların granülometri eğrisi Şekil 8’de verilmiştir. TS EN 933-1 standartlarına uygun olarak 50±5°C etüve koyulan numuneler 48 saat sonunda etüvden alınmıştır. Deneyde kullanılan agregalar kurutulduktan sonra 0,01 g hassasiyetindeki tartı ile tartılarak yukardan aşağı doğru göz açıklığı küçülen elekler ile eleme işlemi yapılmıştır. Eleme işlemi sonrası eleklerde kalan agregalar tartılarak Tablo 8’e kaydedilmiştir. Agregaların tane büyüklüğü dağılımını, tane sınıflarını ve incelik modülü ASTM C 136 standartlarına göre yapılmıştır.

Tablo 8. *Elek Analizi Sonuçları.*

Elek Analizi				
KK			ACT	
Elek Çapı (mm)	Elekten Üstü (g)	Toplam Elekten Geçen (%)	Elekten Geçen (g)	Toplam Elekten Geçen (%)
1	0	100	0	100
0,500	767,10	23,29	698,60	30,14
0,250	205,80	2,710	217,20	8,420
Elek Altı	27,10	0	84,20	0



Şekil 8. Agregalara ait granülometri eğrileri.

Karışım oranları.

Birinci aşamada yapılan deneylerde toplam 7 seriden oluşan hacimce %2 oranında lifli beton karışımlarının, 6 tanesinde nGO matrisinin yapısına çimento ağırlığının %0,035, %0,07, %0,14, %0,21, %0,35 ve %0,70 oranında eklenerek kullanılmıştır. Geri kalan karışım ise geleneksel RPB karışımına göre üretilmiştir. Çalışmada kullanılacak malzemelerin karışım oranları Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. nGO Eklenen RPB'lerin Kütlece Karışım Oranları.

	Çi me nto	SD	KK (0- 400 µm)	KK (500- 1000 µm)	Su	HA	Mikro Çelik lif	nGO (%)
RPB	1,0	0,23	0,39	1,1	0,017	0,023	0,17	-
RPBG0,035	1,0	0,23	0,39	1,1	0,017	0,023	0,17	0,035
RPBG0,07	1,0	0,23	0,39	1,1	0,017	0,023	0,17	0,07
RPBG0,14	1,0	0,23	0,39	1,1	0,017	0,023	0,17	0,14
RPBG0,21	1,0	0,23	0,39	1,1	0,017	0,023	0,17	0,21
RPBG0,35	1,0	0,23	0,39	1,1	0,017	0,023	0,17	0,35
RPBG0,70	1,0	0,23	0,39	1,1	0,017	0,023	0,17	0,70

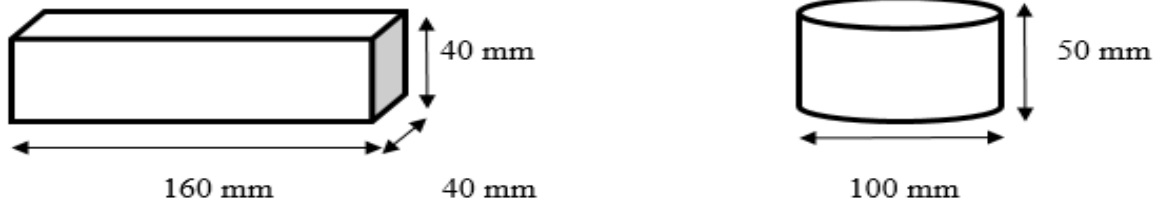
İkinci çalışmada yapılan deneylerde, ilk aşamada mekanik sonuçları en iyi çıkan seri seçilerek, bu serinin agrega içeriği değiştirilmiştir. Toplam 6 seriden oluşan lifli beton karışımlarının, s/ç oranları, HA, SD ve lif oranları sabit tutularak, geleneksel RPB'nin nGO ile geliştirilmesiyle üretilen yeni kompozit referans alınarak matriste bulunan KK yerine %0-%50 oranında ACT agregası kullanılarak çalışma tamamlanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan karışım oranları Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. ACT Eklenen RPB'lerin Kütlece Karışım Oranları.

	Çim ento	SD	KK (0- 400 µm)	ACT (0- 500- 1000 µm)	KK (500 - 1000 µm)	Su	HA	Mikro Çelik Lif	nGO (%)
RPBG0,14	1,0	0,23	0,39	-	1,1	0,017	0,023	0,17	0,14
RPBC10	1,0	0,23	0,39	0,11	0,99	0,017	0,023	0,17	0,14
RPBC20	1,0	0,23	0,39	0,22	0,88	0,017	0,023	0,17	0,14
RPBC30	1,0	0,23	0,39	0,33	0,77	0,017	0,023	0,17	0,14
RPBC40	1,0	0,23	0,39	0,44	0,66	0,017	0,023	0,17	0,14
RPBC50	1,0	0,23	0,39	0,55	0,55	0,017	0,023	0,17	0,14

Numune boyutları ve şekilleri.

Bu çalışmada, tasarlanan karışımlardan eğme ve basınç deneylerinde kullanılmak için 40×40×160 mm boyutlarında toplam 13 adet prizma üretilmiştir. Hızlı klorür geçirimsizliği tayini, aşınma, su emme ve kılcal su emme deneylerinde kullanılması için ise çapı 100 mm ve yüksekliği 50 mm (Ø100×50 mm) boyutunda 39 adet silindir numune üretilmiştir. Bu numuneler Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Dikdörtgen prizma ve silindir numune boyutları.

Ön sıkıştırma işlemi.

Ön sıkıştırma işleminin yapılabilmesi için dikdörtgen prizma ve silindir numunelerin sıkıştırılması için tasarlanan kalıplar Şekil 10’da gösterilmiştir. Dikdörtgen prizma numuneleri için kalıba ilk olarak taze haldeki RPB doldurulmuş ve tokmaktama yöntemi ile yerleştirilmiştir.



Şekil 10. Dikdörtgen prizma ve silindir numunelerin sıkıştırılması için tasarlanan kalıplar.

Daha sonra betona basınç kuvveti uygulanması için tasarlanan üst kapak kapatılarak betona istenilen basınç uygulanmıştır. Sıkıştırma işlemi için Şekil 11’de gösterilen basınç makinası kullanılmıştır. Matris içerisindeki suyun sıkıştırma esnasında dışarıya çıkması için oldukça düşük bir yükleme hızı uygulanmıştır. Kalıba doldurulan taze haldeki numuneler yine Şekil 11’de gösterilen basınç presi altında 0,50 MPa/sn’lik bir yükleme hızı ile 50 MPa basınç değerine ulaşana kadar kontrollü yükleme yapılmıştır. Ön yükleme sonrasında istenilen yüke geldikten sonra uygulanan yük kaldırılmış ve numune 24 saat kalıp içerisinde bırakılmıştır. Numuneler 22 ± 2 °C hava ortamında nemli bir beze sarılarak nem kaybını önleyerek betondaki kimyasal reaksiyonun gelişmesi amaçlanmıştır. Deneyde kullanılan silindir numunelerin ön sıkıştırma aşamasında da aynı yöntem uygulanmıştır.



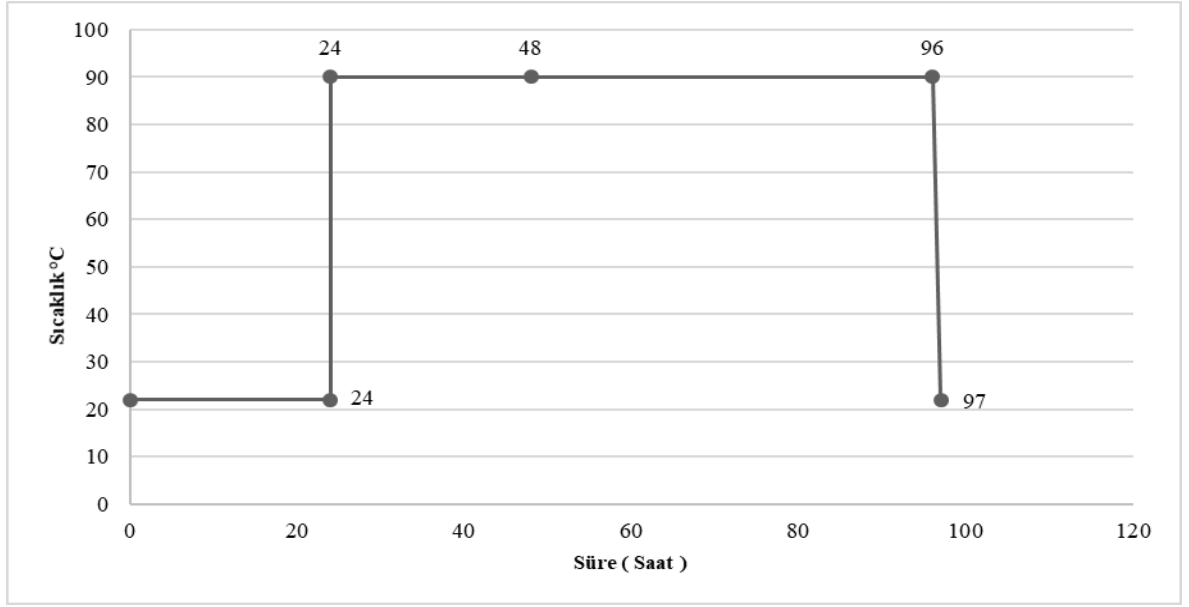
Şekil 11. Deneyde kullanılan basınç makinası.

Isıl işlem programı.

Üretilen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra $90\pm5^{\circ}\text{C}$ ayarlanmış laboratuvar tipi etüv içerisinde kirece doymun kür suyunda 2 gün boyunca etüv programına tabii tutulmuştur. Etüv esnasında numunelerin su kaybını önlenmesi amaçlanarak kapalı bir kap kullanılmıştır. Çalışmada etüv işlemi için kullanılan makina Şekil 12’de gösterilmiştir. Isıl işlem programı beton dayanımını erken yaşlarda hızlandırmaktadır (Ünal, 1994). Buhar kürü uygulanan kontrollü soğutma yapılmayan numunelerin sıcaklığın hızlı düşürülmesi ile betonun dış yüzeyi hızlı soğuma gösterirken iç kısımlar ise sıcak kalmaktadır. Bu olay sonucu oluşan sıcaklık farkı betondaki deformasyonların da farklı olmasıyla betonda çatlamlar oluşturmaktadır (Özalp, 2016). Bu amaç doğrultusunda rötre çatlağı oluşumunu en aza indirmek için deney numuneleri 48 saat sonunda etüvden çıkartılarak yaklaşık 1 saat kendiliğinden soğuma sürecine bırakılmıştır. Bu durumu gösteren grafik Şekil 13’te verilmiştir.



Şekil 12. Yüksek sıcaklık küründe kullanılan etüv.

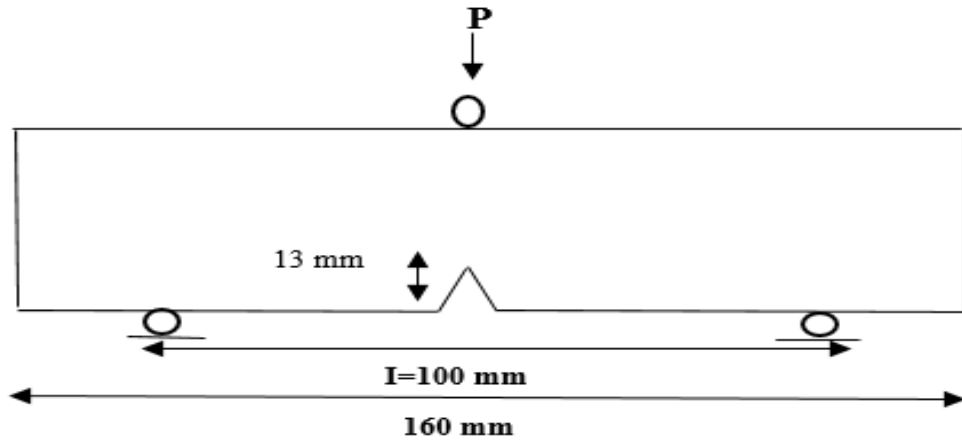


Şekil 13. Kür rejimi.

Sertleşmiş beton deneyleri.

Üç noktalı eğilme deneyi.

Üç noktalı eğilme deneyi, ön sıkıştırma ve 48 saat ısıtma işlemi uygulanan numunelere TS EN 12390-5 deney numunelerinin eğilme dayanımının tayinine göre iki mesnet üzerinde duran numunenin tam ortasına yapılan dik yönde düşey yük ile uygulandı. Deneyde döküm yapılmadan önce özel olarak tasarlanan kalıp içerisine 13 mm derinliğinde çentik oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Prizmatik olarak üretilen tüm numunelerin orta noktasına Şekil 14'te gösterildiği gibi 13 mm derinliğinde çentik açılmıştır. Numunelerin mesnetler arası açıklığı 100 mm olarak kullanılmış ve her numune için mesnetler arası uzaklık sabit tutulmuştur. Şekil 15'te gösterildiği gibi karşılaştırma amacı ile geleneksel RPB karışımı ile oluşturulan bütün numunelere eğilme deneyi yapılmıştır.



Şekil 14. Eğilme deneyi düzeneği.

Numunelerin eğilme dayanımları çentikli numuneler için kullanılan denklem (1) kullanılarak hesaplandı.

$$\sigma_{net} = \frac{3PI}{2B(H-a_0)^2} \quad (1)$$

σ_{net} : Eğilme Dayanımı (MPa),

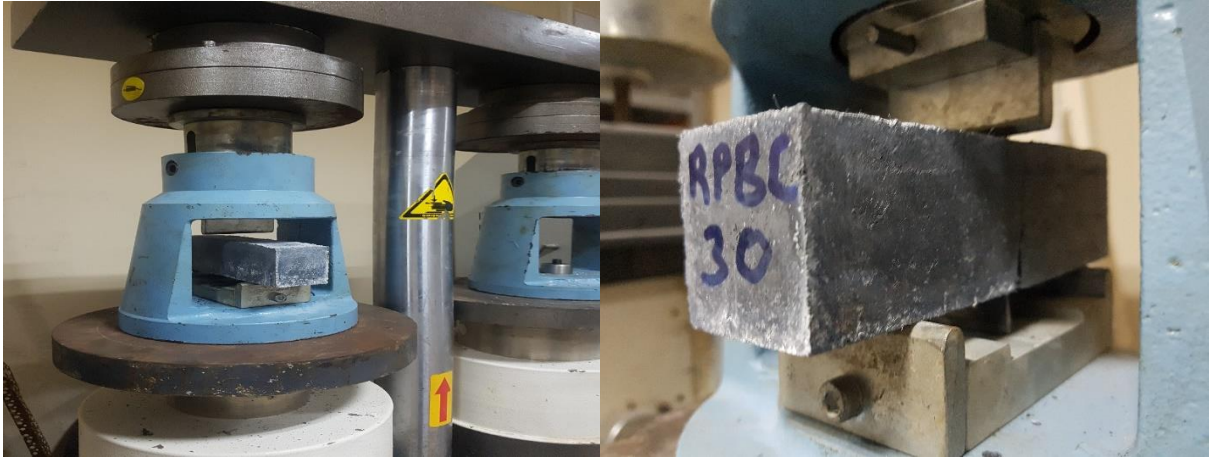
P: Kırılmaya neden olan yük (N),

I: Numunenin mesnetler arası uzaklık (mm),

B: Numune kalınlığı (mm),

H: Numune kesitinin yüksekliği (mm),

a_0 : Çentik boyu (mm).



Şekil 15. Eğilme deneyi.

Basınç deneyi.

Basınç deneyi TS EN 12390-3 deney numunelerinin basınç dayanımının tayinine uygun olarak, 3. gün numunelere pres makinesi ile basınç uygulanarak gerçekleştirildi. Basınç dayanımı formülü denklem (2)'de gösterilmiştir.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (2)$$

f_c : Deney numunesi basınç dayanımını (MPa),

F: Kırılma yükü (N),

A_c : Deney numunesi kesit ortalama alanını (mm^2) belirtmektedir.

Su emme deneyi.

Betonların su emme oranlarının bulunması TS EN 12390-7 standardına göre yapılmıştır. Çalışmada Ø100×50 mm ebatlarındaki silindir numuneler 2 gün boyunca etüv programına tabii tutulduktan sonra yaş ağırlıkları (w1) ve Şekil 16’da gösterildiği gibi su içerisindeki havadaki ağırlıkları (w2) 0,001 gr hassasiyetindeki tartı ile tartılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Sonrasında 50°C’de 48 saat boyunca hava sirkülasyonlu etüvde su kaybı değişmeyene kadar bekletilen numuneler (w0) tekrar tartılarak ikinci ölçüm yapılmıştır. Su emme hesaplanmasında aşağıda verilen formül kullanılır.

$$S = \frac{w1-w0}{w0} \times 100 \quad (3)$$

$$G = \frac{w1-w0}{w1-w2} \times 100 \quad (4)$$

G: Görünen porozite (%),

S: Kütlece su emme (%),

w0: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (gr),

w1: Numunenin suya doymun ağırlığı (gr),

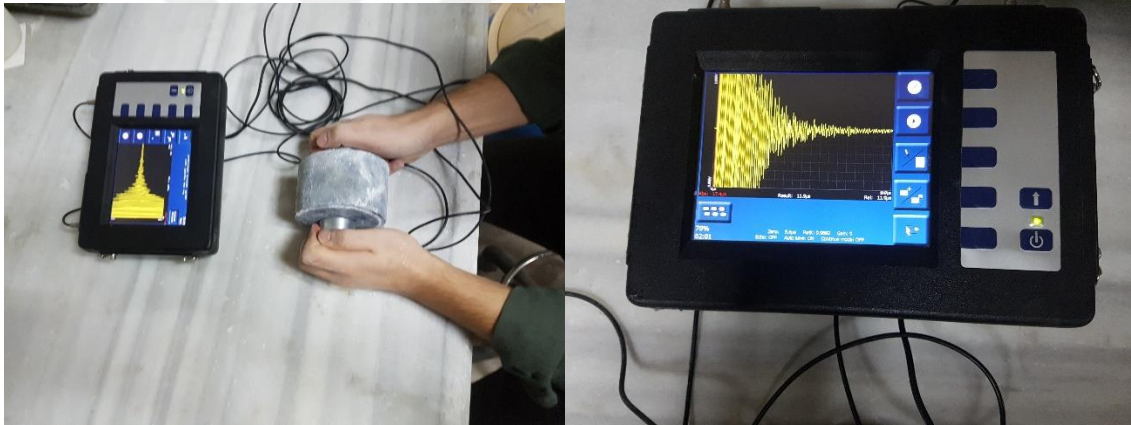
w2: Numunenin su içindeki ağırlığı (gr).



Şekil 16. Su içerisindeki havadaki ağırlıkları tartılan tartı.

Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.

Beton numuneleri fiziksel olarak incelendiğinde en önemli faktörlerin başında beton mukavemeti geldiği bilinmektedir. Ultrases geçiş hızı ise tahribatsız deney yöntemi olarak karot almadan ve yapıya hasar vermeden ultrasonik yöntem ile dayanım belirlemede kullanılmaktadır. Ultrases geçiş hızı ile beton içerisindeki çatlak ve boşluk oluşumu hakkında bilgi edinilmektedir. Beton numuneler içerisine gönderilen ultrases geçiş hızıyla basınç dayanımları arasında bağıntı güçlü bir bağlantı olduğu bilinmektedir (Uyanık, & Tezcan, 2012). Yapılan çalışmada Ø100×50 mm boyutlarında silindir numuneler kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Numuneler su emme deneyi sonrasında ultrases geçiş hızı deneyine tabi tutulmuştur. Silindir olarak üretilen numuneler öncelikle tozlardan arındırılmış ve jel ile temizlenmiştir. Sonrasında numuneler ile sensör arasında boşluk kalmayacak şekilde jel ile tam temas sağlanarak ölçümler yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyine ait bir görüntü Şekil 17’de gösterilmiştir. Yapılan deneyde sonuçlar bir numune için üç farklı ölçüm yapılarak ortalama değerleri hesaplanarak kaydedilmiştir.



Şekil 17. Ultrases geçiş hızı deneyine ait bir görüntü.

Ultrases geçiş hızı deneyinde silindir numunenin bir yüzünden gönderilen ses dalgasının diğer yüzeye ulaşma süresi ölçülmüştür. Sonrasında beton numunesi arasındaki mesafe ölçülerek denklem (5) kullanarak sonuçlar kaydedilmiştir (Meterials, 2016).

$$v = \frac{L}{t} \times (10^3) \quad (5)$$

v: Ultrases geçiş hızı (km/s),

L: Beton numunenin yüzeyleri arasındaki mesafe (m),

t: Ultrasonik cihazda kaydedilen süre (µs).

Betonun ultrases geçiş hızı deneyi sonuçlarının belirlenmesi amacıyla IS 13311 (Standard, 1992) standartlarına göre sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. *Ultrases Geçiş Hızı Deneyi IS 13311 Standartlarına Göre Sınıflandırma.*

Ultrases Geçiş Hız (km/s)	Beton Kalitesi
>4,5	Mkemmell
3,5-4,5	İyi
3,0-3,5	Orta
<3	Kötü

Kılcal su emme deneyi.

Her bir karışım için Ø100×50 mm silindir numuneler, sabit ağırlığa gelinceye kadar şekil 18’de gösterildiğı gibi 50°C±5’te 3 gün boyunca hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir.



şekil 18. Hava sirkülasyonlu etüv.

Deney numuneleri su ile temas edecek olan kısımlarının çevresi buharlaşmayı engellemek amacıyla şekil 19’da gösterildiğı gibi yüksek su geçirmezlik zelliğıne sahip silikonla kaplanmıştır. Numuneler deneye tabi tutulması için özel düzenek hazırlanmış ve kap numune taban alanına su temas edecek şekilde 2-3 mm geçecek şekilde su ile doldurulmuştur. Sonra 3 gün etüvde bekleyen numuneler silikon ile kaplandıktan sonra 0,01 g hassasiyetteki tartı ile ilk ağırlıkları tartılmış ve deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Numuneler daha sonra ASTM C 1585 standardına uygun olarak 1, 5, 10, 20 ve 30. dakikada, 1, 2, 3, 4, 5 ve 6. saatte

ve 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8. günlerde bez ile fazla su alınarak ağırlık okumaları yapılmıştır. Deney sonuçları grafiğe aktarılarak birincil ve ikincil kılcallık katsayısı tayin edilip kılcal su emmeleri belirlenmiştir. Kılcal su emme miktarları tayin etmek için excel programı yardımı ile lineer regresyon yöntemiyle kılcallık katsayıları belirlenmiştir.



Şekil 19. Kılcal Su Emme deney düzeneği.

Kapiler su emme sonuçları aşağıdaki denklemle hesaplanır.

$$I = \frac{m_t}{a \times d} \quad (6)$$

I : Kapiler Su emme (mm),

m_t : t süresinde numune ağırlığındaki gram cinsinden değişim (gr),

a : Numunenin suya temas eden alanı (mm^2),

d : Suyun yoğunluğu (1 gr/mm^3).

Kapiler su emme deneyi sonucunda elde edilen veriler aşağıdaki formül kullanılarak birincil ve ikincil kılcallık katsayısı belirlenmiştir.

$$S = \frac{I}{\sqrt{s}} \quad (7)$$

S: Kılcallık katsayısı (mm/ $\sqrt{s}$),

I: Kapiler Su emme (mm),

s: Zaman (s).

Hızlı klorür geçirimliliği.

Bu deney ASTM C 1202 standardında belirtilen kriterlere göre sadece bu deney için tekrardan 50 mm boyunda 100 mm çapında silindir numuneler hazırlanmış ve deney işlemi gerçekleştirilmiştir. Numune kalınlıkları standartlara uygun olarak 50 ± 2 mm olacak şekilde üretilerek silindir numuneler taş kesme makinası kullanılmadan ve herhangi bir zarar verilmeden tasarlanmıştır. Deney numuneleri ön hazırlıklar yapıldıktan sonra klorür geçirimliliği testi için tasarlanan deney cihazına yerleştirilmiştir. Hızlı klorür geçirimliliği cihazının bir hücreğine %3 NaCl çözeltisi diğerine ise %0,3 N NaOH çözeltisi doldurularak %3 NaCl çözeltisi (-) kutbuna, %0,3 N NaOH çözeltisi (+) kutbuna bağlanmıştır. Hızlı klorür geçirgenliği cihazına Şekil 20’de gösterildiği gibi 4 numune bağlanmıştır.



Şekil 20. Hızlı klorür geçirimliliği cihazı.

Numunelere 6 saat boyunca 60 V gerilim uygulanmıştır. Her bir numune için devreden geçen her yarım saatte bir geçen akım okuması yapılarak kaydedilmiştir. Yine standartta belirtilen denklem (8)'den yararlanılarak toplam akım miktarları hesaplanarak kaydedilmiştir.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + 2I_{360}) \quad (8)$$

Burada;

Q: Toplam geçen yük (Coulomb),

I_0 : Gerilim uygulandıktan hemen sonraki akım (A),

I_t : t. dakikada devreden geçen akım (A).

Farklı numune kalınlıkları standartlara uygun olarak 50 ± 2 mm olacak şekilde yapılmasına rağmen ± 2 mm ile oluşan kalınlık farkları ise yine ASTM C 1202 standardına uygun olarak denklem (9) kullanılarak düzeltmeler yapılmıştır.

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{x}{50}\right) \quad (9)$$

Q_s : Düzeltme toplam geçen yük (Coulomb),

Q_x : Numuneden geçen akım miktarı (Coulomb),

x : Standart olmayan numunenin çapı (mm).

Betonun hızlı klorür geçirimsizliği deneyi sonuçlarının belirlenmesi amacıyla ASTM C 1202 standartlarına göre sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırma Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. *Hızlı Klorür Geçirimsizliği Deneyi ASTM C 1202 Standartlarına Göre Sınıflandırma.*

Coulomb	Klorür İyon Geçirgenliği
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

Aşınma deneyi.

Aşınma dayanımı deneyine başlamadan önce Ø100×50 mm silindir numuneler 50 °C’de 48 saat boyunca hava sirkülasyonlu etüvde bekletilmiştir. Sonrasında numune örnekleri 0,01 g hassasiyetteki tartı ile ilk ağırlıkları tartılmış ve Şekil 21’de gösterilen deney düzeneğine yerleştirilmiştir. 197 N kuvvet uygulayan ve 200 devir/dakika hızında dönen aşındırıcıda 2, 4 ve 6 dakika aralıklarında aşınmaya tabii tutulmuştur. Aşınma sonucu ağırlık değişimleri ölçülerek kaydedilmiştir. Her bir numunenin iki yüzeyine de aşınma testi yapılarak, ASTM C 944/ C944M-19 standardında önerilen ortalama kütle kaybı, %’ce hesaplanmıştır. Ayrıca farklı numune kalınlıkları standartlara uygun olması amacı ile 50 mm olacak şekilde kalınlık farkları hesaplanarak düzeltmeler yapılmıştır.



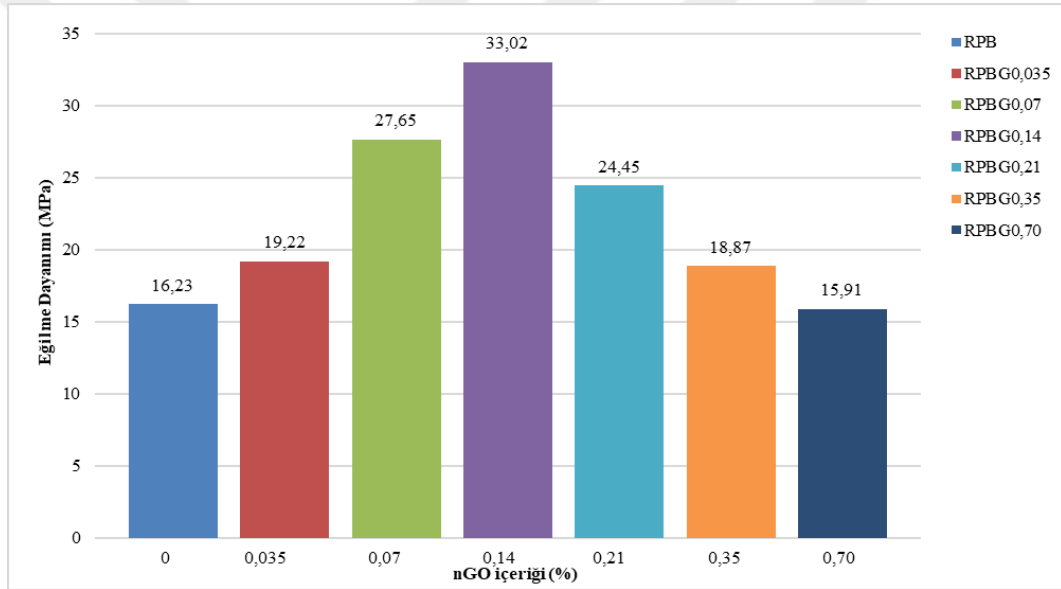
Şekil 21. Aşınma deney düzeneği.

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları ve Tartışma

Eğilme Deneyi

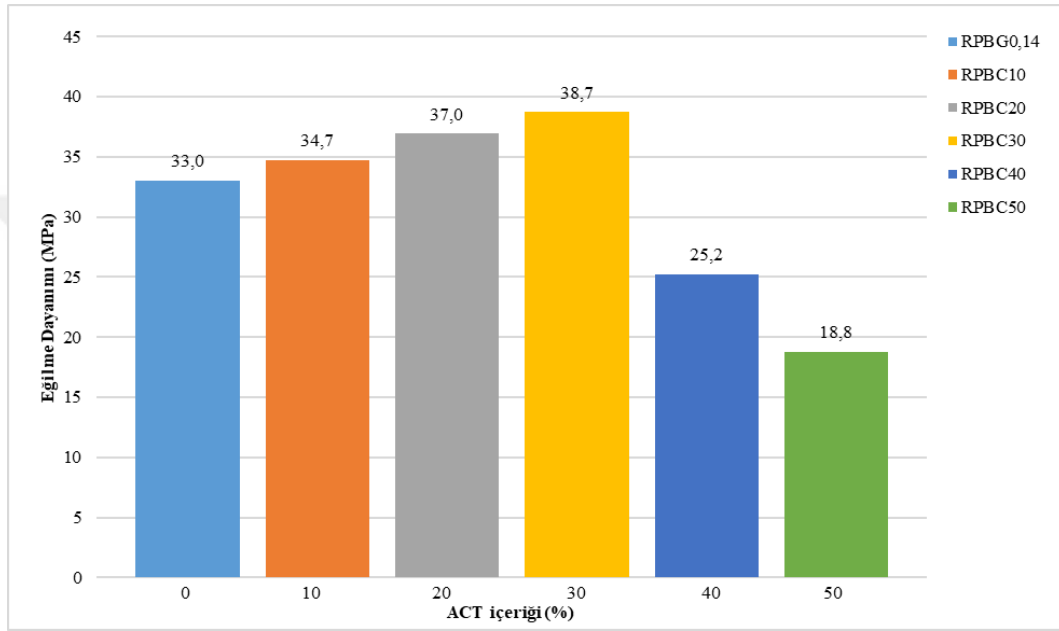
Geleneksel reaktif pudra betonun yapısına çimento ağırlığınca %0,035-0,70 oranında katılan nano grafen oksit ve optimum oran olarak elde edilen %0,14 oranında nGO kullanılarak üretilen yeni kompozitin yapısında kuvars kumuna ikame olarak %10-50 oranına kadar katılan atık cam tozu, üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Prizmatik 40×40×160 mm boyutlarında numunelerin eğilme dayanımları (MPa) nano grafen etkisi incelenen numunelerde Şekil 22’de ve optimum nGO içeren farklı oranlarda kuvars kumuna ikame ACT etkisinin incelendiği numunelerde Şekil 23’te verilmiştir.



Şekil 22. nGO içeren numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.

Nano grafen oksit katkılı numunelerde eğilme dayanımındaki en büyük artış %103 ile RPBGO,14 numunesinde görülmüştür. Matrisin yapısına sadece %0,14 oranında nano grafen oksit katkısıyla 33 MPa’a kadar eğilme dayanımı elde edilmiştir. Nano miktarı arttıkça kontrol numunesinden %0,70 nano içeren numuneye doğru eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 16,23 MPa, 19,22 MPa, 27,65 MPa, 33,02 MPa, 24,45 MPa, 18,87 MPa, 15,91 MPa olarak hesaplanmıştır. Nanopartiküller çimento fazında çekirdek görevi görmesi, yüksek reaktiviteleri nedeniyle çimentonun hidrasyonunu daha da arttırması, dolgu maddesi olarak mikro yapıyı yoğunlaştırarak gözenekliliğin azalmasına yol açar (Sanchez, & Sobolev, 2010). Ayrıca nano grafen oksit malzeme yapısında bulunan O içeren fonksiyonların içerisinde karboksil grubu COOH’nin çimentoda bulunan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girmesiyle çimentonun özelliklerinin iyileştirdiğini belirtmişlerdir (Zhu, Kang, Yang, & Yang, 2017). Grafen oksitin geniş yüzey

alanı birlikte çimentolu kompozitin dayanımları kademeli olarak artmış, bu da büyük yüzey alanına sahip grafen oksit ile birlikte betonun mekanik özellikleri üzerinde, özellikle eğilme dayanımının iyileştirilmesinde önemli etki sağlamıştır. Ancak %0,14 nGO katkısından sonra numunelerin eğilme dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak matrisin yapısındaki nGO nanopartüküllerin etkili dağılamaması olduğu düşünülmektedir (Uygunoğlu, & Şimşek, 2019). Nano boyuttaki grafen oksitin topaklanma (agleramasyon) yapması beton içerisinde reaksiyona girmemiş celppler oluşturmaya ve eğilme dayanımında azalışa neden olmaktadır.



Şekil 23. ACT içeren numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.

Şekil 23'te gösterilen eğilme dayanımı deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek değerlerin RPBC30 karışımında elde edildiği saptanmıştır. Birinci çalışmada eğilme dayanımındaki optimum sonucu veren RPBG0,14 referans numune olarak alınmıştır. Kontrol numunesinden %50 ACT içeren numuneye doğru eğilme dayanımı değerleri sırasıyla 33,02 MPa, 34,72 MPa, 36,95 MPa, 38,73 MPa, 25,23 MPa ve 18,80 MPa olarak hesaplanmıştır. Referans numune karışımına KK yerine ağırlıkça %50 oranına kadar eklenen deneyde ACT yüzdesinin artışı eğilme dayanımını artırmış ve %30 ACT içeriğinde bu artış en yüksek değerine ulaşmıştır. Referans karışıma %30 oranında ACT eklenmesi ile eğilme dayanımında %17'lik artış olduğu gözlenmiştir. %30 ACT içeriğinden sonraki yüzdelerde ise eğilme dayanımı değerleri azalma eğilimine girmiştir. %30'dan fazla KK ikamesi olarak cam tozunun kullanılması betonun eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

Basınç Deneyi

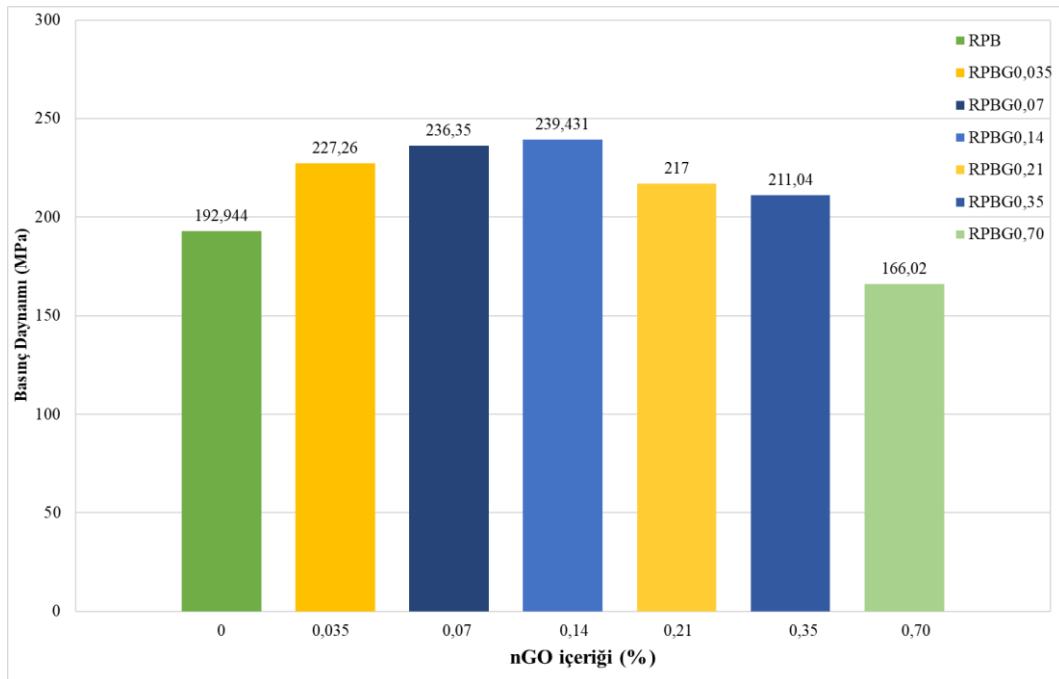
Eğilme deneyi sonucunda ikiye ayrılan prizmatik numunelerin ikiye ayrılan 40×40 mm kesit yüzeylerine sahip numune parçaları ile yapılan basınç dayanım testi sonucu ortalama elde edilen dayanımlar Tablo 13'te verilmiştir.

Tablo 13. Deneyde Kullanılan Numunelerin Ortalama Basınç Dayanımları.

Beton Türü	Basınç Dayanımı (MPa)	
	Sonuçlar	Ortalama
RPB	180,65	192,94
	205,23	
RPBG0,035	227,33	227,26
	227,19	
RPBG0,07	233,44	236,35
	239,26	
RPBG0,14	240,22	239,43
	238,63	
RPBG0,21	217,00	217,01
	217,02	
RPBG0,35	215,24	211,04
	206,84	
RPBG0,70	165,72	166,02
	166,31	
RPBC10	247,75	243,21
	238,67	
RPBC20	268,19	254,51
	240,84	
RPBC30	263,16	258,9
	254,65	
RPBC40	245,20	239,08
	232,97	
RPBC50	196,33	201,09
	205,86	

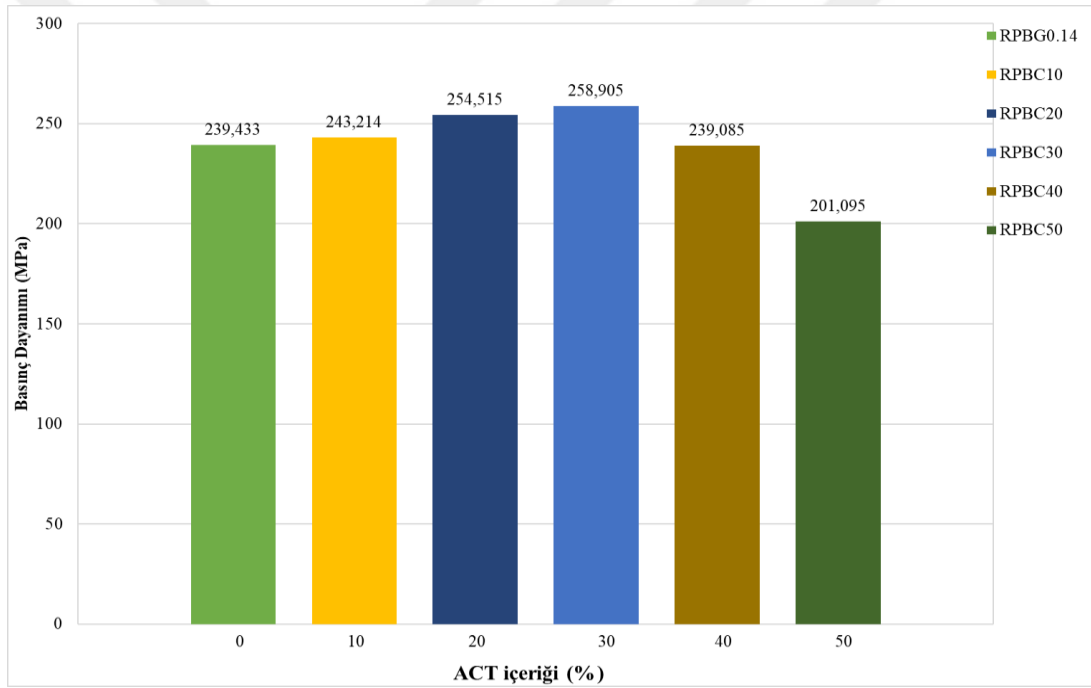
Geleneksel reaktif pudra betonu karışımına çimento ağırlığının %0,035'ten %0,70'e kadar nGO eklenerek üretilen betonların basınç dayanımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneylerde; geleneksel RPB'ye, %0,035 nGO katkısıyla %18, %0,07 nGO

katkısıyla %22, %0,14 nGO katkısı ile %24 daha yüksek değer verdiği gözlemlenmiştir. Ancak %0,14'ten %0,70'e kadar nano grafenoksit katkılı numunelerin basınç dayanımlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. nGO katkılı deneylerin tamamı incelendiğinde ise sadece RPBG0,70 referans numuneye oranla %14 azalma olduğu, diğer üretilen numunelerin hepsi kontrol numune olan RPB'ye göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Grafen oksit çimento hidrate ürünleri arasında yer aldığı düşünüldüğünde yüksek yüzey alanı sayesinde serbest suyu bünyesinde tuttuğu böylelikle beton içerisinde hidratasyonun hızlanmasına ve Ca(OH)_2 üretiminin normal çimentolu kompozitlere göre daha fazla oluşmasına katkıda bulunmaktadır (Chuah, Pan, Sanjayan, Wang, & Duan, 2014). Grafen oksitin su ve çimento için adsorpsiyon (tutunma) alanları sağlaması, grafenoksite absorbe edilen su molekülleri çimentoda daha fazla hidrasyon ürünleri oluşturmak için rezervuarlar oluşturmaktadır (Lv, Ma, Qiu, & Zhou, 2013). Bu özelliği ile deneyde %0,14 nano grafen oksitin kullanılması en optimum sonucu verdiği görülmektedir. Nanomalzemelerin beton içerisinde dağılımı (dispersiyon) ile ilgili çözümler henüz geliştirilme aşamasındadır. Bu bağlamda nano malzeme olan grafen oksit su içinde iyi dağılmış görünse de, çimentolu kompozitlerde iyi dağıldığının garantisi yoktur (Chuah vd., 2014). NGO'nun beton içerisinde homojen dağılımdaki zorlukları ve yüksek sıcaklıklardaki koşulların araştırılması gerekmektedir (Kumar, & Xavior, 2017). Grafen oksitin %0,14 orandan sonra dayanımlarındaki azalmanın sebebi, toz halinde kullanılan grafen oksidin karışım suyuyla manyetik karıştırıcıda ne kadar homojen dağılması sağlanmaya çalışılsa da matris yapısına eklendiğinde topaklaşma göstermiş ve nano boyutta homojen dağılmamış olabilmesi düşünülmektedir.



Şekil 24. nGO içeren numunelerin ortalama basınç dayanımları.

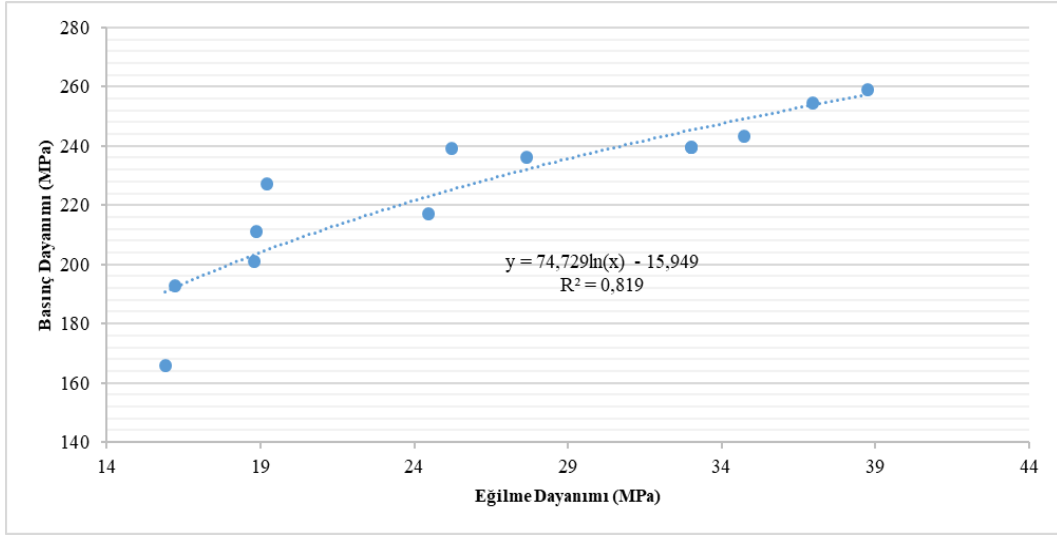
Geleneksel RPB karışımında optimum sonucu veren nGO karışımı referans numune alınarak matriste KK yerine kütlece %10'dan %50'ye kadar Atık Cam Tozu kullanarak üretilen numuneler incelendiğinde en yüksek basınç dayanımına RPBC30 karışımı (258,905 MPa), en düşük dayanım değeri ise RPBC50 karışımına (201,095 MPa) sahiptir. Şekil 25 değerlendirildiğinde RPB'nin yapısına %30'a kadar ACT eklenmesi basınç dayanımını doğrusal olarak arttırdığı, optimum sonucu verdiği görülmektedir. Bunun sebebi numunelerde uygulanan kür sıcaklığının cam tozunun puzolanik aktivitesini artırması olduğu düşünülmektedir. %30 ACT ilavesinden sonra %40 ve %50 ACT ilavesinde basınç dayanımlarında azalma olduğu görülmektedir. Yüksek derecede silis içeriğine sahip olan KK, %30 oranına kadar ACT ile yer değiştirmesi ile basınç dayanımında artış olmasına karşın %30'dan sonra Ca/Si oranının daha fazla olduğu ACT'de C-S-H fazı düşmesi ile dayanım değerlerinde azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 25. ACT içeren numunelerin ortalama basınç dayanımları.

Eğilme ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Geleneksel RPB içerisinde nano grafen oksit içeren numuneler ve nGO etkisinde en ideal sonucu veren numune referans alınarak eklenen ACT etkisinin ortalama basınç dayanımı ve eğilme dayanımları arasındaki bağıntılar Şekil 26'da verilmiştir.



Şekil 26. nGO ve ACT içeren numunelerin eğilme dayanımı-basınç dayanımı grafiği.

RPB mikro çelik lifler ile güçlendirmesi basınç dayanımına ek özellikle eğilme dayanımındaki artış daha etkilidir (Topçu, & Karakurt, 2005). Dolayısıyla RPB'nin eğilme dayanımındaki yüksek iyileşmeden dolayı basınç dayanımı ile ilişkilendirildiğinde kolerasyon katsayısının düşük oranlarda çıkması beklenen bir durumdur. Numunelerin deney sonuçları incelendiğinde eğilme dayanımları (σ) ve basınç dayanımları (f_c) arasında korelasyon katsayısı (R^2) 0,82 olan (10) bağıntısı bulunmaktadır.

$$f_c = 74,729 \ln(\sigma) - 15,949 \quad (10)$$

Yoğunluk ve Su Emme Sonuçları

Ø100×50 mm boyutlarında üretilen silindir numuneler su emme deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deney sonucu nano grafen oksit etkisinin incelendiği numuneler için Tablo 14'te ve nGO katkılı numunelerde atık cam tozu etkisinin incelendiği numuneler için ise Tablo 15'te verilmiştir. Normal betonların kütlece su emme oranı incelendiğinde porozite yaklaşık %9 civarındadır (Özdemir, 2002). Çalışmadaki su emme yüzdeleri normal betonla kıyaslandığında yaklaşık 70 kat daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 14. nGO Katkılı Numunelerin Su Emme Deneyi Sonuçları.

Numune Kodu	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yoğunluk (kg/dm ³)
RPB	0,242	0,595	2,455
RPBG0,035	0,179	0,448	2,502
RPBG0,07	0,169	0,423	2,502
RPBG0,14	0,135	0,339	2,516
RPBG0,21	0,166	0,414	2,490
RPBG0,35	0,208	0,521	2,501
RPBG0,70	0,216	0,537	2,480

Tablo 14’te su emme oranları incelendiğinde geleneksel RPB karışımına %0,14 oranında nGO eklenmesi ile %80 oranında iyileşme olduğu gözlenmiştir. Ayrıca bu katkı ile kompozitteki boşlukların azaldığı görülmektedir. Grafen oksidin betonda kullanım oranının artmasıyla C-S-H ürünleri arasında boşluk oranının doğrusal olarak arttırdığı ve böylece betonda boşluk yapısına neden olduğu ifade edilmektedir (Chuah vd., 2014). Tablo14’te de gösterildiği gibi matrisin yapısına %0,035’ten %0,14 oranına kadar nano grafen oksit eklenmesi su emme yüzdesini düşürmesine rağmen %0,14’ten sonra artan nano grafen oksit miktarıyla su emme yüzdelерinde artış gözlenmiştir.

Tablo 15. ACT Katkılı Numunelerin Su Emme Deneyi Sonuçları.

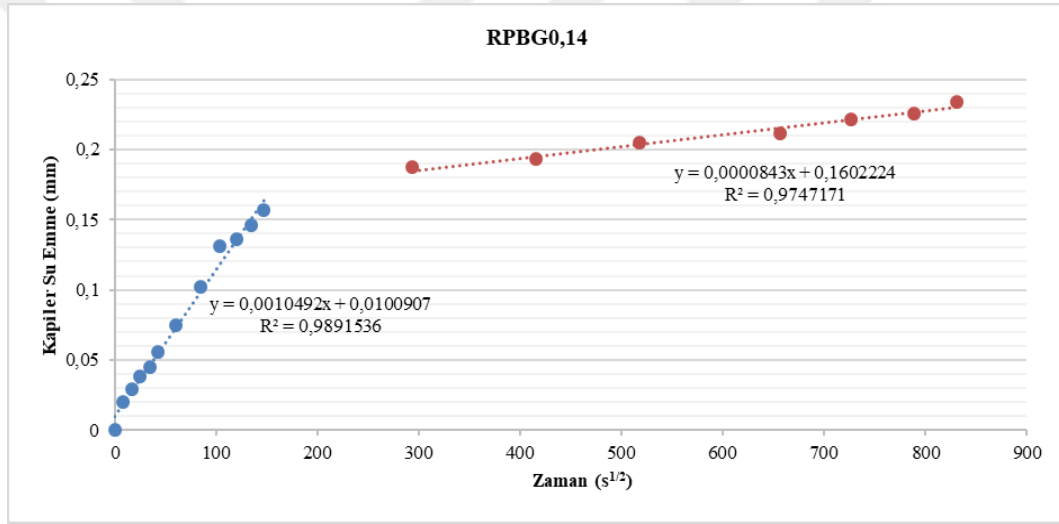
Numune Kodu	Su Emme (%)	Görünen Porozite (%)	Yoğunluk (kg/dm ³)
RPBG0,14	0,135	0,339	2,516
RPBC10	0,130	0,325	2,507
RPBC20	0,127	0,318	2,512
RPBC30	0,124	0,313	2,520
RPBC40	0,170	0,421	2,483
RPBC50	0,179	0,445	2,482

Referans numuneye eklenen ACT kullanımının bir sonucu olarak üretilen numunelerin su emme yüzdeleri Tablo 15’te gösterilmiştir. ACT’nin sertleşmiş beton yoğunluğu üzerinde

doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu bağlamda referans numune ile sırasıyla su emme yüzdeleri RPBG0,14 0,135, RPBC10 0,130, RPBC20 0,127, RPBC30 0,124, RPBC40 0,170, RPBC50 0,179 olarak hesaplanmıştır. Referans numuneye %30 oranında ACT katkısıyla %9 oranında daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Fakat ACT oranı %30 sonrasında su emme yüzdelerinde artış olduğu gözlenmiştir.

Kılcal Su Emme Deneyi

ASTM C 1585 standardı esas alınarak gerçekleştirilen kılcal su emme deneyi sonuçlarına uygulanan lineer regresyon ile elde edilen kılcallık katsayıları çalışmanın birinci bölümü için Tablo 16'da ve ikinci bölümü için Tablo 17'de verilmiştir. Örnek olarak basit doğrusal regresyon analizi ile yapılan RPBG0,14 karışımı Şekil 27'de gösterilmiştir. Yapılan deneyde benzer basit doğrusal regresyon analizi bütün numuneler için yapılmıştır.



Şekil 27. RPBG0,14 karışımı kapiler su emme katsayısı.

Beton numunelerinde agrega boyutları, boyutlar ve kapiler boşluklar kılcal su emme oranını etkilediği bilinmektedir. Yüksek dayanımlı betonlar değerlendirildiğinde su/çimento oranının düşük olmasıyla birlikte kılcal su emme değerleri de düşük çıkmaktadır. Agrega boyutlarının düşük olması, matris yapısında iri agrega bulunmaması ve silis dumanı kullanılması ile kılcal su emme katsayısı daha düşük olmaktadır (Özalp, 2016). Yüksek dayanımlı beton sınıfına giren RPB'nin kapiler boşluk oranının düşük olması beklenen bir durumdur. Bu duruma bağlı olarak numunelerin birincil ve ikincil kapiler katsayıları arasında büyük farklar oluşmamıştır. Tablo 15 incelendiğinde geleneksel RPB karışımına belirli orana kadar nano grafen oksit eklenmesi ile kompozitte boşlukların azalmasında etkili olduğu görülmektedir. Çalışmada birincil ve ikincil kılcallık katsayısı incelendiğinde en iyi sonuçlar geleneksel reaktif pudra beton karışımına çimento ağırlığınca 0,14 nGO uygulanan numunede elde edilmiştir.

Tablo 16. nGO İçeren Numunelerin Lineer Regresyon ile Elde Edilen Kılcallık Katsayıları.

Numune Kodu	Birincil Kılcallık Katsayısı (mm $/\sqrt{s}) \times 10^{-3}$	İkincil Kılcallık Katsayısı (mm $/\sqrt{s}) \times 10^{-3}$
RPB	1,429	0,112
RPBG0,035	1,402	0,097
RPBG0,07	1,317	0,095
RPBG0,14	1,049	0,084
RPBG0,21	1,102	0,097
RPBG0,35	1,255	0,098
RPBG0,70	1,294	0,106

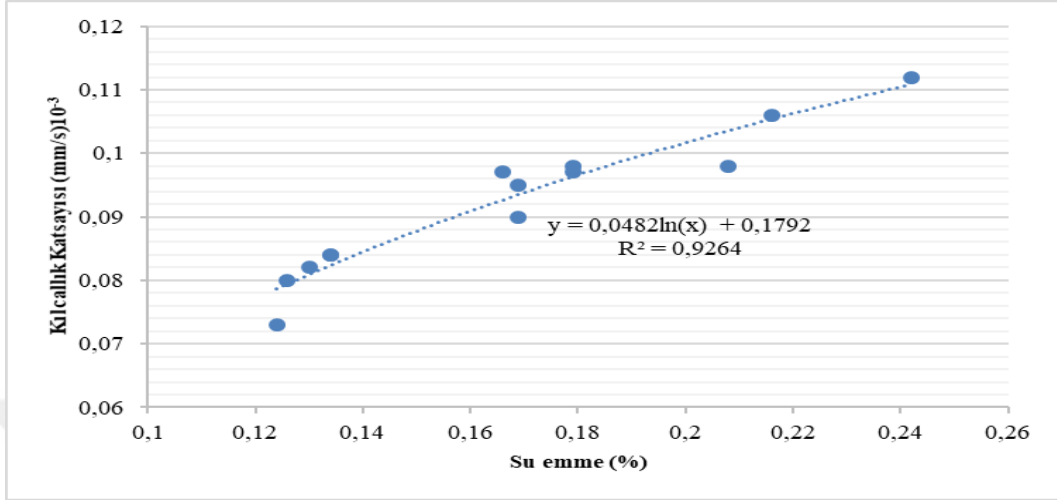
Çalışmanın ikinci bölümünde nano grefen oksit katkısı ile en iyi sonuçları veren RPBG0,14 numunesi referans numune olarak alınan ve matrisin yapısına atık cam tozu katılarak üretilen numunelerin kılcallık katsayıları incelenmiştir. Tablo 17’de de görüldüğü gibi matris yapısına ACT eklenmesi kapiler boşluk su emme oranına olumlu katkıları olduğu belirgin şekilde görülmektedir. Fakat belirli orandan sonra matris yapısında ACT oranının artması kapiler su emme açısından daha küçük boşluk oranının azalmasında etkili olmadığı anlaşılmıştır. Kılcallık katsayıları incelendiğinde referans numuneye oranla en iyi sonucu RPBC30 (0,992 (mm/ $\sqrt{s}) \times 10^{-3}$) numunesi vermiştir. Matris yapısında %30 dan fazla ACT eklenmesi ise boşluk oranını arttırmıştır.

Tablo 17. ACT İçeren Numunelerin Lineer Regresyon ile Elde Edilen Kılcallık Katsayıları.

Numune Kodu	Birincil Kılcallık Katsayısı (mm $/\sqrt{s}) \times 10^{-3}$	İkincil Kılcallık Katsayısı (mm $/\sqrt{s}) \times 10^{-3}$
RPBG0,14	1,049	0,084
RPBC10	1,041	0,082
RPBC20	1,007	0,080
RPBC30	0,992	0,073
RPBC40	1,155	0,090
RPBC50	1,192	0,098

Su Emme ve Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları Arasındaki İlişki

nGO ve ACT içeren numunelerin su emme yüzdeleri ve kılcal su emme deneyi ikincil kılcallık katsayısı sonuçları arasındaki bağıntılar Şekil 28’de verilmiştir. Şekil 28’de de görüleceği gibi kılcal su emme katsayısı ile su emme yüzdeleri doğru orantılıdır.



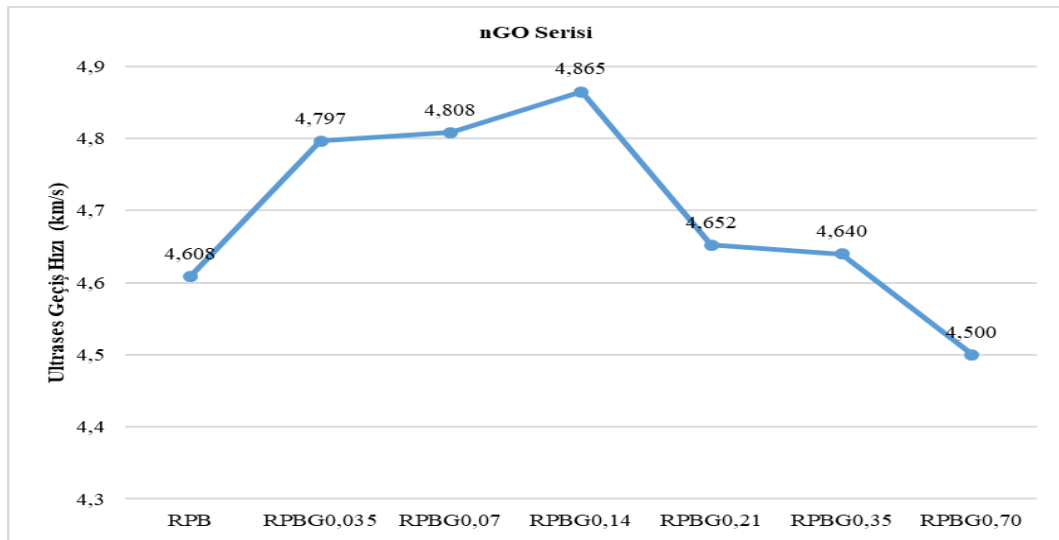
Şekil 28. nGO ve ACT içeren numunelerin kapiler su emme-su emme grafiği.

Numunelerin deney sonuçları incelendiğinde su emme (s) ve kılcallık katsayısı (I) arasında korelasyon katsayısı (R^2) 0,93 olan (11) bağıntısı bulunmaktadır.

$$s = 0,0482 \ln(I) + 0,1792 \quad (11)$$

Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ø100×50 mm boyutlarındaki silindir numunelere ait ultrases geçiş hızı (UGH) deney sonuçları Şekil 29 ve Şekil 30’da, ultrases geçiş hızı sonuçlarının pratik değerlendirmesi IS 13311 standartlarına göre sınıflandırılmış Tablo 18 ve Tablo 19’da verilmiştir. Beton matrisinin içerisinde geçen akım ile beton basınç dayanımı arasında doğrudan ilişki olmamasına rağmen UGH ile betonun boşluk miktarı arasında ilişki kurulabildiği literatür çalışmalarıyla bilinmektedir (Kozak, & Ünal, 2014). Bu konudan yola çıkarak yoğunluğu fazla olan betonda diğer bir deyişle içerisinde daha az boşluk bulunan betonda ultrases geçiş hızı daha kısa olması beklenmektedir. Çalışmadaki tüm deney numunelerin UHG sonuçları incelendiğinde test edilen numunelerin tamamı IS 13311 standartlarına göre sınıflandırıldığında ‘mükemmel’ kategorisinde değerlendirilmektedir (Standard, 1992).

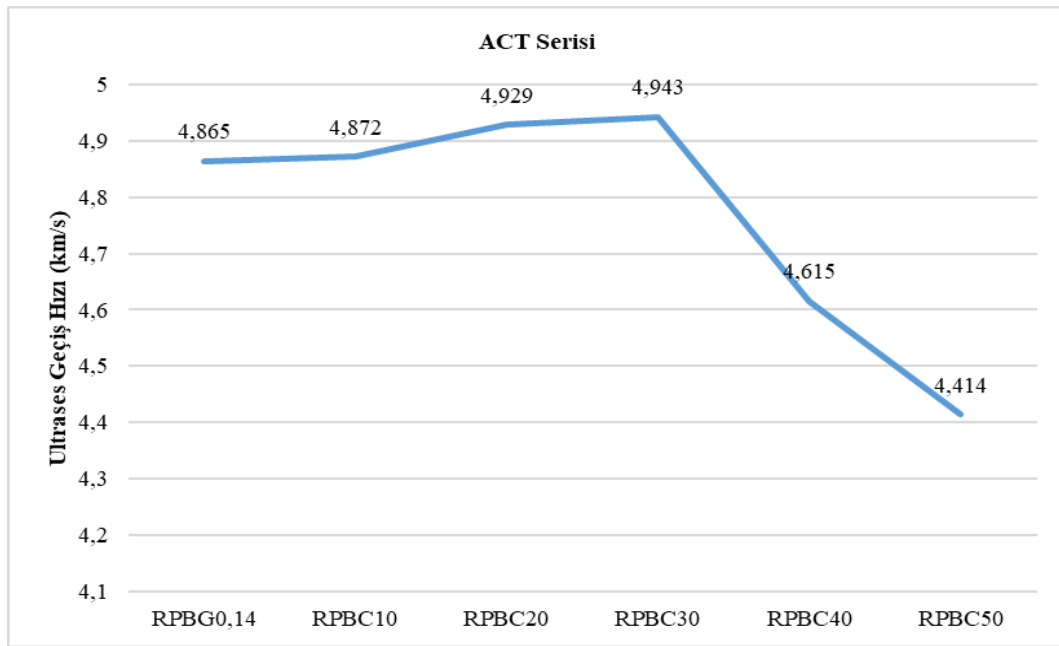


Şekil 29. nGO içeren numunelerin ortalama UGH deney sonuçları.

Tablo 18. nGO İçeren Numunelerin UGH Deneyi IS 13311 Standartlarına Göre Sınıflandırma.

Numune Kodu	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Beton Kalitesi
RPB	4,608	Mükemmel
RPBG0,035	4,797	Mükemmel
RPBG0,07	4,808	Mükemmel
RPBG0,14	4,865	Mükemmel
RPBG0,21	4,652	Mükemmel
RPBG0,35	4,640	Mükemmel
RPBG0,70	4,500	Mükemmel

Şekil 31 incelendiğinde referans betonunun ve çimento miktarına kütlece çeşitli oranlarda, nano grafen oksit eklenerek üretilen diğer numunelerin ultrases geçiş hızı değişiklik göstermiştir. 2 gün boyunca $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ısıtılma tabii tutulan numunelerde en iyi sonucu RPBG0,14 numunesi vermiştir. Eklenen grafen oksitin tane boyutu, çimento tane boyutundan çok daha küçük olduğu için agrega-çimento ara yüzeyinde küçük boşlukları doldurarak filler etkisi oluşturduğunu daha boşluksuz ve nano fiber etkisi ile sıkı bir agrega-bağlayıcı ara yüzeyi oluşturmuştur.



Şekil 30. ACT içeren numunelerin ortalama UGH deney sonuçları.

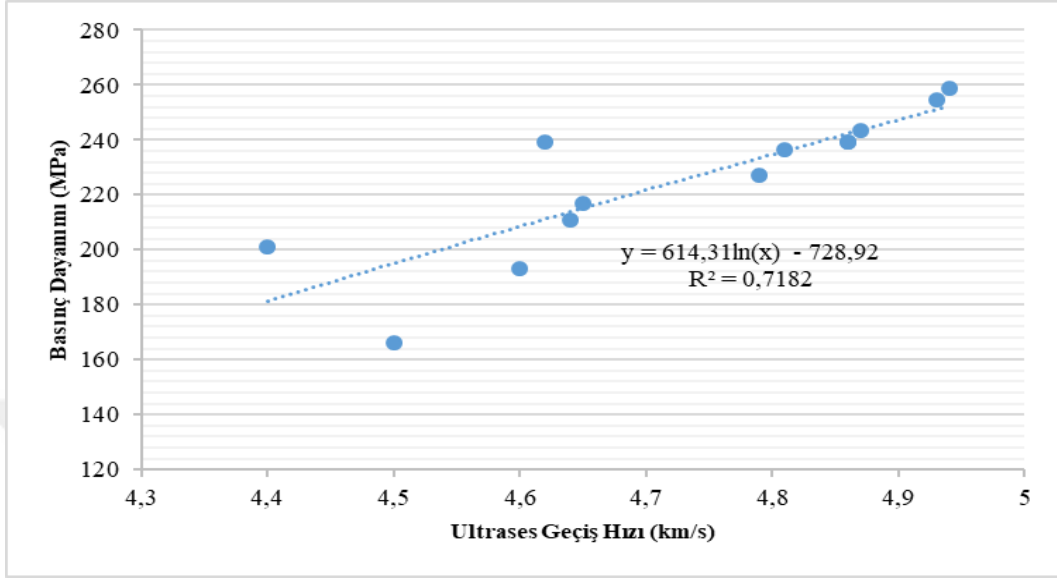
Tablo 19. ACT İçeren Numunelerin UGH Deneyi IS 13311 Standartlarına Göre Sınıflandırma.

Numune Kodu	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Beton Kalitesi
RPBG0,14	4,865	Mükemmel
RPBC10	4,872	Mükemmel
RPBC20	4,929	Mükemmel
RPBC30	4,943	Mükemmel
RPBC40	4,615	Mükemmel
RPBC50	4,414	İyi

nGO katkılı numunelerin ACT etkisi ultrases geçiş hızı km/s cinsinden Şekil 30’da verilmiştir. Atık cam tozunun ultrasonik hız değerleri basınç dayanımları ile benzer davranış göstermiştir. Kontrol karışımı ile UGH değerleri %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 ACT ikamesi için sırası ile sırası ile 4,865 km/s, 4,872 km/s, 4,929 km/s, 4,943 km/s, 4,615 km/s ve 4,414 km/s olarak hesaplanmıştır. ACT yüzdesi arttıkça UGH hız değeri de artmaktadır. Bu artış %30 ACT kullanımında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Tablo 18’de IS 13311 standartlarına göre sınıflandırması yapılan numunelerde 4,414-4,865 km/s aralığında sonuçlar “mükemmel ve iyi” olarak değerlendirilmektedir. Ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde atık cam tozu mineralinin geliştirici bir etkisi olduğu açıkça görülmektedir.

Ultrases Geçiş Hızı ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Nano grafen oksit içeren numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki kullanılarak analizler yapılmıştır. Yapılan regresyon analizinde UGH ve basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 33 ve Şekil 34’te verilmiştir



Şekil 31. nGO ve ACT içeren numunelerin UGH ve basınç dayanımı grafiği.

Beton basınç dayanımının ultrases geçiş hızı ile tahmin edilmesi için veriler arasında modelleme yaparak veriler arasında regresyon analizi yapılmıştır. Betonun ultrases geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki incelendiğinde, beton yoğunluğu ve boşluk oranları düşük betonun UGH değerleri ve basınç dayanımı arasında doğrusal orantı olması doğal bir sonuçtur. Şekil 31’de de görüleceği gibi UGH değeri arttıkça basınç dayanımı doğru orantılı olarak artmıştır. nGO ve ACT içeren numunelerin UGH değerleri (v) ve beton basınç dayanımı (f_c) arasında korelasyon katsayısı (R^2) 0,72 olarak elde edilmiştir. Bu denklemde UGH km/s ve f_c MPa birimindedir.

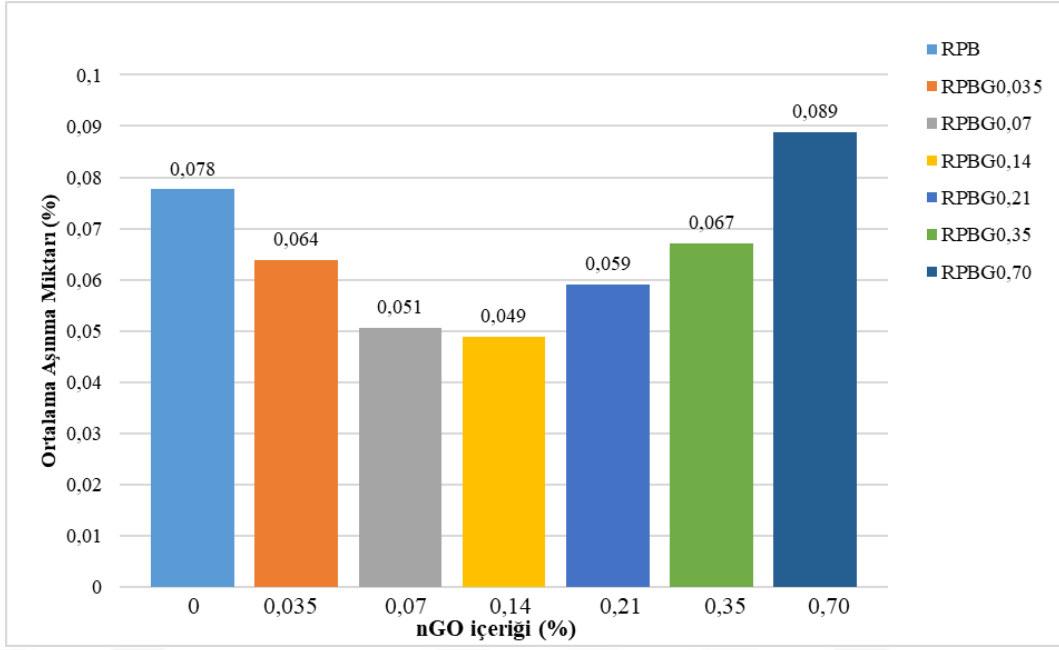
$$V = 614,31 \ln(f_c) - 728,92 \quad (12)$$

Aşınma Deneyi

ASTM C 944/ C944M-19 standartlarına göre yapılan deney sonuçları nano grafen oksit katkılı numuneler için Tablo 20’de ve Atık Cam tozu etkisinin incelendiği numuneler için ise Tablo 21’de verilmiştir.

Tablo 20. nGO İçeren Numunelerin ASTM C 944/ C944M-19 Standartlarına Göre Yapılan Ortalama Aşınma Deneyi Sonuçları.

Numune Kodu	Numune	Tekrar	Ortalama Aşınma Kaybı (%)
RPB	Üst	3	0,075
	Alt	3	0,080
	Genel Ortalama		0,078
RPBG0,035	Üst	3	0,055
	Alt	3	0,072
	Genel Ortalama		0,064
RPBG0,07	Üst	3	0,045
	Alt	3	0,057
	Genel Ortalama		0,051
RPBG0,14	Üst	3	0,042
	Alt	3	0,056
	Genel Ortalama		0,049
RPBG0,21	Üst	3	0,064
	Alt	3	0,054
	Genel Ortalama		0,059
RPBG0,35	Üst	3	0,068
	Alt	3	0,066
	Genel Ortalama		0,067
RPBG0,70	Üst	3	0,094
	Alt	3	0,083
	Genel Ortalama		0,089

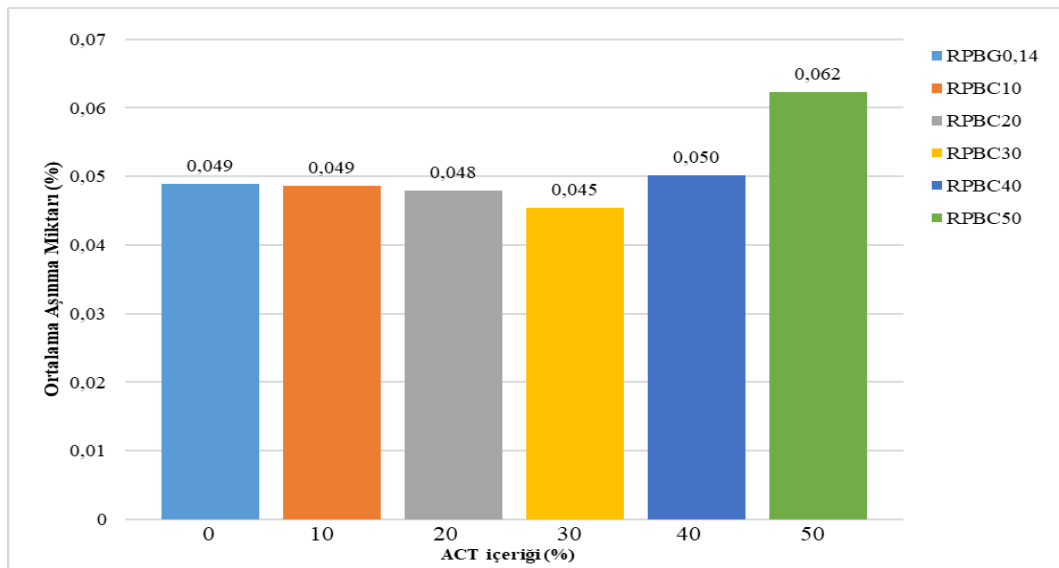


Şekil 32. nGO içeren numunelerin ortalama aşınma deneyi sonuçları.

Beton aşınma direnci yüksek olması basınç dayanımlarında yüksek olduğu anlamına gelmektedir (Gökçer, Yıldız, & Keleştemur, 2015, Mayıs). Şekil 32 incelendiğinde çimento miktarının kütlece %0,14 oranında kullanılan nano grafen oksitin ağırlıkça kayıp oranının en düşük çıktığı, betonun aşınmasına en olumlu etki yapan oran olarak görülmüştür. nGO eklenen numunelerde en yüksek değere (aşınma kaybı düşük) RPB-G0,14 karışımında çıkmıştır. En düşük (yüksek aşınma kaybı) sonuç ise RPB-G0,70 karışımında vermiştir. %0,14 nGO içerikli RPB betonunun kontrol RPB betonuna göre yaklaşık %35 oranında daha az aşınma kaybına sahip olduğu bulunmuştur.

Tablo 21. ACT İçeren Numunelerin ASTM C 944/ C944M-19 Standartlarına Göre Yapılan Ortalama Aşınma Deneyi Sonuçları.

Kod	Numune	Tekrar	Ortalama Aşınma Kaybı (%)
RPBG0,14	Üst	3	0,042
	Alt	3	0,056
	Genel Ortalama		0,049
RPBC10	Üst	3	0,045
	Alt	3	0,052
	Genel Ortalama		0,049
RPBC20	Üst	3	0,046
	Alt	3	0,050
	Genel Ortalama		0,048
RPBC30	Üst	3	0,043
	Alt	3	0,048
	Genel Ortalama		0,045
RPBC40	Üst	3	0,049
	Alt	3	0,051
	Genel Ortalama		0,050
RPBC50	Üst	3	0,062
	Alt	3	0,063
	Genel Ortalama		0,062



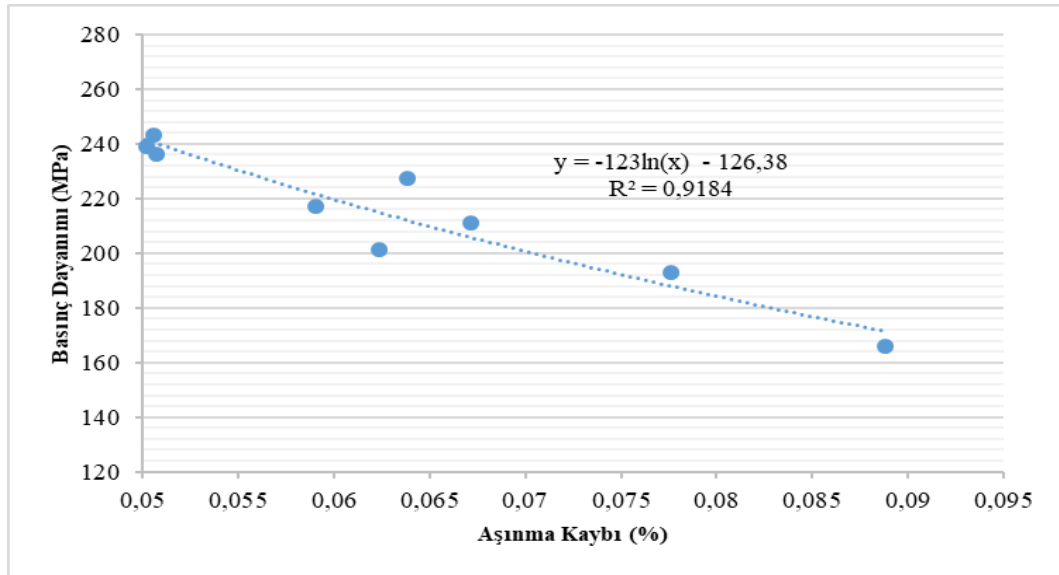
Şekil 33. ACT içeren numunelerin ortalama aşınma deneyi sonuçları.

Deneysel çalışmalarda elde edilen referans numunede kullanılan KK yerine belirli oranlarda eklenen ACT'ye ait ortalama aşınma kaybı değerleri Tablo 21 ve Şekil 33'te verilmiştir. ASTM C 944/ C944M-19 standartlarına uygun olarak yapılan deneyde deney numuneleri aşınmaya maruz bırakılmıştır. Deney numunelerinin aşınma kayıpları, atık cam tozunun artması ile azalırken, %30 ACT ilavesinden sonraki üretilen numunelerde ise aşınma kayıpları tekrar artmaya başlamıştır. ACT artışı aşınma kaybını azaltmıştır. ACT'nin yüksek sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanmasıyla reaksiyonu sonucu boşlukları doldurması malzemeyi daha dayanıklı hale getirmiştir.

Aşınma ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Yapılan çalışmalar incelendiğinde betonun basınç mukavemeti ile diğer özellikleri arasında bir bağ olduğu bilinmektedir. Bu çalışmalar sonucunda betonun eğilme, aşınma, kılcal su emme gibi parametrelerin basınç dayanımı ile aynı yönde değiştiği gözlemlenmiştir (Demir, 2005). Şekil 34'te de görüldüğü gibi geleneksel RPB'de çimento yerine ağırlıkça eklenen nano grafen oksit ve optimum nGO elde edilmesiyle oluşan numuneye %0-50 oranında ACT eklenmesiyle aşınma direnci ve basınç dayanımı arasındaki ilişki korelasyon katsayısı (R^2) 0,92 olarak hesaplanmıştır. Bu durum örneklerin basınç dayanımı ile aşınma direnci arasındaki ilişkinin daha kuvvetli olduğunu ortaya koymuştur.

$$f_c = -138,2\% - 151,73 \quad (13)$$



Şekil 34. nGO ve ACT içeren numunelerin basınç dayanımı ve aşınma kaybı grafiği.

Hızlı Klorür Geçirirliği Deneyi

Deneysel çalışmada üretilen kompozitler üzerinde gerçekleşen hızlı klorür geçirirliği deneyi sonucu elde edilen ölçümler ve ASTM C 1202 standardına göre yapılan sınıflandırılması

nano grafen oksit katkılı numuneler için Tablo 22’de ve optimum nGO elde edilmesiyle oluşan RPB’ye %0-50 oranında ACT eklenmesiyle numuneler için ise Tablo 23’te verilmiştir.

Tablo 22. nGO İçeren Numunelerin ASTM C 1202 Standardına Göre Sınıflaması.

Beton Türü	Yük (Coulomb)	Geçirgenlik Sınıfı
RPB	229,00	Çok Düşük
RPBG0,035	221,34	Çok Düşük
RPBG0,07	190,12	Çok Düşük
RPBG0,14	102,00	Çok Düşük
RPBG0,21	113,68	Çok Düşük
RPBG0,35	203,84	Çok Düşük
RPBG0,70	247,00	Çok Düşük

ASTM C 1202 standartına göre ölçülen elektriksel yükün 1000 Coulomb’dan düşük olması beton klorür geçirgenliğinin ihmal edilebilir seviyede çok düşük olduğunu göstermektedir. Tablo 22 incelendiğinde 48 saat ısıtılma işlemi sonunda geleneksel RPB ile çimento ağırlığınca %0,14 nGO katkılı RPBG0,14 karşılaştırıldığında klorür iyon geçirimsizliğinde %45 oranında bir azalma göstermiş olduğu görülmektedir. Çimento ağırlığınca %0,14 nGO katkı oranına kadar azalmaya gösteren numuneler %0,14 oranından sonra tekrar artış göstermiştir. Ağırlıkça %0,70 nGO katkılı numune ise RPBG0,70 geleneksel RPB’ye göre %8 artış olduğu görülmektedir.

Tablo 23. ACT İçeren Numunelerin ASTM C 1202 Standardına Göre Sınıflaması.

Beton Türü	Yük (Coulomb)	Geçirgenlik Sınıfı
RPBG0,14	102,00	Çok Düşük
RPBC10	102,00	Çok Düşük
RPBC20	94,08	İhmal Edilebilir
RPBC30	92,00	İhmal Edilebilir
RPBC40	111,72	Çok Düşük
RPBC50	168,00	Çok Düşük

Tablo 23 ise kuvars kumuna ikame edilen atık cam tozunun hızlı klorür geçirimsizliği üzerindeki etkisi görülmektedir. Atık cam tozu oranının %10’dan % 50’ye kadar kullanılan kompozitlerden elde edilen en düşük klor iyonu geçirimsizliği değeri RPBC30 karışımında olup

92 Coulomb olarak ölçülmüştür. RPBC10, RPBC20, RPBC30 harçlarından elde edilen yüzde iyileşme değerleri kontrol harcına göre %2, %6 ve %10 olarak hesaplanmıştır. %30 ACT oranına kadar klorür iyonu geçirimsizliğinde doğrusal olarak yaklaşık %10 oranında iyileşme olduğu görülmektedir. RPBC40 ve RPBC50 oranları referans karışıma oranla azalış olduğu görülmüştür. Bunun nedeni atık cam tozu partiküllerinin etrafında yoğun C-S-H jel çerçevesi oluşması ve çimento matrisini yoğunlaşması olabilir. (Omran, Etienne, Harbec & Tagnit-Hamou, 2017). Bununla birlikte silis içeriği bakımdan zengin olan ACT matris içerisinde %30'a kadar kullanılması betonda gözeneklilik oranını azaltmaktadır.



BEŞİNCİ BÖLÜM

Sonuç ve Öneriler

Sonuçlar

Bu çalışmada geleneksel RPB kompozit matriste kullanılan çimento yerine ağırlıkça %0.035-0,70 oranında nGO eklenen numunelerin ve ACT'nin RPB'de agrega olarak kullanılan KK yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar ve bu malzemenin betonda kullanımı ile ilgili öneriler aşağıda sıralanmıştır.

NGO katkısı ile beton numunelerin eğilme dayanımındaki artış basınç dayanımındaki artışa oranla daha olumlu sonuçlar vermiştir. NGO katkılı numunelerde geleneksel RPB'nin yapısına sadece %0,14 nGO eklenmesiyle eğilme dayanımında %103 artış olduğu görülmüştür. %0,14 oranında nGO katkısıyla eğilme dayanımında 33 MPa'a kadar eğilme dayanımı elde edilmiştir. nGO'nun betonda dolgu maddesi olarak mikro yapıyı yoğunlaştırarak gözenekliliğin azalmasına yol açtığı ve dayanımı arttırdığı, ayrıca nGO'nun filler etkisi ve nano fiber etkisi ile sıkı bir bağlayıcı etkisi oluşturduğu düşünülmektedir. Ancak %0,14 nGO katkısından sonra numunelerin eğilme dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. KK yerine ağırlıkça %30 ACT eklenmesiyle en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaşmıştır. %30 ACT katkısı ile eğilme dayanımında nGO kadar olmasa da %17 oranında artış olmuştur. %30'dan fazla KK ikamesi olarak cam tozunun kullanılması betonun eğilme dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir.

Geleneksel reaktif pudra betonun basınç dayanımları incelendiğinde, %0,035 nGO katkısıyla %18, %0,07 nGO katkısıyla %22, %0,14 nGO katkısı ile %24 oranında artış olmuştur. %0,14'ten %0,70'e kadar nGO katkılı numunelerin basınç dayanımlarında azalama meydana gelmiştir. Bunun sebepleri olarak nano malzemelerin beton içerisinde homojen dağılmaması ve matris yapısında topaklaşma olabilmesi düşünülmektedir. Atık cam tozu kullanarak üretilen numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde ise RPB'nin yapısına %30'a kadar ACT eklenmesi basınç dayanımını doğrusal olarak arttırmıştır. Bunun sebebi numunelerde uygulanan kür sıcaklığının cam tozunun puzolanik aktivitesini artırması olduğu düşünülmektedir. %30 ACT ilavesinden sonra %40 ve %50 ACT ilavesinde basınç dayanımlarında azalama olmuştur.

Geleneksel RPB içerisinde nano grafen oksit içeren numuneler ve nGO etkisinde en ideal sonucu veren numune referans alınarak eklenen ACT etkisinin ortalama basınç dayanımı ve eğilme dayanımları arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) 0,82 olarak bulunmuştur.

nGO'nun %0,14 ilavesi ile su emme yüzdesi %80 oranında iyileşme olmuştur. ACT'nin su emme yüzdeleri incelendiğinde, Referans numuneye %30 oranında ACT katkısıyla %9 oranında daha iyi sonuç vermesine, ACT oranı %30 sonrasında beton boşluk oranını arttırarak su emme yüzdelerinde artış olmasına neden olmuştur. nGO ve ACT içeren numunelerin su emme yüzdeleri ve kılcal su emme sonuçları arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) 0,93 olarak belirlenmiştir. Kılcal su emme katsayısı ile su emme yüzdeleri yüksek oranda doğru orantılı olduğu kanısına varılmıştır.

Ultrases geçiş hızı sonuçları incelendiğinde test edilen numunelerin tamamı IS 13311 standartlarına göre sınıflandırıldığında 'mükemmel ve iyi' kategorisinde değerlendirilmiştir. Ultrasonik hız değerleri basınç dayanımları ile benzer davranış göstermiş, referans numuneye oranla %0,14 nGO ve %30 oranında ACT kullanımı ile optimum değerlere ulaşmıştır. Basınç dayanımı ile UGH'nin doğru orantılı olarak artıp azaldığı tespit edilmiştir. UGH değerleri ve beton basınç dayanımı arasında korelasyon katsayısı (R^2) 0,72 olarak elde edilmiştir.

Çok düşük miktarlarda nGO kullanımı ile (küttele çimento yerine %0,14) aşınma yüzdesinde yaklaşık %35 oranında bir iyileşme elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda betonun basınç mukavemeti ile aşınma yüzdeleri arasında bağ incelendiğinde nGO ve ACT katkılı numunelerde basınç mukavemeti ile aşınma yüzdeleri arasındaki korelasyon katsayısı (R^2) 0,92 olarak bulunmuştur.

Deneysel çalışmada üretilen bütün kompozitler üzerinde gerçekleşen hızlı klorür geçirimsizliği deneyi sonucu elde edilen ölçümler ASTM C 1202 standardına göre 'ihmal edilebilir ve çok düşük' kategorisinde değerlendirilmiştir. %0,14 nGO katkılı RPBG0,14 karışımının klorür geçirimsizliğinde geleneksel RPB'ye göre %45 oranında, %30 kullanımı ise bu sonuçları yaklaşık %10 oranında iyileştirdiği olduğu görülmüştür.

Öneriler

Genel olarak tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde nGO ve ACT'nin geleneksel RPB üretiminde kullanılabileceği düşünülmektedir. nGO geleneksel RPB'de çimento yerine kütlece eklenmesi her ne kadar matrisle eklenmeden önce saf suda manyetik karıştırıcı ile karıştırılmasına rağmen topaklaşma olmasına neden olduğu düşünülmektedir. Nano boyuttaki malzemelerin beton içerisine ikamesi esnasında oluşabilecek topaklanma için farklı çalışmalar dispersiyon yöntemlerinin yapılması önerilmektedir.

nGO ve ACT'nin KK yerine RPB içerisinde kullanılması ile basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Bu bağlamda RPB'de nGO kullanımı ve KK yerine ACT eklenmesi konusunda farklı derecelerde ısıtma işlemi uygulanarak çalışmalar yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca lif miktarı, nGO ve ACT'nin ısıtma programının zamana bağlı olarak incelenmesi önerilmektedir.

RPB'de KK yerine benzer özelliklerde doğal atık olan ACT kullanılabilir. Bu aynı zamanda atıkların değerlendirilmesi konusu incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca bütün numunelere 50 MPa sıkıştırma basıncı uygulanmıştır. RPB'de nGO kullanılmasının ön sıkıştırma basıncı etkileri üzerine çalışmalar yapılmasına duyulmaktadır.

Bu çalışmada 6 mm boyunda yaklaşık %2 oranında mikro çelik lif kullanılmıştır. Lif oranları ve boyutları üzerinde çalışma yapılmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışmada maksimum tane boyutu (D_{max}) 1 mm olarak alınmıştır. Farklı agrega tane boyutu ile ve kendiliğinden yerleşen özellikte RPB karışımlarının araştırılması önerilmektedir.

Ayrıca yüksek iletkenlik özelliğine sahip olan nGO'nun elektriksel ve termal özellikleri incelenmesi literatüre büyük katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Kaynakça

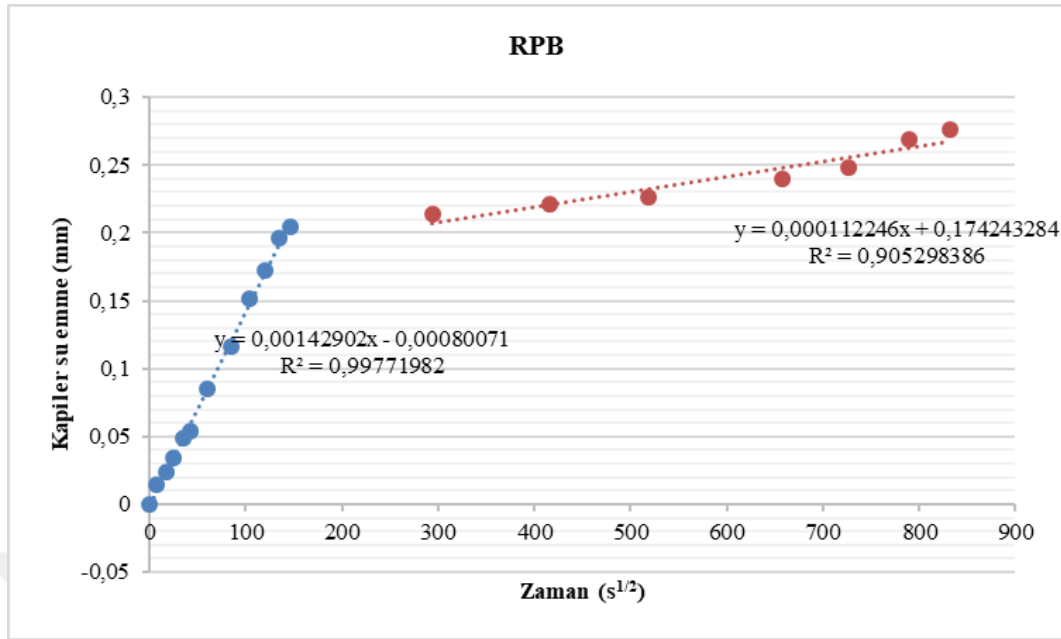
- Antonio, V. R. J., German, C. S., & Raymundo, M. M. E. (2016). Optimizing content graphene oxide in high strength concrete. *International Journal of Scientific Research and Management*, 4(6), 4324-4332.
- ASTM C 136. (2006). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. *American Society for Testing and Methods*, USA.
- ASTM C 597-16. (2016). Standard test method for pulse velocity through concrete. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM C 944/ C944M-19. (2019). Standard test method for abrasion resistance of concrete or mortar surfaces by the rotating-cutter method. *American Society for Testing and Methods*, USA.
- ASTM C 1202. (2019). Standard test method for electrical indication of concretes ability to resist chloride ion penetration. *American Society for Testing and Methods*, USA.
- ASTM C 1585. (2020). Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concrete. West Conshohocken: ASTM.
- Bedeloğlu, A., & Taş, M. (2016). Grafen ve grafen üretim yöntemleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 544-554.
- Blais, P. Y., & Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge-world's first reactive powder concrete bridge. *PCI Journal*, 44(5).
- 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.
- Dallaire, E., Aitcin, P. C., Lachemi, M. (1998). High performance powder. *Civil Engineering*, 68, 48-51.
- Demir, A. (2005). *Silis dumanı içeren betonların hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini*. (Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi). <http://libratez.cu.edu.tr/tezler> adresinden edinilmiştir.
- Demirel, S., & Öz, H. Ö. (2017). Atık malzemelerin kendiliğinden yerleşen beton performansına etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 40-48.
- Demiss, B. A., Oyawa, O. W., & Shitote, S. M. (2017). Experimental investigation on compressive strength of recycled reactive powder concrete containing glass powder and rice husk ash. *Journal of Civil Engineering Research* 2017, 7(4), 124-129. <https://doi.org/10.5923/j.jce.20170704.03>
- Demiss, B. A., Oyawa, W. O., & Shitote, S. M. (2018). Mechanical and microstructural properties of recycled reactive powder concrete containing waste glass powder and fly ash at standard curing. *Cogent Engineering*, 5(1), 1-21. <https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1464877>
- Demirdöven, B. J., & Arditi, D. (2012, Eylül). *Yapılarda ve yapım yönetiminde nanoteknoloji uygulamaları*. 2. Proje ve Yapım Yönetimi Kongresi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir.
- Devasena, M., & Karthikeyan, J. (2015). Investigation on strength properties of graphene oxide concrete. *International Journal of Engineering Science Invention Research & Development*, 1(8), 307-310.

- Dimov, D., Amit, I., Gorrie, O., Barnes, M. D., Townsend, N. J., Neves, A. I., Saverio R., & Craciun, M. F. (2018, August). Ultrahigh performance nanoengineered graphene–concrete composites for multifunctional applications. *Advanced Functional Materials*, 28(23), 1-12.
- Dörtoğul, C. (2018). *Grafen oksitin sentezlenmesi ve karakterizasyonu* (Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi). <http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr> adresinden edinilmiştir.
- Fu, W., & Wang, Z. B. (1994). The new technology of concrete engineering. *The Publishing House of Chinese Architectural Industry*, 56-59, Beijing, China.
- Gökçer, B., Yıldız, S., Keleştemur, O. (2015, Mayıs). Cam lif takviyeli çimento harçlarının aşınma direnci üzerine atık mermer tozunun etkisi. *2nd International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara.
- Gönen, T., Onat, O., Cemalgil, S., Yilmazer, B., & Altuncu, Y.T. (2012). Beton teknolojisi için yeni atık malzemeler üzerine bir inceleme. *Electronic Journal of Construction Technologies/Yapi Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 36-43.
- Hummers, W. S., & Offeman, R. E. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339-1339.
- IS 13311. (1992). Non-destructive testing of concrete methods of test. *Bureau of Indian Standards*. New Delhi.
- İpek, M. (2009). *Reaktif pudra betonlarının mekanik davranışına katılma süresince uygulanan sıkıştırma basıncının etkileri* (Doktora tezi, Sakarya Üniversitesi). <http://www.saujs.sakarya.edu.tr> adresinden edinilmiştir.
- Kozak, M., & Ünal, O. (2014). Bazalt agregası ile üretilen beton travers de çelik lifin kullanılabilirliğinin araştırılması. *Journal of Natural & Applied Sciences*, 18(3), 15-21.
- Kumar, H. P., & Xavior, M. A. (2017). Assessment of mechanical and tribological properties of Al 2024-SiC-graphene hybrid composites. *Procedia Engineering*, 174, 992-999.
- Kumaravel, R., & Balaji, S. (2016). Optimizing content graphene oxide in high strength concrete. *International Journal of Comprehensive Leading Research in Science*, 2(8), 35-43.
- Kushartomo, W., Bali, I., & Sulaiman, B. (2015). Mechanical behavior of reactive powder concrete with glass powder substitute. *Procedia Engineering*, 125, 617-622.
- Lv, S., Ma, Y., Qiu, C., & Zhou, Q. (2013). Regulation of GO on cement hydration crystals and its toughening effect. *Magazine of Concrete Research*, 65(20), 1246-1254.
- Matte, V., & Moranville, M. (1999). Durability of reactive powder composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 1-9.
- Orhan, E., & Esen, Y. (2017). Ögütölmös atık cam tozu katkılı betonun puzolanik aktivitesi ve yarmada çekme dayanımının belirlenmesi. *Engineering Sciences*, 12(2), 108-116. doi: 10.12739/NWSA.2017.12.2.1A0378
- Omran, A. F., Etienne, D., Harbec, D., & Tagnit-Hamou, A. (2017). Long-term performance of glass-powder concrete in large-scale field applications. *Construction and Building Materials*, 135, 43-58.
- Özdemir, A. (2002). Bazı yapı malzemelerin kapiler su emme potansiyelleri. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 26(1), 19-32.

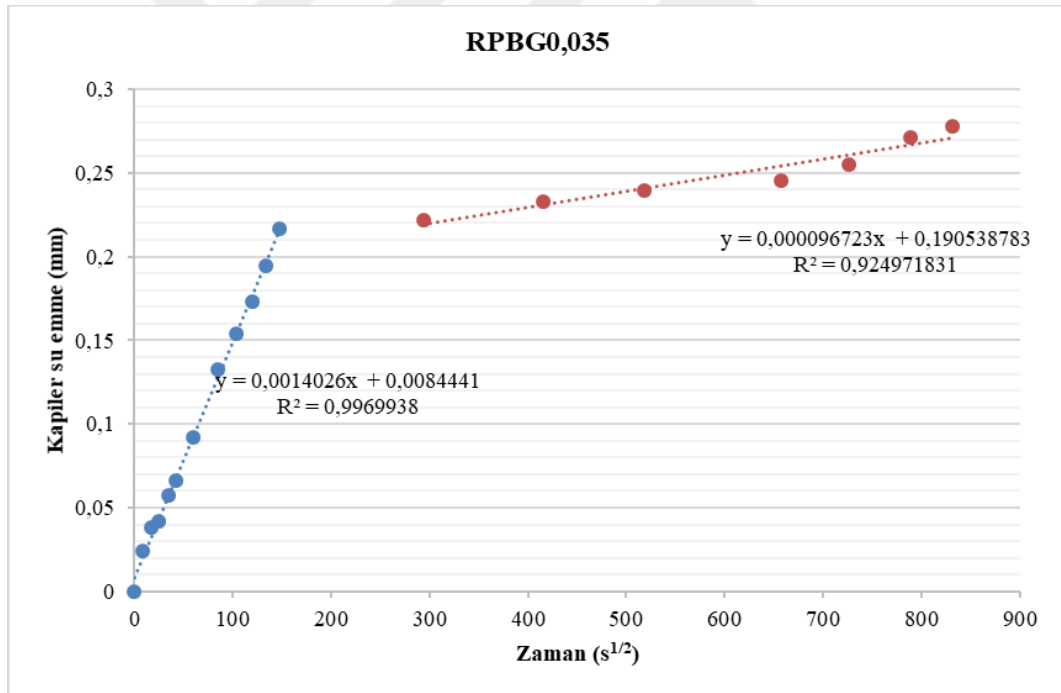
- Pan, Z., He L., Qiu, L., Korayem, A. H., Li, G., Zhu, J. W., Collins, F., Li, D., Duan, W. H. & Wang, M. C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. *Cement & Concrete Composites*, 58, 140–147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.748.295>
- Perker, S. Z. (2010). Nanoteknoloji ve yapı malzemesi alanına etkileri. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 5(4), 639-648.
- Rawaa, K. A. (2015). The effects of petroleum products on reactive powder concrete using waste glass as a partial replacement for fine aggregate. *International Journal of Science and Research*, 7(1), 1-5.
- Rebentrost, M., & Cavill, B. (2006, September). Reactive powder concrete bridges, *6th Austroads Bridge Conferences*, Perth, Australia.
- Rehman, S. K. U., Zainah, I., Shazim, A. M., Javed, M. F., & Khushnood, R. A. (2017). A sustainable graphene based cement composite. *Sustainability*, 9(7), 1-20. doi:10.3390/su9071229
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511.
- Sadrekarami, A. (2007). Development of a light weight reactive powder concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), 409–417.
- 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>
- Sudhanshu, K., & Bharat, N. (2017). Effects of waste glass powder on compressive strength of concrete. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, 1(4), 289-298.
- Staquet, S., & Espion, B. (2002, June). Influence of cement and silica fume type on compressive strength of reactive powder concrete. In *6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete*, 1421-1436, Leipzig.
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F., Kocatürk, A. N., & Yerlikaya, M. (2004). Betonun performansına göre tasarımında yeni gelişmeler. *Beton 2004 Kongresi Bildiriler*, 24-57, İstanbul.
- Topçu, İ. B., Gülbandır, E., & Koca, A. B. (2018). Reaktif pudra betonlarının basınç dayanımının ANFIS ile tahmini. *Politeknik Dergisi*, 21(1), 165-171.
- Topçu, İ. B., & Karakurt, C. (2005). Reaktif pudra betonları. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 437, 25-30.
- TS EN 933-1. (1999). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini - Eleme metodu. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 12390-3. (2010). Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 12390-5. (2010). Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS EN 12390-7. (2010). Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş beton yoğunluğunun tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- Uyanık, O., & Tezcan, S. (2012). Beton dayanımının ultrasonik yöntemle tayini. *Jeofizik Bülteni*, 23(70), 41-45.

- Uygunoğlu, T., & Şimşek, B. (2019). Grafen oksit katkılı harçların mekanik, fiziksel ve elektriksel özelliklerinin araştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(1), 196-204.
- Uzun, M., Çöğürçü, M. T., Keskin, Ü. S. (2019). Cam tozunun beton basınç dayanımına etkisi. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2), 42-51. doi: 10.20854/bujse.459301
- Ünal, O. (1994). *Isıl işlem uygulamasının lifli beton özelliklerine etkisi* (Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi). <https://polen.itu.edu.tr> adresinden edinilmiştir.
- Wang, J., Dong, S., Yu, X., & Han, B. (2020). Mechanical properties of graphene-reinforced reactive powder concrete at different strain rates. *Journal of Materials Science*, 55(8), 3369-3387. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04246-5>
- Yazıcı, H., & Yalçinkaya, Ç. (2011). *Yeni nesil yüksek performanslı beton: reaktif pudra betonu*. İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Bülteni, 156(26), 26-29.
- Yazıcı, H., Beglarigale, A., & Yalçinkaya, Ç. (2013, Kasım). Otoklav kürlü reaktif pudra betonu: Mikro çeliklif hacmi ve silika dumanı dozajının mekanik özelliklere etkisi. II. *Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Zhu, X. H., Kang, X. J., Yang, K., & Yang, C. H. (2017). Effect of graphene oxide on the mechanical properties and the formation of layered double hydroxides (LDHs) in alkali-activated slag cement. *Construction and Building Materials*, 132, 290-295.

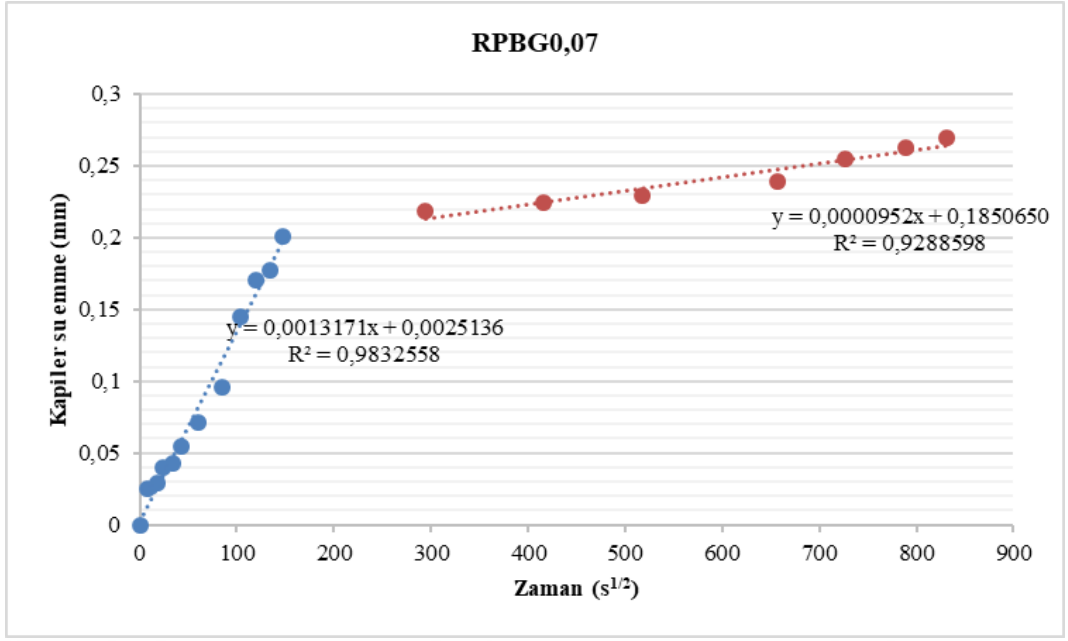
Ekler



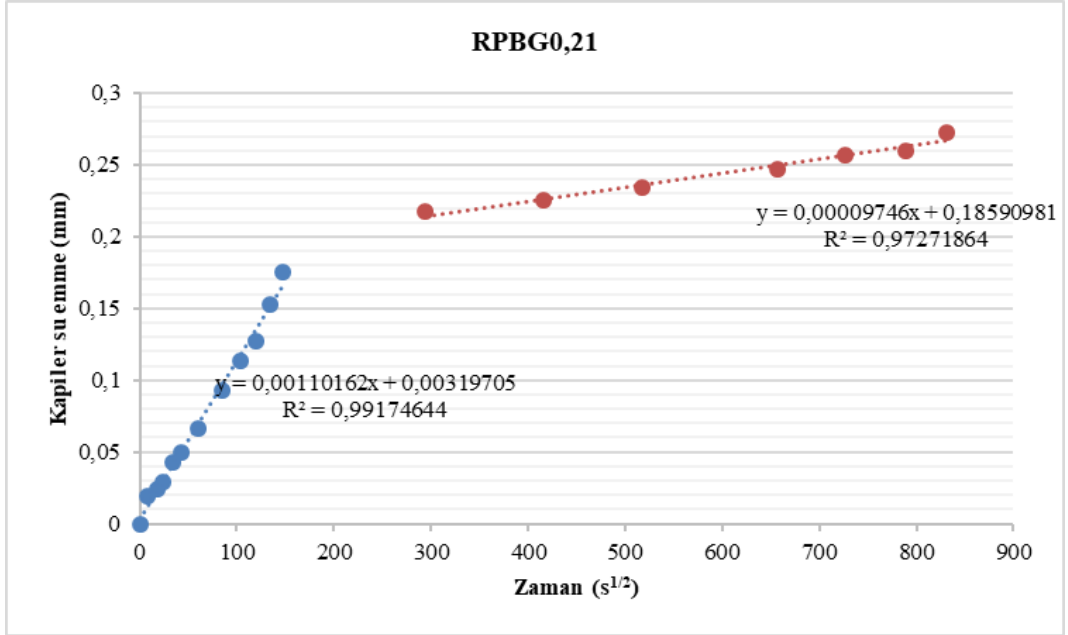
Şekil 35. RPB karışımı kapiler su emme katsayısı.



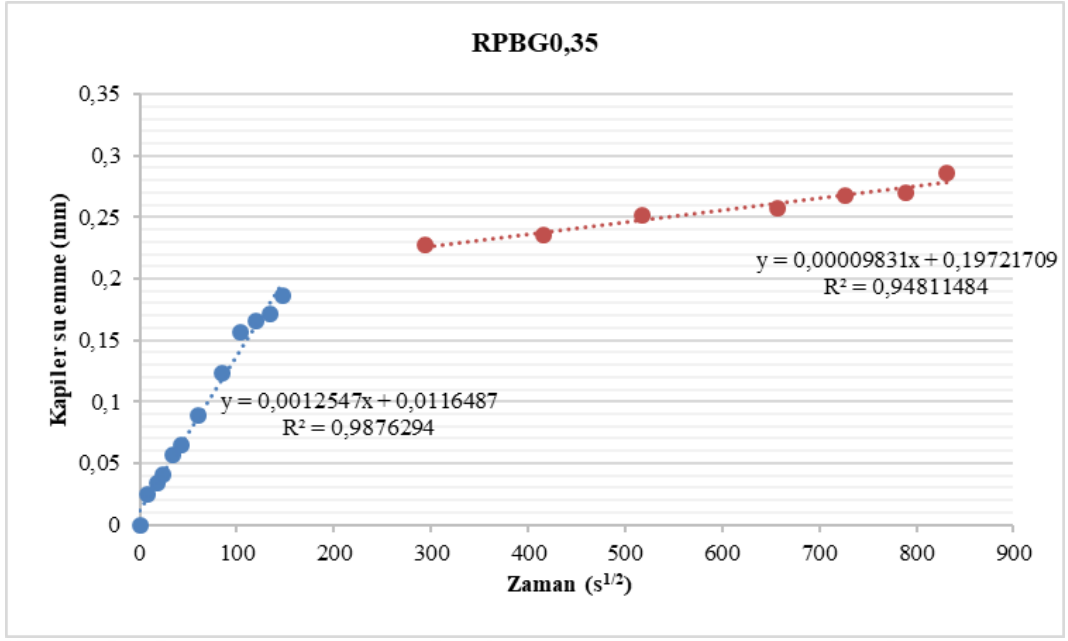
Şekil 36. RPBG0,035 karışımı kapiler su emme katsayısı.



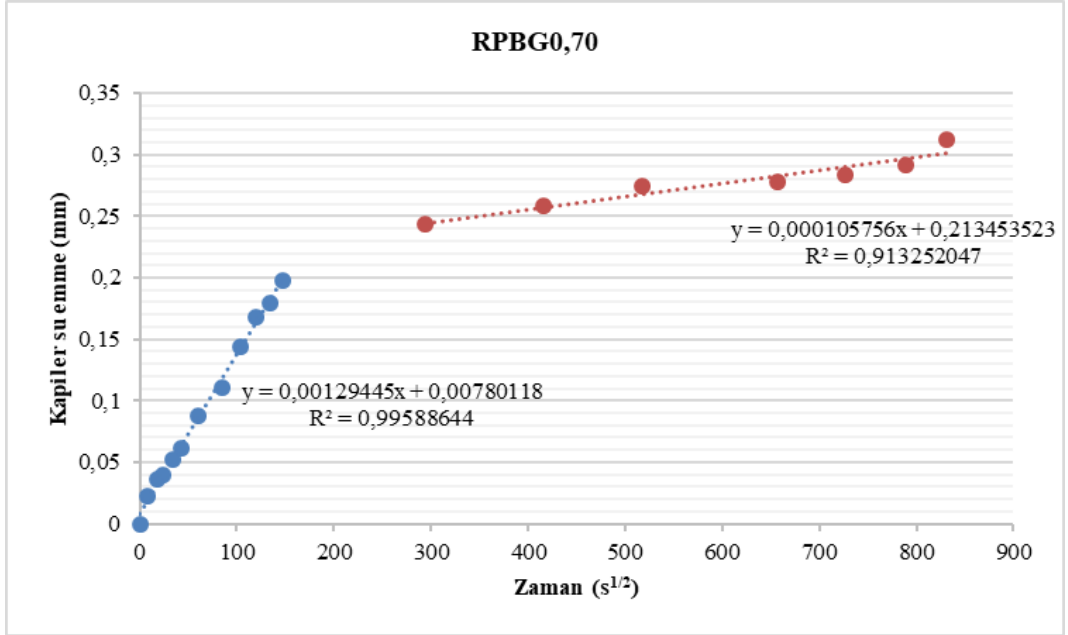
Şekil 37. RPBG0,07 karışımı kapiler su emme katsayısı.



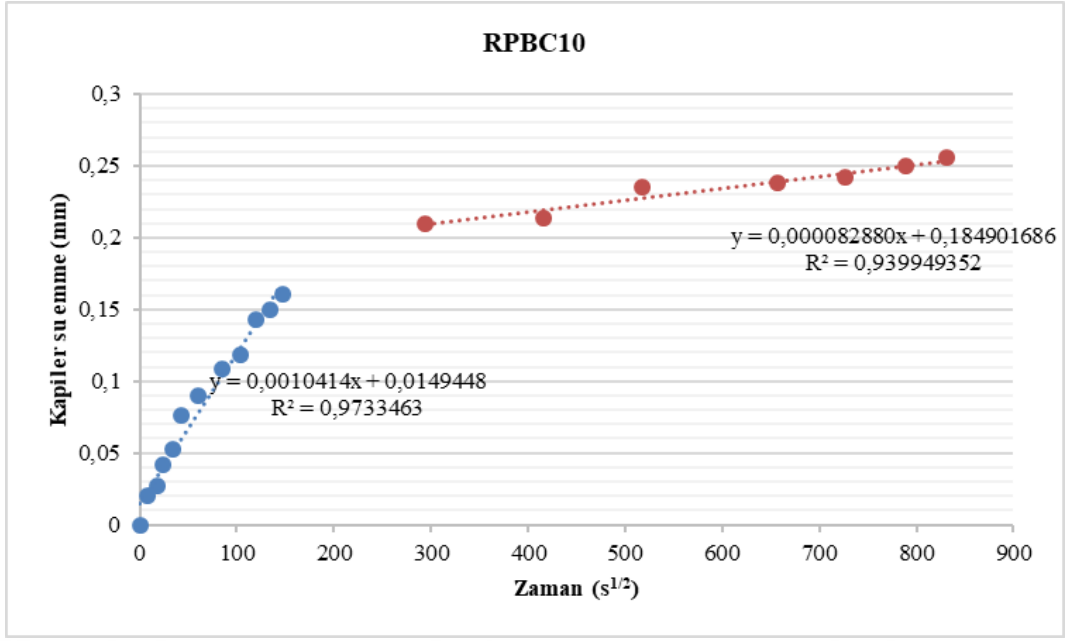
Şekil 38. RPBG0,21 karışımı kapiler su emme katsayısı.



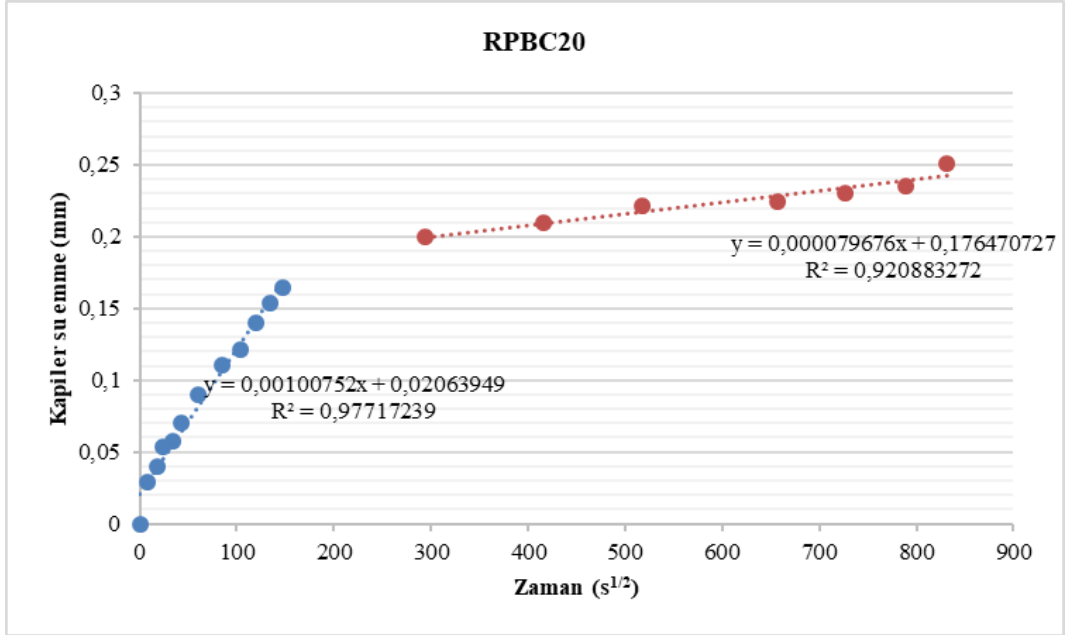
Şekil 39. RPG0,35 karışımı kapiler su emme katsayısı.



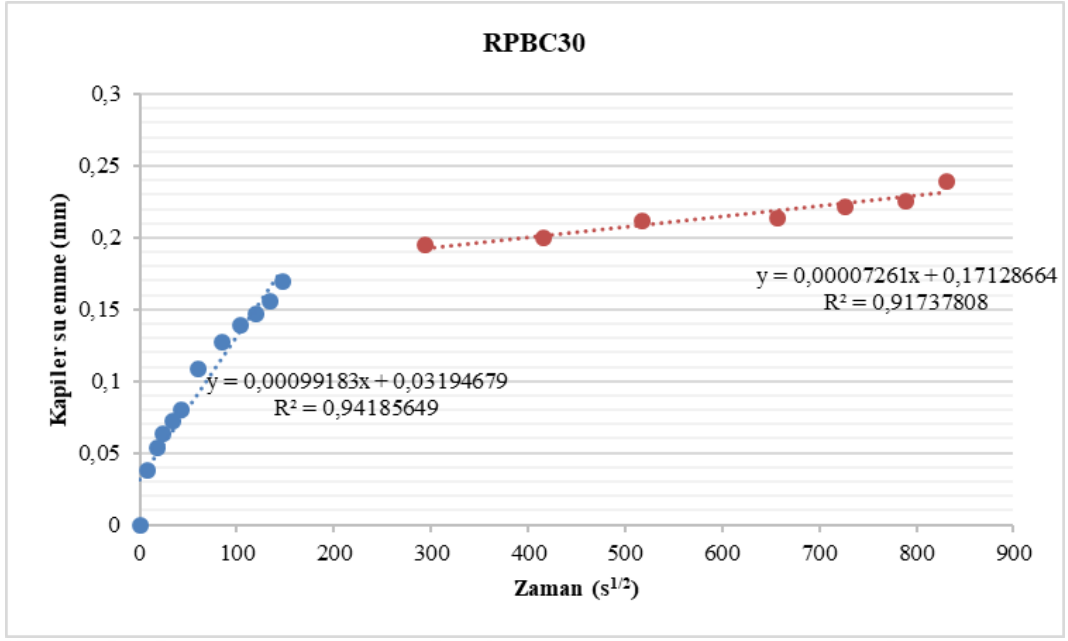
Şekil 40. RPG0,70 karışımı kapiler su emme katsayısı.



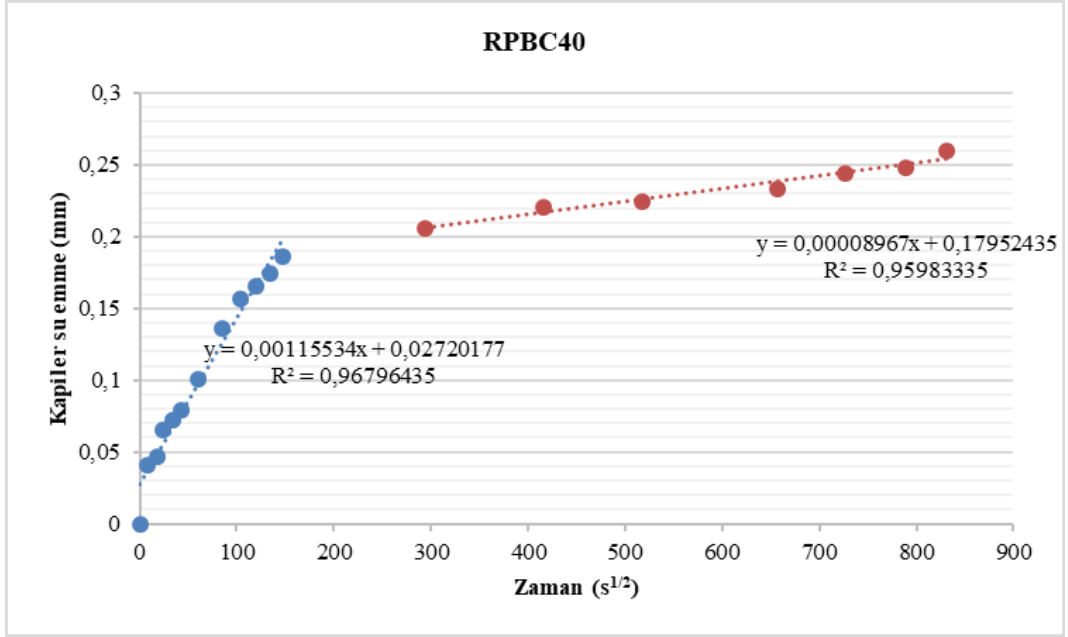
Şekil 41. RPBC10 karışımı kapiler su emme katsayısı.



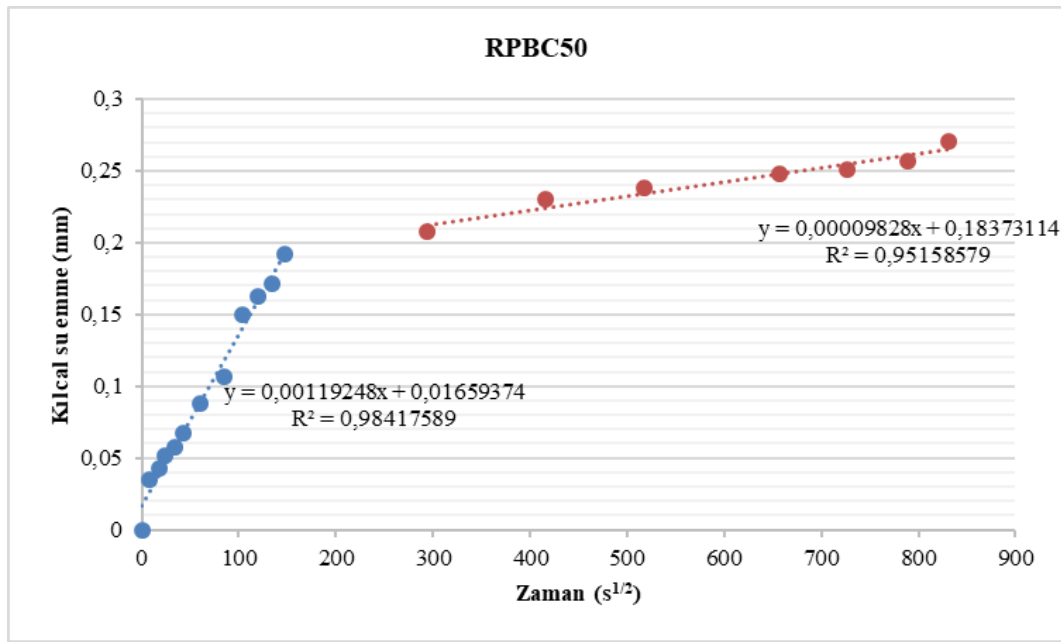
Şekil 42. RPBC20 karışımı kapiler su emme katsayısı.



Şekil 43. RPBC30 karışımı kapiler su emme katsayısı.



Şekil 44. RPBC40 karışımı kapiler su emme katsayısı.



Şekil 45. RPBC50 karışımı kapiler su emme katsayısı.

Tablo 24. *nGO İçeren Numunelerin Ortalama UGH Deney Sonuçları.*

	Ölçümler (µs)	Ortalama (µs)	L (m)	UGH (km/s)
RPB	11,1	11,060	0,051	4,608
	11,1			
	11			
RPBG0,035	11,6	11,466	0,055	4,796
	11,4			
	11,4			
RPBG0,07	12,3	12,166	0,0585	4,808
	12,2			
	12			
RPBG0,14	11,2	11,100	0,054	4,864
	11,1			
	11			
RPBG0,21	12,6	12,466	0,058	4,652
	12,4			
	12,4			
RPBG0,35	12,7	12,50	0,058	4,640
	12,5			
	12,3			
RPBG0,70	12,8	12,666	0,057	4,500
	12,6			
	12,6			

Tablo 25. ACT İçeren Numunelerin Ortalama UGH Deney Sonuçları.

	Ölçümler (μs)	Ortalama (μs)	L (m)	UGH (km/s)
	11,2			
RPBG0,14	11,1	11,100	0,054	4,865
	11			
	11,8			
RPBC10	11,8	11,700	0,057	4,872
	11,5			
	11,7			
RPBC20	11,7	11,666	0,0575	4,928
	11,6			
	11,8			
RPBC30	11,8	11,733	0,058	4,943
	11,6			
	12,7			
RPBC40	12,6	12,566	0,058	4,615
	12,4			
	12,4			
RPBC50	12,2	12,233	0,054	4,414
	12,1			

Tablo 26. nGO İçeren Numunelerin Klorür İyon Geçirgenliği Deney Sonuçları.

Numune Kodu	Yük (Coulomb)	L (m)	Q _s (Coulomb)
RPB	229	0,050	229,00
RPBG0,035	217	0,051	221,34
RPBG0,07	194	0,049	190,12
RPBG0,14	102	0,050	102,00
RPBG0,21	116	0,049	113,68
RPBG0,35	196	0,052	203,84
RPBG0,70	247	0,050	247,00

Tablo 27. ACT İçeren Numunelerin Klorür İyon Geçirgenliği Deney Sonuçları.

Numune Kodu	Yük (Coulomb)	L (m)	Q _s (Coulomb)
RPBG0,14	102	0,050	102,00
RPBC10	100	0,051	102,00
RPBC20	96	0,049	94,08
RPBC30	92	0,050	92,00
RPBC40	114	0,049	111,72
RPBC50	168	0,050	168,00

Öz geçmiş

Serdar Arslan 4 Ekim 1990 yılında Yozgat'da doğmuştur. İlkokul ve lise eğitimini Yozgat'ta tamamlamış, 2013 yılında Lefke Avrupa Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur.

2013-2014 yılları arasında Ankara'da şantiye şefi, 2014-2015 yılları arasında Çanakkale İÇDAŞ Biga Termik Santrali'nde Kalite Kontrol Mühendisi olarak görev yapmıştır.

2016-2017 yılları arasında Polis Amirleri Eğitim Merkezi'nde eğitime başlamış, aynı dönem içerisinde Polis Akademisi'nde Güvenlik Bilimleri Enstitüsü Güvenlik Stratejileri ve Yönetimi Anabilim Dalı Güvenlik Yönetimi üzerine tezsiz yüksek lisansını tamamlamış ve 2018 yılında Bayburt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı yüksek lisans programına başlamıştır.

Evli ve bir çocuk babası olan Arslan şu an Bayburt Polis Meslek Eğitim Merkezi Müdürlüğü'nde Polis eğitimciliği ve İdari Mali İşler Bürolar Amir Vekili olarak görevini sürdürmektedir.