

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**BAZALT LİF TAKVİYELİ GEOPOLİMER BETONUN ÇARPMA
ETKİSİNDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

Hiranur GÜNGÖR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Berivan YILMAZER POLAT

Tunceli-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BAZALT LİF TAKVİYELİ GEOPOLİMER BETONUN ÇARPMA
ETKİSİNDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

Hiranur GÜNGÖR
(200150017)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Berivan YILMAZER POLAT

Tunceli-2023

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**BAZALT LİF TAKVİYELİ GEOPOLİMER BETONUN ÇARPMA
ETKİSİNDEKİ PERFORMANSININ İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

Hiranur GÜNGÖR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 15/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

İmza Dr. Öğr. Üyesi Sedat Savaş (Fırat Üniversitesi) BAŞKAN	İmza Dr. Öğr. Üyesi Alper POLAT (Munzur Üniversitesi) ÜYE	İmza Dr. Öğr. Üyesi Berivan YILMAZER POLAT (Munzur Üniversitesi) DANIŞMAN
--	--	---

Bu tez, Enstitümüz İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Enstitü Müdürü
Doç. Dr. Murat KORUNUR

Bu çalışma, Munzur Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklemiştir.

Proje No: YLMUB021_09

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza

Hiranur GÜNGÖR

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Berivan YILMAZER POLAT

TEŞEKKÜR

Tüm araştırmalarım ve çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve yardımcı olan sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Berivan Yılmaz POLAT'a teşekkürlerimi sunmaktan onur duyarım.

Aynı zamanda bu süreçte her konuda destek veren ve yardımcı olan sayın Dr. Öğr. Üyesi Sedat SAVAŞ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Serkan ETLİ'ye değerli yardımları sebebiyle teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Aras DALĞIÇ, Mevlüt Emre ORHAN, Hasan ÜSTÜNDAĞ ve Onur ÇINAR'a kıymetli bilgi ve desteklerini benden esirgemedikleri için çok teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte maddi ve manevi yönden beni destekleyen, her zaman her konuda yardımcı olan sevgili ikizim Mervenur GÜNGÖR'e ve çok değerli aile üyelerime minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Hiranur GÜNGÖR
TUNCELİ-2023

İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	VII
RESİMLER LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	X
KISALTMALAR LİSTESİ	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Konunun Önemi	1
1.2. Amaç ve Süreç.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Geopolimer	4
2.1.1 Geopolimerin yapısı	5
2.1.2. Geopolimerizasyon.....	5
2.2. Geopolimer Beton	6
2.2.1. Uçucu kül katkılı geopolimer betonlar	7
2.2.2. Yüksek fırın cürufu geopolimer betonlar	8
2.2.3. Silis dumanlı geopolimer betonlar.....	9
2.2.4. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu geopolimer betonlar	10
2.2.5. Bazalt lifli geopolimer beton	11
2.3. Dayanım Faktörleri.....	12
2.3.1. Aktivatörler.....	12
2.3.2. Alkali-bağlayıcı oranı	13
2.3.3. Kür şartları.....	14
2.3.4. Mineral katkıları	15
2.3.4.1. Uçucu kül.....	16
2.3.4.2. Yüksek fırın cürufu.....	17
2.3.4.3. Silis dumanı	18
2.3.5. Donatı	19

2.3.6. Lifler	19
2.1.6.1. Bazalt lifler	21
2.3.7. Süperakışkanlaştırıcı.....	22
2.4. Uygulanan Deneyler	23
2.4.1. İşlenebilirlik testi	23
2.4.1.1. Slump (çökme) deneyi:.....	24
2.4.1.2. Sarsma tablası (akıcılık) deneyi:.....	24
2.4.2. Basınç dayanım testi.....	25
2.4.3. Eğilme dayanımı testi	26
2.4.3.1. Eğilmede çekme dayanımı.....	27
2.4.4. Su emme testi	28
2.4.5. Donma-çözünme testi	29
2.4.6. Ultrases geçirgenlik deneyi	29
2.4.7. SEM ve EDS analizi	30
2.4.8. Ağırlık düşürme ile darbe dayanımı testi	31
2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi	36
2.5.1. Numerik analiz	37
3. MATERYAL ve METOD	39
3.1. DeneySEL Materyaller.....	39
3.2. Beton Karışım Tasarımı ve Karıştırma Prosedürü	48
3.2.1. Tasarım	48
3.2.2. Prosedür.....	49
3.3. DeneySEL Metod.....	49
3.3.1. Ön deneyler	50
3.3.1.1. Sarsma Tablası Deneyi	50
3.3.2.1. Basınç deneyi.....	51
3.3.2.2. Eğilme deneyi	51
3.3.2.3. Donma-çözünme deneyi	52
3.3.2.4. Su emme deneyi	53
3.3.2.5. Ultrases geçirgenlik deneyi	53
3.3.2.6. SEM ve EDS analizi	54
3.3.2. Ana deneyler.....	55
3.3.2.1. Ağırlık düşürme deneyi	55

3.4. Modelleme	56
3.4.1. Deplasman verilerinin alınması	57
3.4.2. Deplasman verilerinin programa işlenmesi	58
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	62
4.1. Ön Deney Bulguları.....	62
4.1.1. Yayılma deneyi.....	62
4.1.2. Ultrases geçirgenlik deneyi	63
4.1.3. Basınç dayanımı deneyi.....	65
4.1.4. Eğilme dayanımı deneyi	66
4.1.5. Donma-çözünme deneyi.....	67
4.1.6. Su emme deneyi	69
4.1.7. SEM ve EDS analizi	70
4.2. Ana Deney Bulguları	72
4.2.1. Küresel Ağırlık Düşürme Deneyi	72
4.3. Modelleme Çalışması	83
5. SONUÇLAR.....	90
6. KAYNAKLAR.....	92

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Süreç akış şeması	2
Şekil 2.1. Geopolimerizasyon ile elde edilecek bazı alüminosilikat kafes yapıları model görünümleri (1. Na-PS, 2. K-PSDS, 3. K-PSS, 4. Ca-PS, 5. K-PS)	6
Şekil 2.2. GB içerisine katılan mineral katkıları (sırasıyla YFC, UK SD, metakaolin, pirinç kabuğu külü)	15
Şekil 2.3. F sınıfı uçucu kül.....	17
Şekil 2.4. C sınıfı uçucu kül	17
Şekil 2.5. Beton içerisine katılan lifler (sırasıyla çelik, polipropilen, cam, bazalt, poliamid, polivinil alkol, seramik, polietilen, naylon, kevlar lifi.)	20
Şekil 2.6. Sırasıyla ağırlık düşürme, serbest düşen top, charpy, izod,, mermi darbe testi (1. Güç ünitesi, 2. Kılavuz namlu ve 3. Hedef çerçeve ve test bölümü) ve bölünmüş hopkinson basınç çubuğu testi	32
Şekil 2.7. PÇB'nin darbe altında çatlak hasarı	34
Şekil 2.8. GB'nin darbe altında çatlak hasarı	34
Şekil 2.9. Lifli PÇB'nin darbe altında çatlak hasarı	34
Şekil 2.10. Lifli GB'nin darbe altında çatlak hasarı	34
Şekil 3.1. Modelleme akış şeması	56
Şekil 4.1. Numunelerin ultrases geçiş hızı	64
Şekil 4.2. Numunelerin 3., 7. ve 28. gün basınç dayanımları.....	65
Şekil 4.3. Numunelerin 3., 7. ve 28. gün eğilme dayanımları	66
Şekil 4.4. Donma-çözünme numunelerinin UGH'leri.....	68
Şekil 4.5. Su emme yüzde grafiği	69
Şekil 4.6. PÇB-1'nin ortalama deneysel deplasman-zaman grafiği.....	73
Şekil 4.7. %1 BLGB-1'nin ortalama deneysel deplasman-zaman grafiği	74
Şekil 4.8. %2 BLGB-1'in ortalama deneysel deplasman-zaman grafiği	75
Şekil 4.9. PÇB, %1 BLGB ve %2 BLGB'nin ortalama deplasman-zaman grafikleri	79
Şekil 4.10. Kabuk atım çapları ve derinliği arasındaki korelasyon.....	81
Şekil 4.11. Basınç dayanımı ve kabuk atım derinliği arasındaki korelasyon.....	81
Şekil 4.12. Basınç dayanımı ve kabuk atım çapları arasındaki korelasyon	82
Şekil 4.13. Deplasman ve basınç dayanımları arasındaki korelasyon.....	82
Şekil 4.14. PÇB'nin analiz ve deneysel ortalama deplasman-zaman grafiği.....	84
Şekil 4.15. %1 BLGB'nin analiz ve deneysel deplasman-zaman grafiği	86
Şekil 4.16. %2 BLGB'nin analiz ve deneysel deplasman-zaman grafiği	87

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. GB'yi oluşturan temel bileşenler.....	14
Tablo 2. 2. Bazalt lifin mekanik özellikleri	21
Tablo 3.1. Deneyde kullanılan UK'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	40
Tablo 3.2. Deneyde kullanılan YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	41
Tablo 3.3. Deneyde kullanılan SD'nin kimyasal özellikleri.....	42
Tablo 3.4. Deneyde kullanılan BL'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	45
Tablo 3.5. GB karışım oranları	48
Tablo 3.6. GB ve PCB örnekleri için karışım oranları	48
Tablo 3.7. Analizde kullanılan RHT model değerleri.....	59
Tablo 3.8. Paslanmaz çeliğin malzeme özellikleri.....	60
Tablo 4.1. Numunelerin yayılma değerleri	62
Tablo 4.2. Numunelerin ilk darbe sonrasındaki ortalama deplasman değerleri	79
Tablo 4.3. Numunelerin ortalama basınç, deplasman, kabuk atım derinliği ve çap değerleri	80
Tablo 4.4. Deneysel ve nümerik analiz arasındaki sapma	88

RESİMLER LİSTESİ

Resim 3.1. Deneyde kullanılan UK	39
Resim 3.2. Deneyde kullanılan YFC	40
Resim 3.3. Deneyde kullanılan SD	41
Resim 3.4. Deneyde kullanılan ince (a) ve kaba (b) agrega.....	42
Resim 3.5. Elek analizi deney aleti	43
Resim 3. 6. Agregaların granülometri eğrisi	43
Resim 3.7. Deneyde kullanılan alkali aktivatörler (a) sodyum silikat, (b) sodyum hidroksit sulu çözeltisi	44
Resim 3.8. Deneyde kullanılan BL	44
Resim 3.9. Deneyde kullanılan süperakışkanlaştırıcı	46
Resim 3.10. 2,5 cm'lik paspayları.....	46
Resim 3.11. Deneyde kullanılan hasır çelik donatı.....	47
Resim 3.12. Deneyde kullanılan PÇ	47
Resim 3.13. Beton mikseri	49
Resim 3.14. Sarsma tablasında akıcılığı ölçülen numune.....	50
Resim 3.15. Basınç numunesi (a) ve basınç aleti (b)	51
Resim 3.16. Üç noktalı eğilme testi için kullanılan 10x10x50 cm kiriş numuneler	52
Resim 3.17. Donma-çözünmeye bırakılan numuneler	52
Resim 3.18. Su emmeye bırakılan numuneler	53
Resim 3.19. UGH testi	54
Resim 3.20. SEM/EDS numuneleri (a) ve deney aleti (b)	54
Resim 3.21. GB'nin kalıptaki (a) ve PÇB'nin su küründeki (b) görüntüsü.....	55
Resim 3.22. Ağırlık düşürme test düzeneği (a), küresel ağırlık (b)	56
Resim 3.23. Plağın deplasmanını bulmak için SGİY ile nesne takibi yapılacak etiket	57
Resim 3.24. Beton ve darbe küresi modeli	60
Resim 3.25. Betonun, darbe küresinin (a) ve hasır çeliğin (b) meshlenmesi.....	61
Resim 3.26. Betonun mesnetlenmesi	61
Resim 4. 1. 10 set küp ve kiriş numuneler	62
Resim 4. 2. Bazalt lif (a), %0,5 BLGB (b), %1 BLGB (c), %2 BLGB (d) numunelerinin SEM görüntüleri	70
Resim 4. 3. Bazalt lif (a), %0,5 BLGB (b), %1 BLGB (c), %2 BLGB (d) numunelerinin EDS grafikleri.....	71
Resim 4.4. PÇB-1'in darbe sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeyinde oluşan deformasyon	73
Resim 4.5. %1 BLGB-1'nin darbe sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeyinde oluşan deformasyon	74
Resim 4.6. %2 BLGB-1'in darbe sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeyinde oluşan deformasyon	75
Resim 4.7. İkinci darbe sonrası PÇB-2'nin ön (a) ve arka (b),(c),(d) tarafında oluşan kabuk atımları.....	76
Resim 4.8. İkinci darbe sonrası %1 BLGB-2 ön (a) ve arka (b), (c), (d) yüzeyinde oluşan kabuk atımları.....	77
Resim 4.9. İkinci darbe sonrası %2 BLGB-2'nin ön (a) ve arka (b),(c),(d) oluşan kabuk atımları.....	78
Resim 4.10. PÇB'de oluşan (a) elastik şekil değiştirme ve (b) gerilme	84

Resim 4. 11. %1 BLGB’de oluşan (a) elastik şekil değiştirme ve (b) gerilme	85
Resim 4.12. %2 BLGB’de oluşan (a) elastik şekil değiştirme ve (b) gerilme	87



SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Numunenin kesit alanı
A_{Fail}	: Sağlam yüzey hasar sabiti
A_s	: Numunenin etüv kurusu ağırlığı
B	: Kiriş kesitinin ortalama genişliği
B	: Kırılma mukavemeti sabiti
B_s	: Doygun yüzey kuru numune ağırlığı
BQ	: Kırılıgandan süneklığe geçiş
D	: Kiriş kesitinin ortalama derinliğı
D	: Yayılma gösteren betonun taban
D1, D2	: Hasar sabiti
F_c	: Beton basınç dayanımı
f_t/f_c	: Beton çekme dayanımı
f_s/f_c	: Beton kayma dayanımı
L	: Açıklık uzunluğı
m	: Kırılma mukavemeti derecesi
m1	: Ağırlıkça su emme oranı
N_{Fail}	: Sağlam yüzey hasar derecesi
P	: Kirişe gelen maksimum yük
P	: Numunenin kırılmasına sebep maksimum yük
R	: Kopma modülü
SFMAX	: Maksimum kırılma mukavemeti oranı
Q_{2.0}	: Çekme dayanımı/ basınç dayanımı meridyen oranı
α	: Basınç gerinim oran derecesi
δ	: Çekme gerinim oran derecesi
254	: Beton tabanının yayılma öncesindeki apı

KISALTMALAR LİSTESİ

AAC	: Alkali Aktive Edilmiş Cüruf
Al	: Alüminyum
Al₂O₃-2SiO₂	: Alümino Silikat
BL	: Bazalt Lif
BLGB	: Bazalt Lif Katkılı Geopolimer Beton
Ca	: Kalsiyum
Ca(OH)₂	: Kalsiyum Oksit
Ca-PS	: Kalsiyum-poli (sialat)
EDS	: Enerji Dağılım Spektroskopisi
GB	: Geopolimer Beton
K	: Potasyum
K₂SiO₃	: Potasyum Silikat
KL	: Karbon Lif
KLK	: Kevlar Lif Kompozit
K-PS	: Potasyum-poli (sialat)
K-PSS	: Potasyum-poli (sialat-silokso)
K-PSDS	: Potasyum-poli (sialat-disilokso)
KOH	: Potasyum Hidroksit
MK	: Metakaolin
MK750	: 750 °C’de Yakılarak Toz Haline Getirilen Metakaolinit Kili
Na	: Sodyum
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na₂CO₃	: Sodyum Karbonat
Na-PS	: Sodyum-poli (sialat)
Na₂SiO₃	: Sodyum Silikat
NH	: Sodyum Hidroksit Çözeltisi
NS	: Sodyum Silikat Çözeltisi
PÇ	: Portland Çimentosu
PÇB	: Portland Çimentolu Beton
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
SD	: Silis Dumanı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SGİY	: Sayısal Görüntü İşleme Yöntemi
Si	: Silisyum
UK	: Uçucu Kül
UKGB	: Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Beton
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
XRD	: X-ışınları Difraktometresi

ÖZET

Yüzyıllar boyunca insanlar barınma ihtiyacını karşılamak için birçok malzeme keşfetmiş ve üretmiştir. Günümüzde gerek uygun maliyet gerekse kolay erişim nedeniyle en çok tercih edilen yapı malzemesi portland çimentolu betondur. Fakat her gün değişen hayatımızda, gelişen teknoloji yeni ihtiyaçlar yaratmaktadır. İnşaat sektöründe bu gereksinimlerinden biri sürdürülebilirliktir. Portland çimentolu betonun üretim aşamasında saldığı yüksek miktarda CO₂ gazı çevreye büyük zararlar vermektedir. Bu nedenle bu betona alternatif olarak geopolimer betonlar üretilmektedir. Geopolimer betonlar daha az CO₂ salınımı ve daha yüksek basınç dayanımı sayesinde birçok çalışma da kullanılmaktadır.

Bu tez kapsamında bazalt lif, uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beraber ve ayrı halde takviyesi ile oluşturulan geopolimer betonun, çarpma etkisindeki davranışları araştırılmış ve incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda mineral katkılar için 10 farklı karışım oranı ve lif için 3 farklı (%0.5-%1-%2) katkı oranı denenmiştir. Alkali aktivatör oranı Na₂SiO₃/NaOH 2.5 olarak alınmıştır. Ön deney numuneleri üzerinde fiziksel ve mekaniksel deneyler yapılmıştır. Optimum oranı veren numune üzerinde iki farklı lif oranı ile çarpma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler ile ANSYS programı kullanılarak modelleme yapılmıştır. Sonuçta %2 bazalt lif katkılı geopolimer beton numunesinin çarpma etkisi altında en az deplasmanı vererek en yüksek mukavemeti sergilediği ortaya konmuştur. ANSYS simülasyon verileri deneysel verilere yakın değerler göstermiştir. Bu tez, bazalt lif, uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ile güçlendirilmiş geopolimer betonun darbe altındaki davranışları hakkında önemli bilgiler sağlamıştır. Ek olarak, çalışma, bazalt lifin sürdürülebilir ve dayanıklı bir yapı malzemesi olarak potansiyelini vurgulamıştır. Sonuçlar, bu alanda daha fazla araştırma için bir temel olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer Beton, Bazalt Lif, Çarpma, Modelleme

ABSTRACT

Today, Portland cement concrete is among the most widely used building materials due to its affordable cost and vast availability. One of the top current focuses of the construction industry is achieving and maintaining sustainability. Accomplishing that goal lies in part in the production and development of materials. The high amount of CO₂ gas released during the production stage of Portland cement concrete causes great harm to the environment. Geopolymer concrete reinforced with basalt fiber, fly ash, silica fume, and blast furnace slag can be a more sustainable and durable alternative to Portland cement concrete. The use of such materials can reduce the environmental damage caused by the production of conventional concrete.

In experimental studies, 10 different mixing ratios for mineral additives and 3 different additive ratios (0.5%-1%-2%) for fiber were tested. The alkali activator's (Na₂SiO₃/NaOH) ratio was 2.5. Physical and mechanical experiments were conducted on the preliminary samples. Impact experiments with different fiber ratios were performed on the sample that gave the optimal ratio. Modelling using the experimental data obtained through the ANSYS program. As a result, it has been revealed that the geopolymer concrete sample with 2% basalt fiber additive exhibits the highest strength by giving the least displacement under the impact effect. This thesis has provided valuable insights into the behavior of geopolymer concrete reinforced with basalt fiber, fly ash, silica fume, and blast furnace slag under impact. Additionally, adding basalt fiber to the geopolymer concrete has preimpact resistance, an essential property for building materials used in high-risk areas. The study has highlighted the potential of this material as a sustainable and durable building material. The results can be used as a foundation for further research in this area, and the findings can be applied in the construction industry to promote sustainability and reduce environmental damage.

Keywords: Geopolymer Concrete, Basalt Fiber, Impact, Modelling

1. GİRİŞ

1.1. Konunun Önemi

Geopolimer betonlar (GB) son yıllarda Portland çimentolu betona (PÇB) alternatif olarak kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedeni GB'nin çimento yerine farklı bağlayıcılar içermesidir. Portland çimento (PÇ), üretim aşamasında fazla yakıt ve yüksek sıcaklık fırınlarına ihtiyaç duymaktadır. Bunun sonucunda çevreye her ton PÇ için yaklaşık 1 ton CO₂ salınmaktadır. GB'lerde PÇ üretimi sonucunda oluşan hava kirliliği ve zararlı etkiler görülmemektedir. Bu nedenle GB, PÇB'ye göre çevre dostu bir alternatif oluşturmuştur (A. Ali vd., 2016; Joseph Davidovits, 1994; Gomes vd., 2019; Habert vd., 2011; Hasanbeigi vd., 2010; L. K. Turner ve Collins, 2013).

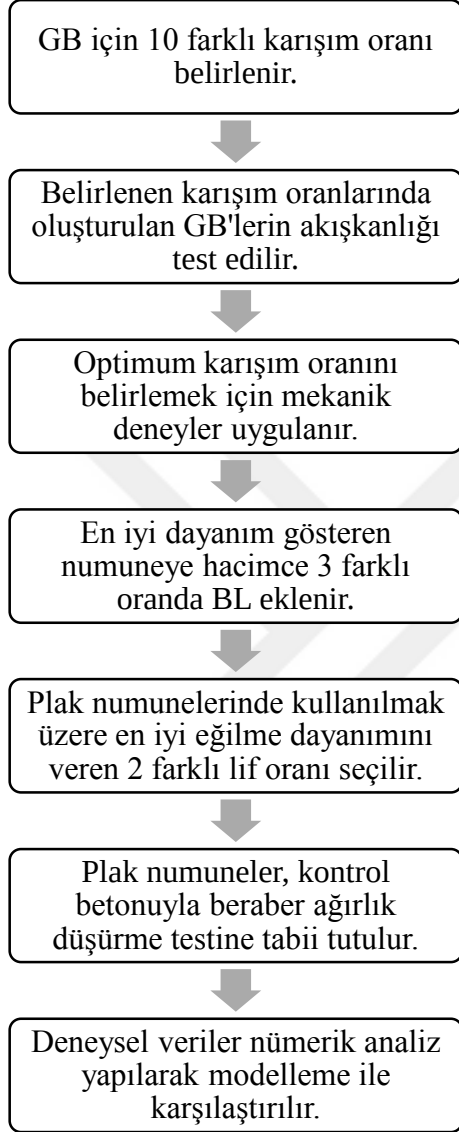
Darbe direnci güçlendirilmiş bir GB, havaalanı pist betonlarında, beton yollarda, güvenlik bariyerlerinde roket saldırılarında oluşan ani yüklemelerdeki etkiyi en aza indirmek için stratejik yapılarda kullanılabilir (Erdinç Arıcı, Resul Dursun, 2007). Dinamik yükler, araştırmacıların, özellikle askeri uygulamalarda, bu tür yüklere maruz kalan malzemenin tepkisini karakterize etmeleri için genellikle çekici bir alandır.

Türkiye'de 2017 yılında gerçekleşen trafik kazaları incelendiğinde, beton güvenlik bariyerlerine çarpan araçlarda betonun ani dayanım kaybetmesiyle can ve mal kaybı yaşandığı gözlemlenmiştir (Ajansı, 2017; TRT, 2017). Bu yönüyle bu tez çalışması özgün bir konuyu araştırmakta ve literatüre katkı sunmayı amaçlamaktadır.

1.2. Amaç ve Süreç

Bu tezin amacı, geopolimer betonun bazalt lif ve mineral katkı takviyesi ile güçlendirilerek çarpma etkisi altında en az deformasyon göstererek can ve mal kaybını önlemesi esas alınmıştır. Literatürde birçok farklı lif kullanılarak GB üretimi vardır. Fakat silis dumanı ve yüksek fırın cürufu bazlı bazalt lif katkılı geopolimer betonun ağırlık düşürme deneyi ile darbe dayanımının hesaplanması ve ANSYS programı ile modellenmesi hakkında başka bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Şekil 1.1'de bu tez çalışmasının deneysel ve nümerik işlem akışları verilmiştir.

İlk olarak ön deneyler ile oluşturulacak geopolimer matrisin bileşen oranları en yüksek dayanım esasına göre belirlenmiştir.



Şekil 1.1. Süreç akış şeması

Ön deneylerde mineral katkıları için 10 farklı karışım oranı ve bazalt lif için 3 farklı lif oranı belirlenmiştir. Her bir oran için mekanik ve fiziksel deneyler uygulanmış ve bunun sonucunda en yüksek dayanımını veren karışım oranı ve en iyi sonucu veren iki lif oranı bulunmuştur. Buna göre ana deney matrisi hazırlanmış ve 0,5x0,5x0,05 m boyutunda Q131/131 hasır çelik ile güçlendirilmiş 3'er plak GB ve kıyas numunesi olarak aynı boyutlarda 3 plak PÇB dökülerek darbe testine tabii tutulmuştur. Deneysel verileri kıyaslamak için ANSYS paket programında deney simüle edilerek analiz yapılmıştır.

Sonuçta takviyeli GB'nin PÇB'ye göre daha yüksek darbe dayanımına sahip olduğu görülmüştür.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Geopolimer

Beton endüstrisinde, kireçtaşı rezervlerinin sınırlı olmasına bağlı olarak üretimin yavaş ilerlemesi ve karbon emisyonunun artması sebebiyle portland çimento (PÇ) ihtiyacını karşılamakta zorluklar mevcuttur. Hindistan'da ülkenin altyapı faaliyetlerinin artması nedeniyle çimento talebinin sürekli arttığı bildirilmektedir (B. Singh vd., 2015a). Bu yetersizliklere çözüm bulma hedefleri arasında inşaatın zararlı çevresel etkisini azaltmak, atık puzolanlar kullanmak vardır. Ayrıca beton performansını iyileştirmeyi amaçlayan PÇ'ye alternatif bağlayıcıların geliştirilmesi de bu hedefler arasında yer almaktadır (Shi vd., 2011).

Çimento genellikle beton üretiminde ana bağlayıcı olarak kullanılmaktadır (Javeed vd., 2015). Çimento, kireçtaşının çok yüksek sıcaklıkta karbon emisyonu ile üretilmektedir. Bu nedenle, üretim büyük miktarda enerji gerektirmektedir. Üretim prosesi, küresel olarak CO₂ salınımlarının %5-7'sine denk gelmektedir (Das vd., 2018). Bu oranın çimento üretimine bağlı olarak artacağı tahmin edilmektedir (Eren, 2021). Bu nedenle son 50 yılda çimentonun kötü çevresel etkisinden korunmak için birçok çalışma yapılmıştır (Nuruddin vd., 2011). Araştırmalar sonucunda geopolimer gibi alternatif malzemeler bulunmuştur.

Geopolimer kelimesi ilk olarak Davidovits tarafından ortaya atılıp kullanılmıştır (Joseph Davidovits, 1988; Şinik, 2019). Keşfinden sonra, birçok antik yapıda (mısır piramitleri vb.) kullanıldığı tespit edilmiştir ve bu yapılar incelenmiştir (J Davidovits, 1988; J. Davidovits, 1984). Geopolimer, kireç ve PÇ'den sonra 3. nesil çimento olarak kabul edilmektedir. Geopolimer terimi genellikle "inorganik polimerler", "alkali aktif çimentolar", "geocementler", "alkali bağlı seramikler", "hidroseramikler" gibi belirsiz şekil yapısına sahip alkali alümin silikatı tanımlamak için kullanılmaktadır (Fernández-jiménez, 2015). Silika moleküllerinin zincir bağlarından oluşmuş silokson ya da silikat moleküllerinin alüminat molekülleri ile oksijen atomu elektronlarını paylaşması sonucu elde edilen polisialatların keşfi ile geopolimer kimyasının temelleri atılmıştır (Shaw, 2003).

2.1.1 Geopolimerin yapısı

Genel olarak geopolimer; atık malzemelerden elde edilen mineral katkıları gibi ağırlıklı olarak silisyum (Si) ve alüminyum (Al) malzemedan sentezlenen yarı amorf inorganik alümina-silikat polimer sınıfına girmektedir (Van Jaarsveld vd., 1999). Diğer kristal yapıları zeolit malzemelere kıyasla şekli yoktur (Ma vd., 2018a; Palomo vd., 1999a; A. K. Singh, 2016). Geopolimer içerisinde su maddelerini tutarak 80°C’de sentezlenebiliyorken zeolit 150–250°C’de yapısı içinde boşlukları bırakarak kristalleşmektedir (Shaw, 2003). Fakat bunun yanı sıra geopolimer bileşenlerinin sentetik yapısı zeolitler ile benzer özelliktedir (J. Davidovits, 1991; P. J. Davidovits, 2002).

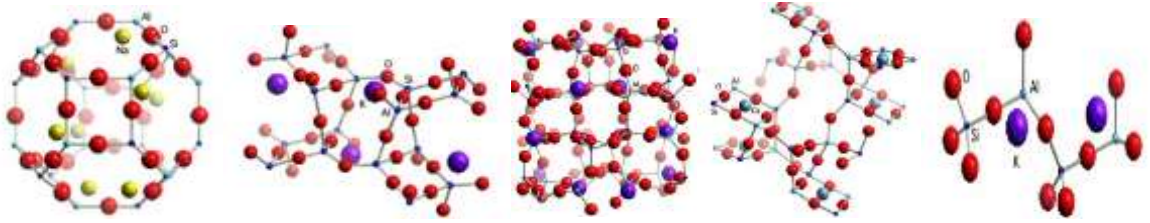
Geopolimerlerin betondaki mekanizması ise fırınlanmış kilin yapısındaki alüminat ve silikatların, oksijen atomu elektronlarını ortak kullanarak kovalent bağlı bileşikler oluşturmasıyla meydana gelmektedir (Yalghuz, 2020). Özellikle kaolin kili içerisinde yer alan Al ve Si elementlerinin oksitli bileşikler bağlayıcılık ve hacimsel tokluk sağlayıcı monomerler oluşturmaktadır (M. I. A. Aleem ve Arumairaj, 2012). Molekül yapısını belirleyen en önemli etken jeolojik toprak kaynak ve aktivatörlerin toplam Si:Al molar oranıdır (M. I. A. Aleem ve Arumairaj, 2012; Rangan, 2008). GB üretiminde yaygın olarak kullanılan alüminosilikat malzemeleri uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC)’dur. (Pacheco-Torgal vd., 2014). Bunlar silisyum ve alüminyum malzemedan sentezlenen inorganik alümina-silikat polimerleri bağlayarak polimerik bir reaksiyon üretmektedir (A. K. Singh, 2016).

Literatürde kaynak malzemelerin farklılıklarına bağlı olarak tanımlanmış farklı türde GB’ler bulunmaktadır. Bunlar camsuyu, kaolin hidrosodalit, metakaolin, kalsiyum, kayaç, silika, UK, fosfat, organik maden esaslı GB’ler olarak ayrılmaktadır (Anon., 2018; Polat, 2019).

2.1.2. Geopolimerizasyon

Geopolimerizasyon fırınlanmış kilin yapısındaki alüminat ve silikatların, oksijen atomu elektronlarını ortak kullanarak kovalent bağlı bileşikler oluşturmasıdır (Yalghuz, 2020). Kaolinit ve metakaolinit, geopolimerizasyon üzerine daha önceki çalışmaların çoğunda kullanılan nispeten ucuz alümina-silikatlardır (Joseph Davidovits ve Comrie, 1988;

Palomo, A., Macias, A., Blanco, M.T., Puertas, 1992; Rahier vd., 1996; Van Jaarsveld vd., 1998, 1999).



Şekil 2.1. Geopolimerizasyon ile elde edilecek bazı alüminosilikat kafes yapıları model görünümleri (1. Na-PS, 2. K-PSDS, 3. K-PSS, 4. Ca-PS, 5. K-PS)(Nguyễn vd., 2008; Xu, Hua, 1999)

Geopolimerizasyon işlemi çözünme, yeniden düzenleme, yoğunlaşma ve polimerizasyon süreçlerinden oluşmaktadır. Geopolimerin bu süreç modeli Davidovits tarafından sunulmuştur (Joseph. Davidovits, 1999; P. J. Davidovits, 2002). Alüminosilikatın çözünmesi ve yeniden düzenlenmesi çeşitli oligomerler oluşturmaktadır (M. Zhang vd., 2018). Oligomerler de büyük polimerleri bağlayarak oluşmaktadır (Xu ve Van Deventer, 2000). Oligomerler bağlandığında, uçlarındaki OH grupları bir oksijen atomunu paylaşarak suyu tutmakta ve serbest bırakmaktadır (Xu ve Van Deventer, 2000).

Geopolimerizasyonda kullanılan en yaygın alkali çözeltisi, NaOH / KOH ve Na_2SiO_3 veya K_2SiO_3 'ün bir bileşik çözeltisidir (Djwantoro Hardjito vd., 2004; Moradikhou vd., 2020). Alkali çözeltiler beton dayanımı açısından büyük önem arz etmektedir. Zira Rashad yaptığı çalışmasında, GB'nin basınç dayanımının NaOH çözeltisinin konsantrasyonu ile belirli bir noktaya kadar arttığını gözlemlemiştir (Moradikhou vd., 2020; Rashad, 2013a).

Geopolimerizasyonda, alümina-silikat tozunun alkali çözeltiye ağırlık oranı çok yüksektir. Bu oran genellikle 3.0 ila 5.5 arasında olmaktadır (Palomo, A., Macias, A., Blanco, M.T., Puertas, 1992; Van Jaarsveld vd., 1998).

2.2. Geopolimer Beton

Son yıllarda GB; yüksek erken dayanım, düşük büzülme, donma-çözülme, sülfat ve korozyon direnci, düşük geçirgenlik, iyi kimyasal ve yangın direnç davranışı nedeniyle bu bağlayıcılar arasında büyük ilgi görmüştür (J. Davidovits, 1991; Joseph Davidovits vd.,

1999; Fernández-jiménez, 2015; Komnitsas, 2011; C. Li vd., 2010; Provis ve Van Deventer, 2009; Raijiwala ve Patil, 2010; Ramesh, 2021). Bu avantajlı özellikleri nedeniyle GB,

- ❖ Yüksek dayanım ve dayanıklılık gerektiren kimya ve nükleer endüstrilerinde
- ❖ Yangına dayanıklı kaplamalarda
- ❖ Elyaf takviyeli kompozitlerde
- ❖ Atık immobilizasyon çözümleri yapımında

çeşitli sürdürülebilir ürünler geliştirmek için PÇB'ye karşı farklı bir seçenek olarak kullanılabilecek bir malzeme olmuştur (B. Singh vd., 2015b).

GB'ler, inorganik moleküllerle oluşmuş geniş ölçekli bir malzemeyi tanımlamaktadır (M. A. Aleem ve Arumairaj, 2012). GB matrisini ince ve kaba agregalar, bağlayıcı olarak yüksek silika ve alümina içeriğine sahip mineral katkıları ve sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3) veya potasyum silikat (K_2SiO_3) gibi aktivatörler oluşturmaktadır. GB matris bağlaması için herhangi bir suya ihtiyaç duymamaktadır. Bunun yerine alkali çözelti mineral katkıda bulunan silis ve alüminyum ile reaksiyona girmektedir (J. Davidovits, 2010, 1984; Joseph Davidovits, 2011).

Kaynak malzemeler ve alkali çözeltiler GB'lerin iki ana bileşenidir ve bu kaynak malzemeler alüminat-silikat bazlı GB'ler için Si ve Al bakımından zengin olmalıdır. Bu bağlayıcılar, metakaolin, killer vb. gibi farklı doğal malzemelerden veya alternatif olarak YFC, UK, maden atıkları, kırmızı çamur, pirinç kabuğu külü gibi yan ürün malzemelerinden yapılabilmektedir (Duxson ve Provis, 2008; Embong vd., 2016; Hos vd., 2002; Meesala vd., 2020; Slaty vd., 2013).

GB'nin özellikleri, belirli bir uygulamaya uyacak şekilde doğru hammadde seçimi, doğru karışım ve işleme tasarımı ile optimize edilebilmektedir (Fernández-jiménez, 2015).

2.2.1. Uçucu kül katkılı geopolimer betonlar

Puzolanik malzemeler, yüksek SiO_2 ve genellikle de Al_2O_3 , H_2O ve CaO ile karışım oluşturmaktadırlar. Bu karışımdan normal sıcaklıklarda C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) üretilmektedir. Böylece puzolanik malzeme hidrolik çimento görevi görmektedir. Bu reaksiyonlar kilin kalsine edilmesiyle veya düşük kalsiyumlu UK'lerin kullanılmasıyla elde edilebilmektedir. Böylece, puzolanik reaksiyonlarda UK kullanımı desteklenmiştir (Swanepoel ve Strydom, 2002; Taylor, 1997).

F sınıfı UK, enerji üretim endüstrilerinden üretilen önemli bir yan üründür. F sınıfı UK alkali aktivatörler tarafından aktive edildiğinde, camsı yapılar PÇB ile benzer mekanik özelliklere sahip amorf kompozitlere dönüştürülmektedir (D Hardjito vd., 2005).

Taze ve sertleştirilmiş F sınıfı UKGB (F-UKGB), taze ve sertleştirilmiş PÇB ile birçok farklılığa sahiptir. Taze F-UKGB, yüksek viskoziteye ve düşük akışkanlığa sahip yapışkan bir betondur. Betonun çökmesini test etmenin geleneksel yolları, F-UKGB işlenebilirliğini ölçmek için uygun değildir (D Hardjito vd., 2004). Birincisi, F-UKGB çelik ile yüksek yapışma göstermektedir ve testler sırasında çelik çökme aletine yapışma eğilimindedir. Diğer yandan taze F-UKGB viskozitesi yüksek olsa da, yüksek su tutma özelliği ve titreşime iyi tepki vermesinden dolayı uygulamada kolaylık sağlamaktadır (Djwantoro Hardjito vd., 2004).

Diaz-Loya ve ark., çalışmalarında UKGB'nin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçta GB'nin mekanik davranışının PÇB ile benzer olduğunu, ACI 318-08 tarafından verilen benzer denklemler ile UKGB için eğilme mukavemetinin ve statik elastik modülün belirlenebileceğini öne sürmüşlerdir (Diaz-Loya vd., 2011).

Cui ve ark., yaptıkları çalışmada, PÇB'nin dolaylı çekme mukavemetini tahmin etmek için kullanılan mevcut hükümlerin F-UKGB için doğru sonuçlar vermediğini bildirmişlerdir. Bununla beraber F-UKGB'nin çekme mukavemetinin, basınç dayanımındaki artışla yaklaşık orantılı bir şekilde arttığını ve korelasyonun temelde doğrusal olduğunu savunmuşlardır (Cui vd., 2020).

Rangan 2008'de yayımladığı araştırma raporunda, düşük kalsiyumlu UKGB'nin mükemmel basınç dayanımına sahip olması nedeniyle yapısal uygulamalar için uygun olduğunu bildirmiştir. Bunun yanı sıra sertleştirilmiş GB'nin elastik özelliklerinin; güçlendirilmiş GB'nin yapısal elemanlarının davranışının ve mukavemetinin PÇB'de gözlenenlere benzer olduğunu tespit etmiştir. Buradan yola çıkarak mevcut standartlarda yer alan tasarım hükümlerinin, güçlendirilmiş F-UKGB'nin yapı elemanlarının tasarımında kullanılabilir olduğunu raporlamıştır (Rangan, 2008).

2.2.2. Yüksek fırın cürufu geopolimer betonlar

YFC, GB'yi oluşturmak için mikron düzeyinde öğütüldüğünde ve diğer malzemelerle birleştirildiğinde mükemmel özellikler sergilemektedir (Jain ve Pal, 1998; Shukla vd., 2009). YFC'nin cam içeriği tipik olarak toplam hacminin % 85'ini aşarken, özgül

ağırlığı 2.7 ila 2.90 arasında (PÇ'den daha düşük) ve kütle yoğunluğu 1200-1300 kg/m³ arasında değişmektedir (Saraya, 2014). YFC, gözenekleri rafine etmek ve betonun uzun vadeli mukavemet, sülfat ve alkali silika reaksiyon direncini arttırmanın yanı sıra hidrasyon işlemi sırasında su talebini, geçirgenliğini ve ısı üretimini azaltmak için kullanılabilir (Castel ve Foster, 2015; D. Suresh, 2015; Dimas vd., 2009; Hadjsadok vd., 2012; Saraya, 2014). GB üretiminde, YFC'de bulunan Al ve Si, agregaları bağlayan aktivatörlerle GB harcını aktive etmektedir (Islam vd., 2014, 2015). YFC'nin artan ilavesinin, aside karşı direnci ve GB'nin tüm kütleme koşullarında basınç dayanımını artırabileceği sonucuna varılmıştır (Y. H. M. Amran vd., 2020; B. N. Sangeetha, 2015; Ganesh Babu ve Sree Rama Kumar, 2000).

Yang ve ark., YFC bazlı GB'lerin çok daha yüksek basınç dayanımı sergilediğini, ancak aynı karıştırma koşulu için UKGB'lere göre biraz daha az akış sergilediğini bulmuşlardır (K.-H. Yang ve Song, 2009; K. H. Yang vd., 2009).

2.2.3. Silis dumanlı geopolimer betonlar

SD betondaki PÇ'nin kısmi bir ikamesi olarak yaygın olarak kullanılmıştır (Anuradha vd., 2014; Saraya, 2014). SD, silikon metal veya ferrosilikon alaşımı üretiminin bir yan ürünüdür.

Amran ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, puzolandaki silikanın, mukavemet artışına katkısı olduğunu göstermiştir (Y. H. M. Amran vd., 2020; Ramujee ve Potharaju, 2017; B. Singh vd., 2015b). SD reaksiyonu sonucunda beton matrisini kaplayan bir bağlayıcı üretilmiş olur. Böylece betonun; işlenebilirlik, mukavemet ve dayanıklılık özelliklerinin geliştiği bildirilmiştir (Sakulich, 2011; Sashidhar vd., 2016; B. Singh vd., 2015a; Tawfik vd., 2021; Tayeh vd., 2013).

Ma ve ark., raporladıkları derlemede, ince SD'nin basınç dayanımını arttırdığı, kaba SD'nin ise mukavemetin azalmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Yoğunlaştırılmış SD kullanıldığında, en yüksek eğilme mukavemetine sahip GB ile sonuçlandığını bildirmişlerdir (Ma vd., 2018a).

2.2.4. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu geopolimer betonlar

SD ilavesinin, GB'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmış ve basınç dayanımını arttırdığı bildirilmiştir (Bhanja ve Sengupta, 2005; Collins ve Sanjayan, 1999; Dutta vd., 2010; Gifford ve Gillott, 1997; Mazloom vd., 2004; Francis N. Okoye vd., 2017; Shannag, 2000). Ayrıca YFC bazlı GB'ye SD eklenmesi ile betonun işlenebilirliği artmaktadır (Basheer ve Antherjanam, 2020).

Mustakim ve diğ., %1.5 SD replasmanında YFC bazlı GB'nin erken yaş dayanımının arttığını savunmuşlardır (Mustakim vd., 2021).

Basheer ve Antherjanam çalışmalarında, YFC bazlı GB'lere %10, %20, %30, %40, %50, %60 oranlarında SD ekleyerek SD'nin işlenebilirlik ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. YFC'li GB'nin ortam küründe diğer numunelere kıyasla en yüksek basınç dayanımını verdiğini bulmuşlardır. Aynı zamanda SD katkı oranı arttıkça eğilmede çekme dayanımının düştüğünü fakat işlenebilirliğin arttığını tespit etmişlerdir (Basheer ve Antherjanam, 2020).

Shahmansouri ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, YFC bazlı GB'ye farklı oranlarda SD eklenmiştir. Bütün numuneler için 7, 28 ve 90. gün basınç dayanımları izlenerek optimum oran bulunmaya çalışılmıştır. Farklılık gösteren bir diğer parametre ise NaOH konsantrasyonu olmuştur. Sonuçta maksimum 28. gün basınç dayanımına %30 SD ve 4 Mol NaOH ile ulaşılmıştır (Shahmansouri vd., 2021).

Gupta araştırmasında, %40 YFC ve %60 SD ilaveli GB betonların basınç dayanımı üzerinde alkali aktivatör etkisini incelemiştir. Sonuçta $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının 2.5 ve katalitik sıvı/bağlayıcı oranının 0.4 seçildiği numunelerin, maksimum basınç dayanımı verdiği tespit edilmiştir (Gupta, 2021). Gupta ve arkadaşları, 12 mol NaOH ve alkali aktivatör oranının 2 olduğu YFC ilaveli GB'ye, %5, %10, %15, %20, %25, %30 oranlarında SD ekleyerek betonun mekanik özelliklerini incelemiştir. En yüksek dayanımı veren oranın, YFC%90 -SD%10 kullanıldığı numune olduğu belirtilmiştir (Gupta vd., 2021).

Mevcut literatürden, UK ve YFC dışında farklı bağlayıcı kombinasyonları üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu gözlenmektedir (Patil vd., 2023). Bu nedenle, bu tez araştırmasında, UK'nin yanı sıra farklı bağlayıcı bazlı GB'ler üzerinde çalışılmıştır.

2.2.5. Bazalt lifli geopolimer beton

GB'ye lif takviyesinin temel amacı matriste oluşabilecek makro ve mikro çatlakları kırılma tokluğunu arttırarak önlemektir. Kırılma tokluğu ise lifin beton içindeki hareketleri ile sağlanmaktadır (Shah vd., 1995). Başlangıçta oluşan büyük çatlaklar liflerin betondaki varlığı ile kontrol altına alınabilmektedir. Fakat çatlama sonrası betonun davranışı, mukavemet, tokluk ve dayanıklılığının artmasıyla önemli ölçüde değiştirilebilmektedir (D. Dias, 1999). BL bazlı GB'ler (BLGB), PÇB'ye göre gelişmiş mekanik özellikler göstermektedir (Brik, 2003, 1999). Literatürde bunun gibi kıyaslama çalışmaları mevcuttur.

GB'ye dahil edilen BL, geliştirilmiş mukavemet özellikleri göstermektedir. BLGB, başlangıç ve bitiş priz alma süresinde iyileştirilmiş mekanik özellikler ve değişiklik göstermektedir (Kusbianoro vd., 2012). BL'nin %1 ilavesi hem kopma gerilimini hem de basınç dayanımını azaltmakta, ancak VeBe süresini arttırmaktadır (Fiore vd., 2015). BL'nin dahil edilmesiyle işlenebilirlikte azalış gözlemlenmektedir (Y. Wang vd., 2021). BL, polipropilen elyaftan daha fazla mekanik özellik göstermekte ve betonun tokluk indeksini iyileştirmektedir (Algin ve Ozen, 2018). Artan lif ilavesi, elastisite modülünde azalma göstermektedir. BL ilavesi, dikkate değer bir basınç dayanımı olmadan enerji emme ve deformasyon direnci kapasitesini artırmaktadır (Tran vd., 2020). BL, diğer liflerle karşılaştırıldığında uygun maliyetlidir. Geopolimer betona BL ilavesi yeni bir uygulamadır (Quagliarini vd., 2016).

Ronad ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, UK ve YFC bazlı GB'lere %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5 oranlarında BL ekleyerek betonun basınç ve yarmada çekme dayanımını incelemişlerdir. Sonuçta %2 BL ilavesi her iki parametre için optimum değeri vermiştir (Ronad vd., 2016).

Annadurai ve diğ., çalışmalarında pirinç kabuğu külü UK ve YFC bazlı GB'ye hacimce %1, %2, %3, %4 oranlarında BL ilave ederek mekanik deneyler yapmışlardır. %2 BL ilavesinin hem basınç dayanımında hem de eğilmede çekme dayanımında en yüksek değeri verdiği bulunmuştur (Annadurai vd., 2023).

Li ve Xu çalışmalarında, UKGB'ler üzerinde hacim fraksiyonları %0.1, %0.2, %0.3 oranlarında BL ilave etmişlerdir. Her oran için BL katkısının, GB'nin deformasyon ve enerji emme kapasitelerini önemli ölçüde artırabilirken, dinamik basınç dayanımında kayda değer bir değişme olmadığını gözlemlemişlerdir (W. Li ve Xu, 2009b).

El-Gelani vd., polimerlere BL dahil edilmesiyle betonun basınç dayanımının olumlu etkilendiğini gözlemlemişlerdir. Deneysel çalışmalarında, optimum lif uzunluğunun 30 mm, içeriğin ise %0,3-%0,5 arasında olduğunu bildirmişlerdir (El-Gelani vd., 2018).

Faiz Şeyh vd., UKGB'yi potasyum aktivatörleri ile aktive etmişlerdir. GB'ye ağırlıkça %0.5, %1, %1.5 oranlarında karbon ve bazalt lif ilave ederek dayanımdaki değişimleri incelemişlerdir. Sonuçta ağırlıkça %1 BL ve %1 karbon lif içeren GB'lerin daha yüksek mukavemet sergilediği gözlenmiştir (Shaikh ve Haque, 2018).

XinjianSun vd., deneylerinde BL içeriğinin artmasının başlangıçta yarmada çekme ve basınç dayanımını arttırdığını kaydetmişlerdir. Fakat eğilme dayanımının sürekli bir şekilde artış gösterdiği gözlemlenmiştir (Sun vd., 2019).

Saloni vd., BL ilavesinin, GB'nin mikroyapısını, taze ve sertleşmiş hallerini nasıl etkilediği sorusuna yanıt aramışlardır. Çalışmalarında BL'nin priz süresi, bulk yoğunluğu, basınç ve eğilme dayanımı üzerinde olumlu etki yarattığını keşfetmişlerdir (Saloni vd., 2020).

Her ne kadar literatürde GB'ler hakkında birçok araştırma bulunsada spesifik olarak YFC ve SD bağlayıcılı BLGB'lerin darbe dayanımı hakkında eksiklik gözlemlenmiştir.

2.3. Dayanım Faktörleri

Önceki çalışmalar, GB'nin; yüksek erken mukavemete; düşük büzölmeye; donma-çözünme, sülfat, korozyon ve asit direncine; yangına ve alkali agrega reaksiyonuna karşı dayanıklılığa sahip olduğunu göstermiştir (Wallah ve Rangan, 2006; Živica vd., 2015). Bunun yanı sıra GB'lerin, PÇB'ye göre mükemmel hacim kararlılığı ve daha iyi dayanıklılık sergilediği gözlemlenmiştir (Nguyễn vd., 2008). Betonların kıyaslanabilmesi için en önemli parametre dayanımdır. Buna bağlı etkenler sırasıyla incelenmiştir.

2.3.1. Aktivatörler

Kimyasal aktivatörler, GB'nin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü geopolimerizasyon işleminin başlatılması, kimyasal aktivatörün hem tipinin hem de konsantrasyonunun etkisi altındadır. Al ve Si' nin hammaddeden düzgün bir şekilde çözünmesi için yeterli konsantrasyona sahip bir kimyasal aktivatör olması gerekmektedir. Öte yandan, kimyasal aktivatör konsantrasyonunun yetersiz olması durumunda

reaksiyonların sınırlanacağı anlaşılmaktadır (Fernandez-Jimenez vd., 2007a; Ramezaniapour vd., 2016; Wallah ve Rangan, 2006).

Genellikle GB hazırlanma süreçlerinde, NaOH ve Na₂SiO₃ gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır (Yalghuz, 2020). GB’lerde mukavemet, bir alkali aktivatör olan NaOH’ın molaritesi ile doğru orantılıdır (Verma ve Dev, 2021b). Bunun yanı sıra GB’nin yoğunluğu ve eğilme mukavemeti NaOH konsantrasyonuna göre değişmektedir (El Hafid vd., 2017). Rashad yaptığı çalışmada, GB’nin basınç dayanımının NaOH çözelti konsantrasyonu ile belirli bir noktaya kadar arttığını gözlemlemiştir (Moradikhrou vd., 2020; Rashad, 2013b; Sravanthi vd., 2020a). Fakat NH konsantrasyonunun ya da NS miktarının artırılması, GB’nin işlenebilirliğini azaltacağını bildirilmiştir (Ghazy, 2017).

Eşit konsantrasyonları dikkate alınmış aktivatörlerin basınç dayanımı açısından aktivasyon potansiyeli aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Komljenović vd., 2010):



Sıralama esas alındığında NaOH’daki çözülmenin KOH’dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat GB’de NaOH yerine KOH kullanıldığında dayanım %42 daha yüksek çıkmıştır (Xu ve Van Deventer, 2000). Buna rağmen literatürde yer alan bazı çalışmalarda, bu sonuçtan bağımsız olarak, NaOH’ın Na₂SiO₃ ile beraber kullanımının geopolimerizasyon sürecini, diğer aktivatörlere göre daha az malzeme ve daha hızlı şekilde aktive ettiği belirtilerek aktivatör olarak daha çok NaOH tercih edilmiştir (Joseph. Davidovits, 1999; Ma vd., 2018a; Ryu vd., 2013a; Swanepoel ve Strydom, 2002; Xu ve Van Deventer, 2000, 2002).

2.3.2. Alkali-bağlayıcı oranı

Dayanımı etkileyen bir diğer parametre ise alkali bağlayıcı oranının değişimidir. YFC eklenen GB’nin basınç dayanımı; alkali-bağlayıcı oranındaki artışla yükselmektedir (A. K. Singh, 2016; Yılmaz Polat, 2022; Yılmaz Polat ve Uysal, 2021; Yılmaz Polat vd., 2020).

GB’yi sentezlemek için alümino silikat esaslı bağlayıcı ve alkali aktivatör gerekmektedir (Tablo 2.1) (Esaifan vd., 2016; Liew vd., 2016; Salih vd., 2014; B. Singh vd., 2015a).

Tablo 2.1. GB'yi oluşturan temel bileşenler (N. B. Singh ve Middendorf, 2020)

Alümino silikat kaynak malzemesi	Alkali aktivatör
Kalsine killeri, UK, pirinç kabuğu külü, cüruf, atık cam, bakır madeni atıkları, zeolit, saf $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$ tozu ve Na_2SiO_3 , magnezyum içeren mineraller	NaOH , KOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$, $\text{K}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ sodyum silikat (diğer silikatlar da)

GB özelliklerini etkileyen en önemli etkenler $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı, $\text{R}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı, $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}$ oranı ($\text{R} = \text{Na}$ veya K) ve sıvı-katı oranı olarak sıralanabilmektedir (Almutairi vd., 2021; Ishwarya, 2013; Raijiwala ve Patil, 2010; Van Jaarsveld ve Van Deventer, 1999; Xu ve Van Deventer, 2002; B. Zhang vd., 2009).

2.3.3. Kür şartları

Dayanımı etkileyen bir başka parametre kür koşullarıdır. Kür sıcaklığının artırılmasıyla GB performansının %70'e kadar artacağı belirtilmiştir (A. Ali vd., 2016). Kürleme sıcaklığının metakaolin bazlı GB'nin gücünü etkilediği bulunmuştur (A. Ali vd., 2016). Aynı zamanda Singh (2016), GB'lerle ilgili yaptığı çalışmada kürlenme süresi ve sıcaklık arttıkça GB'nin basınç dayanımının arttığını bildirmiştir (A. K. Singh, 2016). Vinothkumar ve arkadaşları (2019) yaptıkları derlemede 70°C 'de yapılan kürlemenin ortam kürlemesine göre daha yüksek mukavemet verdiğini ayrıca 48 saat ve 70°C ısı kürlemesinde su-geopolimer katı oranı 0.33 olan karışıma %12 ilave su eklenmesi ile beton basınç dayanımının artabileceği sonucuna varmışlardır (Vinothkumar vd., 2019).

UK ve YFC bazlı GB ile yapılan başka bir çalışmada, ortamda kürlenmiş numunelerin, fırında kürlenmiş numunelerden daha az mukavemete sahip olduğu ancak her iki kürlenmiş numunede %75 UK, %25 YFC oranının maksimum dayanım verdiği sonucuna varılmıştır. YFC dozajı %25'in üzerinde kullanıldığında, karışım tasarımlarındaki mukavemeti biraz azalttığı görülmüştür. Bunların yanı sıra ortamla kürlenen numunelerin en yüksek ortalama basınç mukavemetine, fırınla kürlenen numuneye göre daha yüksek bir yoğunluğa ve poisson oranına sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Verma ve Dev, 2021a).

GB numuneler, basınçla birlikte 350°C 'lik sabit bir sıcaklıkta ısıtılma tabi tutulmuştur. Sonuçta sıcak pres kürlemesinde basınç dayanımı artmıştır. Daha yüksek basınçlarda, GB matrisindeki sıkışan hava gözenekleri çıkarak yoğunluğun artmasına neden olmuştur (Ranjbar vd., 2017; N. B. Singh ve Middendorf, 2020).

Kürleme sırasında numunenin aşırı ısınmasıyla iç gerilmelere bağlı çatlaklar oluşmaktadır. Bu durum, yapıyı zayıflatarak mekanik mukavemeti önemli ölçüde azaltmaktadır (F. N. Okoye vd., 2015; J. Yuan vd., 2016). Aynı zamanda daha düşük bir sıcaklıkta (75 °C) daha uzun süre (72 saat) kürleme, mikro çatlakların oluşumuna yol açmaktadır (Matli, Penchal Reddy, Adel Mohamed Amer Mohamed, 2015; N. B. Singh ve Middendorf, 2020).

2.3.4. Mineral katkılar

Beton dayanımını aynı zamanda mineral katkı olarak adlandırdığımız malzemeler de etkilemektedir. Bu nedenle GB incelenirken UK, YFC, metakaolin ve silis dumanı (SD) (Şekil 2.2) gibi mineral katkıların betona katılması dayanım açısından iyileştirici bir etki yaratmaktadır. Ayrıca, pirinç kabuğu külü, kül kalıntısı vb. gibi mevcut tarımsal ve endüstriyel atıklar PÇ ve ithal katkı maddelerinin yerine kullanılabilir. Daha ucuz doğal puzolanların veya atık malzemelerin bu şekilde değerlendirilmesi, önemli bir tasarruf sağlayabilmekte ve PÇ üretimi sırasında oluşan zararlı çevresel etkileri azaltabilmektedir (Matsagar, 2015; Van Lam vd., 2018).



Şekil 2.2. GB içerisine katılan mineral katkılar (sırasıyla YFC, UK SD, metakaolin, pirinç kabuğu külü)(Dana, 2022; Engin, 2014)

2.3.4.1. Uçucu kül

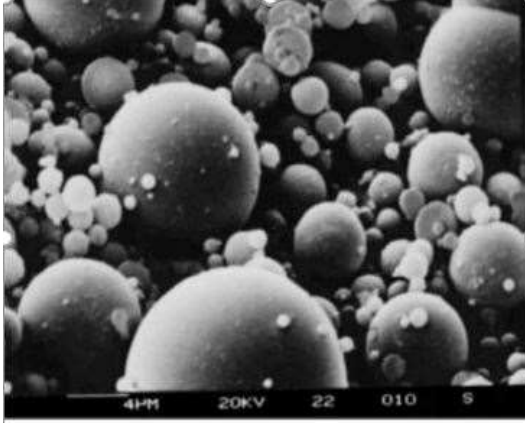
UK'nin geri dönüşümü, artan çöp sahası maliyetleri ve sürdürülebilir kalkınma ile ilgili endişeler sebebiyle araştırmalara konu olmuştur. UK'nin geri dönüşümünün çevresel faydaları, taş ocağına ihtiyaç duyacak işlenmemiş malzemelere olan talebin azaltılmasını ve PÇ gibi malzemelerin ucuz ikamesini içermektedir ("Fly Ash", 2018).

UK'ler betonda mineral katkı olarak kullanılan, kendi başlarına bağlayıcılığı olmayan, sıcaklık etkisiyle uçabilen ve ince taneli yapıda bulunan yapay puzolanlardır (Görür, 2015). UK; YFC, metakaolin vb. jeolojik kaynaklardan elde edilen diğer alüminosilikat malzemeler gibi enerji üretimi sırasında termik santraller tarafından üretilen atıklardır (Fernandez-Jimenez vd., 2007b; Ramezaniapour vd., 2016; Wallah ve Rangan, 2006). Bu atıklar, sönmüş kireçle hidratasyona uğrayarak suda sertleşmekte ve betonun olası etkilere karşı dayanımını arttırmaktadır (Görür, 2015). Öyle ki UK ilaveli GB'lerin (UKGB) asit ortamında dahi yüksek dayanıma sahip olduğu ve PÇB'ye göre daha az deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir (Yalghuz, 2020).

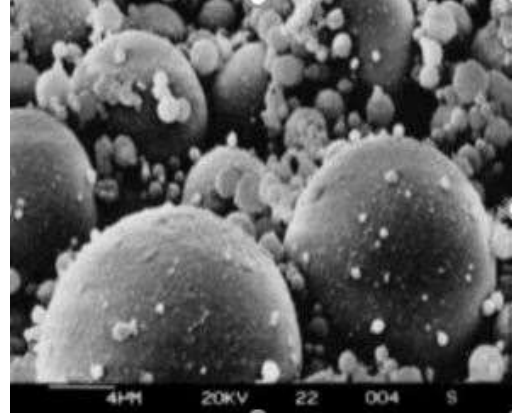
ASTM C618 tarafından, F Sınıfı ve C Sınıfı olmak üzere iki UK sınıfı tanımlanmıştır. Bu ayrımın sebebi, malzeme içeriğinde bulunan kalsiyum, silika, alümina ve demir miktarından kaynaklanmaktadır. UK'nin kimyasal özellikleri yakılan kömürün kimyasal içeriğinden etkilenmektedir (ASTM C-618-03, 2010).

C sınıfı UK, yüksek dereceli kömürden, F sınıfı UK ise düşük dereceli kömürden üretilmektedir. Bu nedenle C sınıfı UK'de daha yüksek bir kalsiyum oksit içeriği bulunmaktadır (Nakshatra B. Singh, 2018; Yousuf vd., 2020). Farklı sınıflara ayrılmış olan UK'ler, değişik kimyasal içerikleri sebebiyle katıldığı betonun bağlayıcılık özelliklerinde değişkenlikler yaratabilmektedir. Daha düşük kalsiyum oksit içeren UK yüksek ısı gerektirmeyen kür koşullarında 65 MPa basınç dayanımı vermiştir (Liew vd., 2016; Part vd., 2015). Bu yüzden F sınıfı UK, GB üretiminde daha fazla kullanılmaktadır. Fakat F sınıfı UK'nin ortam sıcaklığında reaksiyona girememesi sonucu bağlayıcılık özelliğinin olmaması en büyük dezavantajlarından birisi olmaktadır. GB üretiminde C sınıfı UK'lerin tercih edilmemesinin sebepleri ise daha düşük alüminyum oksit ve silisyum oksit içeriğine sahip olması ve hızlı priz alması şeklinde açıklanabilmektedir (Tuyan ve Ramyar, 2017).

F ve C sınıfı UK'lerin SEM görüntüleri Şekil 2.3 ve şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.3. F sınıfı uçucu kül (Caijun Shi, Della Roy, 2006)



Şekil 2.4. C sınıfı uçucu kül (Caijun Shi, Della Roy, 2006)

GB'ye katılan UK'nin karışım özelliklerini önemli ölçüde etkileyen faktörler, UK'nin kimyasal ve mineralojik birleşimi, kür şartları ve karışımında kullanılan alkali çözeltinin molaritesi şeklinde belirtilmiştir. UK'nin etkinliğini arttırmak için yüksek kür sıcaklığı gerekmektedir. Çünkü kür sıcaklığı arttıkça GB mukavemetinde bir artış gözlenmektedir (Fernández-Jiménez ve Palomo, 2003; Kong ve Sanjayan, 2008; Palomo vd., 1999b).

2.3.4.2. Yüksek fırın cürufu

YFC, demir cevheri ve kireçtaşı karışımının yaklaşık 1500 °C sıcaklıktaki bir fırına konulması sonucunda oluşmaktadır. YFC kimyasal olarak kalsiyum oksit, silikat, alüminat, magnezyum ve bir miktar demir oksitten oluşmaktadır. Puzolanik bir malzeme olan YFC, yapısında bulunan yüksek Si ve Al içeriğinin varlığı nedeniyle GB'de kaynak malzeme olarak kullanılabilir (Mishra vd., 2019).

Betonun ısıl kür görmeden dayanım ve dayanıklılığın artması için genellikle YFC tercih edilmektedir (Yalghuz, 2020). UK'lerin tek başına ısıl kürsüz dayanım kazanamaması fakat YFC'lerin bu sorunu çözebilmesi sebebiyle hem UK hem de YFC içeren betonların nasıl tepki verdiğini inceleyen çalışmalara bakılması gerekmektedir. Bu nedenle UK ve YFC'nin beraber kullanıldığı bazı çalışmalar incelenmiştir.

Abhilash ve arkadaşlarının makalelerinde, YFC ile harmanlanmış UKGB karışımlarının, sadece UKGB karışımlarında olduğu gibi, ısı kürüne ihtiyaç duymadan ortam

sıcaklığında iyileştirilmiş mekanik özellikler gösterdiğini tespit etmişlerdir (Abhilash vd., 2016).

Nagalingam ve Chokkalingam'ın deneylerinin sonuçlarına göre, tüm testlerde UK ile YFC replasmanının %20'si için maksimum değerler elde edildiği ve replasmanın %20'nin üzerine çıkıldığı zaman mukavemeti azaltacağı rapor edilmiştir. Ayrıca YFC ve UKGB'nin PCB için en iyi alternatif olduğu savunulmuştur (Nagalingam ve Chokkalingam, 2020).

Vinothkumar ve arkadaşları yaptıkları derlemede, 70°C'de yapılan kürlemenin ortam kürlemesine göre daha yüksek mukavemet verdiğini bildirmişlerdir (Vinothkumar vd., 2019).

Yapılan araştırmalardan, %90 UK ve %10 YFC'ye çelik liflerin eklenmesinin mekanik özellikleri arttırdığı ve yapılar için yerinde döküm uygulamalarında kullanılabileceği öne sürülmüştür. YFC'nin eklenmesi, %100 UK ile hazırlanan GB'nin aksine, PCB'ye benzer şekilde ertesi gün betonun sertleşmesine neden olduğu ve kısa sürede daha yüksek basınç dayanımı kazandığı belirtilmiştir (Prabu vd., 2017).

UK ve YFC'nin lif takviyeli GB'nin lif performansını arttırdığı ve kontrol betonu ile karşılaştırıldığında su için düşük bir talebe sahip olduğu incelenmiştir. YFC'nin GB'ye dahil edilmesiyle birlikte GB'nin, hem ortam kürleme hem de ısıl kürleme koşullarında daha iyi sonuçlar gösterdiği raporlanmıştır (Kumar vd., 2017).

2.3.4.3. Silis dumanı

Kaolin, esas olarak kaolinit ve kuvarstan oluşurken, SD tamamen amorf bir silistir. Mikro-silika olarak bilinen silis dumanı, silisyum ve ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde elektrikli fırınlarda kömürle yüksek saflıkta kuvarzın azaltılmasının bir yan ürünüdür. İnceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle, SD tercih edilen bağlayıcı bir malzemedir. SD, betonda basınç dayanımı, yapışma mukavemeti ve aşınma direnci gibi özelliklerini geliştirmek için kullanılmakta; geçirgenliği azaltmakta ve bu nedenle takviye çeliğinin korozyona karşı direncini arttırmaktadır. Literatürde, SD'nin %7'ye kadar eklenmesi, iyi rafine edilmiş, kompakt bir matris oluşturmak için geopolimerizasyon sürecini önemli ölçüde arttırırken, SD içeriğinin daha da artması, reaksiyon ürününün mekanik özelliklerinin azalmasına neden olmaktadır (Khater, 2013). SD kullanıldığında, GB'nin yüksek asit direncine ulaşıldığı belirlenmiştir (Xu ve Van Deventer, 2000). Betona mineral katkı olarak ilave edilen SD'nin basınç ve eğilme dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Tüm bunların yanı

sıra SD kullanılacaksa eğer karışıma süperakışkanlaştırıcının ilave edilmesinin işlenebilirliği arttıracığı söylenmiştir (Şimşek vd., 2004).

2.3.5. Donatı

Betonun eksenel yük altında deformasyonunu en aza indirmek için betonun çekme bölgelerinde donatı kullanılabilir.

Beton ve donatı arasındaki arayüz boyunca kuvvetlerin aktarılması, yapısal tasarımda çok önemlidir (ACI 408, 2003). Beton ile donatının gösterdiği bağ mukavemeti; betonun dayanımına, donatıyı çevreleyen betonun kalınlığına, enine donatı nedeniyle betonun sıkıştırılmasına ve çubuk geometrisine bağlıdır (B. Singh vd., 2015b).

Sofi ve ark., yaptıkları çalışmada çelik çubukların bağ mukavemeti değerlerinin hem kiriş ucu hem de doğrudan çekme numunesi testlerinde karşılaştırılabilir olduğunu bildirmiştir. Normalleştirilmiş bağ mukavemeti, donatı boyutundaki azalma ile artış göstermiştir (Sofi, Van Deventer, vd., 2007).

Sumajouw ve ark., çekme dayanımını desteklemek amacıyla donatı kullanımındaki artışla kirişlerin eğilme kapasitesinin arttığını, ancak beton basınç dayanımının sabit olduğunu bildirmiştir (Sumajouw vd., 2007).

2.3.6. Lifler

Betonun çekme dayanımı basınç dayanımının yaklaşık %10'u kadardır (Ersoy, 1985). Bu sebeple beton içerisinde sünekliği arttırarak bu ani kırılmayı önleyecek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerden beton içerisine takviye edilebilecek olanlardan bazıları farklı özelliklerde bulunan liflerdir (Baradan, Bülent Serdar, Aydın Yazıcı, 2012). Tam bu noktada, GB matrisine farklı lif türlerinin dahil edilmesi, istenilen mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin elde edilmesinde çok yararlı olduğunu kanıtlamıştır (Mishra ve Panigrahi, 2020). Şekil 2.5'te beton içerisine katılabilen lifler sıralanmıştır. Liflerin varlığı, matrisin yoğunluğunun artmasını sağlayarak GB'nin özgül yoğunluğunun ve su emiliminin azalmasına neden olmaktadır. Bu etkilerin lif içeriğine bağlı olarak değişim gösterdiği belirtilmiştir (Moradikhou vd., 2020).



Şekil 2.5. Beton içerisine katılan lifler (sırasıyla çelik, polipropilen, cam, bazalt, poliamid, polivinil alkol, seramik, polietilen, naylon, kevlar lifi.)

Liflerin mekanik mukavemeti ve modülü, lif çapı arttıkça azalmaktadır. Lif içeriği kritik bir konsantrasyonda arttığında, lifler düzensiz dağılma ve kümeler veya toplar oluşturma eğilimindedir. Hatta çok akıcı matrisler, sıkışık lif ağından düzgün bir şekilde geçemeye bilmektedir. Bu nedenle, taze matrise, sert statik modunu kaybettirmek ve kalıbı oluşturmak için daha fazla titreşim gerekmektedir. Lif özellikleri zaman içinde kompozitlerin mukavemet gelişimini etkilemektedir. Mesela lif tipi ve geometrisi ne olursa olsun, lif içeriğinin arttırılması, lif takviyeli geopolimer kompozitlerin akışkanlığını azaltmaktadır (Ranjbar vd., 2016). Bu, geleneksel çökme değerindeki azalma (ASTM C143) ve yayılma testi (ASTM C230), VeBe zaman testindeki artış ve V-hunisinden geçme süresi (EFNARC-2002) veya reometre kullanılarak ölçülen akma geriliminde ve viskozitede artış şeklinde ölçülebilmektedir. Azaltılmış işlenebilirlik, matris içindeki sert lifler arasındaki temas ağı nedeniyle taze kompozitin akma stresindeki artışın bir sonucu olarak açıklanabilir. Bu da lif içeriğinin, eşdeğer çapın ve en boy oranının artmasıyla artmaktadır. Liflerin, işlenebilirliği azaltması her ne kadar istenmeyen bir durum olsa da lif içeriğinin arttırılması, birkaç büyük makro çatlak yerine birçok mikro çatlak oluşmasına neden olmaktadır (Ranjbar ve Zhang, 2020). Bütün lifli betonlarda sağlanması gereken en önemli koşullardan biri, lif dağılımının homojen olması ki bu beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve ilerlemesini yavaşlatarak betonun dayanıklılığını arttırmaktadır. Bir diğer koşul ise bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır (Çivici, 2006; Kocabeyoğlu, 2016; Nataraja vd., 2000).

Önerilen bir dozajda kullanıldığında lifler, çekme gerilmelerinin direncini arttırabilmektedir (Junaid vd., 2020).

2.1.6.1. Bazalt lifler

Betona lif katılmasının en temel nedeni, lifin enerji sönümleme yani tokluk özelliği göstermesidir. Lif takviyeli beton bu özelliği sayesinde darbeye, çatlağa, kopmaya karşı direnç göstermektedir (Çivici, 2006; Kocabeyoğlu, 2016; Nataraja vd., 2000).

Bazalt lifler (BL) volkanik kayalardan elde edilen bazaltın, yüksek sıcaklıklarda eritilerek lif biçiminde elde edilmesiyle oluşmaktadır. Üretilirken karbon life kıyasla daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır (Militký vd., 2002; Sim vd., 2005; Thorhallsson ve Erlendsson, Jón Ólafur Erlendsson, 2013). Bu nedenle BL'nin, mukavemeti, durabilitesi ve sıcaklığa karşı direnci yüksektir. Lif eldesi sırasında başka tür ilave katkı maddeleri kullanılmamaktadır (Hong ve Shin, 2003). Bu sebeple BL üretimi düşük maliyetli olabilmektedir (Kızılkant, AB; Kabay, N; Akyüncü, V; Erdoğan, 2014).

BL tipik bir seramik liftir. Çimento harcı ve beton ile karıştırıldığında karışımın içinde dağılması kolaydır. BL ile takviye edilmiş beton taze ve sertleşmiş halde iyi özellikler sergilemiştir (Di Ludovico vd., 2010).

BL betonun darbe ve yarıma mukavemetinin arttırmaktadır. Harç içinde oluşan mikro çatlakların yayılımını yavaşlatarak yüklü miktarda enerji soğurulmasına neden olmaktadır (Di Ludovico vd., 2010). Böylece BL, aşırı sıcaklık altında kimyasal yapısı bozulmayan ve aşınmaya dirençli malzemelerin üretiminde bir alternatif olabilmektedir (Kabay, 2014). Bu nedenle BL kompozitlerin potansiyel uygulamalarından bazıları şunlardır: plastik polimer takviyesi, toprak güçlendirme, köprüler ve otoyollar, endüstriyel zeminler, konut ve endüstriyel binalar için ısı ve ses yalıtımı, kurşungeçirmez yelekler ve yapıların yenilenmesi ve rehabilitasyonu (Ramakrishnan ve Panchalan, 2005).

BL'nin bazı mekanik özellikleri Tablo 2.2'de belirtilmiştir.

Tablo 2.2. Bazalt lifin mekanik özellikleri (Di Ludovico vd., 2010; Ramakrishnan ve Tolmare, 1998; Wikipedia)

Yoğunluk	2.7-2.8 g/cm³
Çap	7-15 µ
Moh's Sertliği	5-9
Elastisite Modülü	80-90 GPa
Spesifik Modül	32.1-32.8
Çekme Dayanımı	3.0-4.8 GPa

Kamenny çalışmasında, BL'lerin cam liflere göre daha yüksek gerilme mukavemeti gibi tercih edilen mekanik özelliklere ve daha düşük bir üretim maliyetine sahip olduğunu söylemektedir. Ayrıca BL'lerin geri dönüşümünün cam liflerinden çok daha verimli olduğunu ve bu nedenle BL'lerin çevre dostu olabileceğini belirtmiştir (Kamenny, 2009).

2.3.7. Süperakışkanlaştırıcı

Beton karışımında kullanılan su miktarını %5 ila %11 azaltan katkı maddeleri için akışkanlaştırıcılar adı verilmiştir. TS EN 934-2 standardına göre bir akışkanlaştırıcı katkının, süperakışkanlaştırıcı (SA) sınıfına girebilmesi için kurallar mevcuttur. SA minimum %12 oranında su azaltmalı ve aynı su/çimento (S/Ç) oranında hazırlanan betonlarda ise akışkanlığı 30 ila 120 mm'ye kadar arttırmalıdır (Sağlam vd., 2017; TSE, 2002b; Tuyan, 2019). Betonda SA kullanımı 1960'larda başlamıştır (Johnston vd., 1979). Polikarboksilik ürünlere dayanan SA'lar diğer katkılara kıyasla daha yenidir (1980'ler). Bu malzemeler daha yüksek reaktiviteye sahip olup sülfonik grubu içermemektedirler ve alkali ortamda tamamen iyonize olmaktadır. Yüksek dozda kullanıldığında, betonun kürlenmesini geciktirmenin yan etkisine sahip olmayan yüksek reaktiviteli SA'lar, büyük miktarda UK veya YFC içeren beton üretimini mümkün kılmıştır (Langley vd., 1989; Papayianni vd., 2005).

Kimyasal katkılar, beton kıvamını etkilemeden, su miktarını değiştirmeden veya azaltarak veya her iki etkiyi beraber göstererek betonun çökmesini sağlamaktadır (Düşük su/çimento veya yüksek çökme)(Çitoğlu vd., 2017). Böylece betonun işlenebilirliğini artmakta, beton dökümü daha kolay ve hızlı olmaktadır. Aynı zamanda SA'lar takviye ile beton arasındaki bağı arttırmaktadır ve toplam maliyeti düşürmektedir (Alsadey, 2012; Group, 2005). Fakat SA'lar pahalı katkı maddeleridir (Cecel vd., 2019).

Günümüzde süperakışkanlaştırıcılar hiperakışkanlaştırıcı olarak da bilinmektedir (Eren, 2021). ASTM C-125-97a standartlarına göre bir katkı maddesi, beton veya harç bileşeni olarak kullanılan su, agrega ve bağlayıcı materyalden farklıdır. Karıştırma işleminden hemen önce veya sırasında karışıma eklenmektedirler (Ramachandran, 1984). SA'lar kuru malzemelerin ıslanması sağlamaktadır. Böylece betonun mukavemetini arttırmaktadırlar (Eren, 2021). Zaten betonda SA kullanılma amacı çok yüksek işlenebilirliğe sahip beton veya çok yüksek mukavemetli beton üretmektir (Neville, 2013). Ancak katkılar; yanlış karışım oranının kullanılması, beton karıştırmada kötü işçilik ve

düşük kaliteli hammadde seçimi sebebiyle betonun kalitesiz üretilmesine çare olmamaktadır (Fukuda vd., 1990; Tanaka M vd., 1996).

Genel kullanım için SA dozu 1-3 l/m³ arasındadır. Bununla birlikte, dozaj 5-20 l/m³'e kadar arttırılabilmektedir. Süperakışkanlaştırıcıların konsantrasyonu farklı olduğundan, performans kıyası toplam kütleyle göre değil, katı madde miktarına göre yapılmaktadır. Belirli bir süperakışkanlaştırıcı dozajının etkinliği, S/Ç oranına bağlı olup S/Ç azaldığında etkinlik artmaktadır (Alsadey, 2012).

Yamakawa'ya göre, SA'nın kullanılması hem taze hem de sertleşmiş halde betonun özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaratmaktadır. Taze halde, süperakışkanlaştırıcının kullanılması betonun S/Ç oranındaki su içeriğindeki azalmaya bağlı olarak viskoziteyi arttırmaktadır. Bununla birlikte S/Ç oranı korunursa, karışımı akışkanlaştırmak için daha fazla su bulunmaktadır. Bu nedenle SA'nın beton priz süresini uzatma eğilimi vardır. Sertleşmiş beton durumunda, SA kullanımının, daha yoğun beton üretmek için sıkıştırmanın etkinliğini artırarak basınç dayanımını artıracağını vurgulamıştır. Betonun daha uzun süre sıvı halde tutarak kurutma büzülme riski azalacaktır (Alsadey, 2012; Yamakawa vd., 1990).

2.4. Uygulanan Deneyler

Beton taze ve sertleşmiş haldeyken kullanım şartlarına göre betonlara bazı testler uygulanmaktadır. Bu deneyler betonun amacına göre kullanılabilecek düzeyde olup olmadığının incelenmesi açısından oldukça önemlidir.

2.4.1. İşlenebilirlik testi

PÇB'nin taze hali için uygulanan testlerin GB'ler için de geçerli olduğu bildirilmiştir (Ma vd., 2018b).

Taze beton, karışımın henüz hazırlanıp kalıba konulduğu sırada (şekil aldığı, sıkıştırıldığı ve vibrasyon uygulandığı) betonun priz almadığı süreçteki halidir. Beton henüz bu haldeyken uygulanacak testler sonucunda istenilen özelliklerde beton üretmek mümkündür. Aksi olsaydı hem zaman hem maliyet açısından kayıp yaşanabilirdi.

Beton sertleşmemiş halde iken betonun;

- ❖ İşlenebilme ve Kıvam
- ❖ Segregasyon (Ayrışma)

- ❖ Terleme
- ❖ Birim Ağırlık

özellikleri deneyler yardımı ile gözlemlenebilmektedir (T. Y. Erdoğan, 2016).

Bahsi geçen işlenebilirlik terimi, daha spesifik özellikleri; akışkanlık, hareketlilik ve sıkıştırılabilirliği içeren taze betonun doğasının genel bir açıklaması olarak kullanılmaktadır (Domone, 1998). Taze betonun kıvamının ve işlenebilirliğinin araştırılabilmesi için birçok ampirik deney yöntemi geliştirilmiştir. Bu deneyler kıvam veya akıcılık gibi bazı beton özelliklerinin sonuçlarını gözlemleyebilmektedir fakat işlenebilmeyi tam olarak ölçememektedir.

İşlenebilirlik deneyleri:

- ❖ Slump (Çökme) Deneyi
- ❖ Akıcılık Deneyi (Sarsma Tablası Deneyi)
- ❖ VeBe Deneyi
- ❖ Sıkıştırma Faktörü Deneyi
- ❖ Sıkıştırılabilme Derecesi Deneyi (T. Y. Erdoğan, 2016).

2.4.1.1. Slump (çökme) deneyi:

Çökme deneyi standartlarının bazıları şunlardır: TS EN 12350-2, ISO 4109, ASTM C 143 ve BS 1881(Türk Standartları Enstitüsü., 2010).

Taze beton huninin yukarı kaldırılmasıyla beton çökmektedir. Bu çökme miktarı, betonun akışkanlık derecesine bağlı olarak değişmektedir. Beton, maksimum kayma direncine ulaştıktan sonra çökmeye başlamaktadır. Beton çöktükçe gerilme azalmakta ve çökme durumu sona ermektedir. Bu sebeple, slump deneyi taze betonun kayma direncine bağlı olarak değişmektedir (Ferraris, 1999). Aynı zamanda farklı malzeme oranlarıyla hazırlanmış iki kıyas numunesinin aynı çökme değeri göstermesi aynı işlenebilirliğe sahip oldukları anlamına gelmemektedir (T. Y. Erdoğan, 2016).

2.4.1.2. Sarsma tablası (akıcılık) deneyi:

Sarsma tablası standardı: ISO 9812 (“ISO 9812,Fresh Concrete, Determination of the Consistency (Flow Test)”, 1979).

Bu deney akıcı ve çok akıcı beton karışımlarının işlenebilme özelliklerinin analizinde kullanılmaktadır. Deneyde düşürülen tabla, betona uygulanan kayma gerilmesini artırdığı için, deney viskozite ile ilişkilidir. Yayılma deneyi, fazla yayılım gösteren akışkan betonlara uygulanmasından dolayı kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Fakat bu deney daha çok laboratuvar ortamında uygulanmaktadır (Neville, 2013; “Taze Betonda İşlenebilmenin Ölçülmesi ve Deneyde Kullanılan Aletler | İnşaatım.com”, 2022).

Bu yöntemlerden herhangi biri ile GB’nin akışkanlığı test edilebilmektedir. GB’nin işlenebilirliği, aktivatör molaritesine, süperakışkanlaştırıcıya ve su içeriğine büyük ölçüde bağlıdır (Djwantoro Hardjito vd., 2004; Laskar ve Bhattacharjee, 2011; Ma vd., 2018b; Montes ve Allouche, 2013). Beton çökme testi sayesinde akma gerilmesi ve plastik viskozite gibi reolojik parametreler, işlenebilirlik kaybını ve akış davranışını değerlendirebilmektedir (Djwantoro Hardjito vd., 2004).

Sravanthi ve arkadaşlarının çalışmasında, 5 farklı NaOH molaritesinde hazırlanmış GB ve 2 farklı basınç dayanımında hazırlanmış olan PÇB harçların akışkanlığı karşılaştırılmıştır. Sonuçta molarite fark etmeksizin GB’lerin, PÇB’lerden daha az işlenebilir olduğu bulunmuştur (Sravanthi vd., 2020b).

2.4.2. Basınç dayanım testi

Beton kalitesi hakkında bilgi verdiği için genellikle tüm kompozit malzemelerin en önemli mekanik özelliği basınç dayanımı olarak kabul edilmektedir (Ravitha ve Kiran Kumar, 2019). Betona malzemenin eksen yönünde yük etki etmesi sonucunda kırılma ve fiziksel değişimler gözlenmektedir. Bu yüksek gerilmeye karşı betonun gösterdiği direnç beton basınç dayanımı denmektedir. Betonun tanımlanması ve sınıflandırılması beton basınç dayanımına göre yapılmaktadır.

Basınç dayanımı, bir malzemenin mekanik özelliklerinin en yüksek değeri olduğu için, beton malzemenin tüm özellikleri ile korelasyon içindedir. Beton üretiminde kullanılan malzemelerin kalitesi ne kadar yüksek olursa, beton o kadar mukavemetli olmaktadır. Bu nedenle beton malzemelerde en önemli mekanik özellik basınç dayanımıdır (Eren, 2021).

Basınç dayanımı testi küp veya silindir numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Bu basınç dayanımı testlerinin değerleri ASTM C39 ve TS EN206/1'e göre hesaplanmıştır (Test vd., 2014).

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

f_c , numunenin basınç dayanımı değerleri (maksimum basınç gerilmesi) (MPa), P , numunenin kırılmasına sebep maksimum yüküdür (N) ve A , numunenin kesit alanıdır (mm^2).

Literatürde, çeşitli karışım oranı parametrelerinin ve kürlenme koşullarının GB'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır.

Deb ve arkadaşları, çalışmalarında mineral katkı oranlarının, içeriğinin ve alkali çözelti tipinin, GB'nin taze ve sertleşmiş özelliklerini etkilediğini bildirmiştir (Deb vd., 2014). Literatürde YFC ve UK bazlı GB ile mukavemet artışı bildirilmiştir (Ahmed vd., 2022; Lee ve Lee, 2013; Saha ve Rajasekaran, 2017). Keerthy ve Kumar çalışmalarında, farklı oranlarda YFC ve UK kullanarak en iyi basınç dayanımını yakalamaya çalışmışlardır. YFC oranının düşürülerek yerine UK eklenmesinin basınç dayanımında bir azalmaya yol açtığını ve NaOH konsantrasyonunun artmasıyla basınç dayanımının arttığı sonucuna varmışlardır (Keerthy ve Kumar, 2017). Ayrıca literatürde, GB hazırlamak için çeşitli alkali aktivatör oranları kullanılmıştır. Topark-Ngarm ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının artmasıyla basınç dayanımının arttığı bildirilmiştir (Topark-Ngarm vd., 2015). Bunların yanı sıra GB'nin mekanik özellikleri arasında korelasyonlar kurmak için literatürde çeşitli girişimler yapılmıştır (Bondar vd., 2011; Diaz-Loya vd., 2011; Pan vd., 2011; Ryu vd., 2013a; A. Singh, 2012; B. Singh vd., 2015b; Sofi, van Deventer, vd., 2007; Vijai vd., 2012; Yost vd., 2013). Basınç dayanımı açısından incelendiğinde, GB ve PÇB arasında doğrusal bir ilişki olduğu savunulmuştur. Ve GB'nin basınç dayanımı, su-geopolimer katı madde oranı arttıkça, PÇB'nin basınç dayanımı ise su-çimento oranı arttıkça azalmıştır. İki beton türü için, sıvı-katı madde oranı ve dayanım arasındaki ilişki benzer şekilde etkilenmiştir (Djwantoro Hardjito vd., 2004).

2.4.3. Eğilme dayanımı testi

Bir başka dayanım parametresi ise eğilme dayanımıdır. Beton üzerine etkiyen kuvvetler çekme gerilmesi oluşturarak şekil değiştirmelere ve kırılmalara yol açabilmektedir. Beton buna karşı eğilme direnci göstermektedir (T. Y. Erdoğan, 2016). Eğilme dayanımı testi, kayma veya eğilme dayanımı modülü olarak da bilinmektedir (M. ve Kaya S., 2015).

Herhangi bir malzemenin dış yüzeyinin gerilme mukavemetini belirlemek için, malzemenin mukavemeti ile ilgili tasarım verileri, eğilme mukavemeti özelliklerini tanımlamalıdır (Kayalı vd., 2017).

Betonda büyük çatlakların oluşması sonucunda kırılma meydana gelmektedir. Çatlak ve kırıkların, en büyük nedeni betonda meydana gelen çekme kuvvetleridir. Betonun çatlaması sonucunda malzemenin içine istenmeyen, zararlı asidik maddeler girebilmektedir. Dolayısıyla bu durum birçok yapı için betonun eğilme mukavemetini ve mekanik özelliklerini belirleme zorunluluğunu ortaya koymaktadır. Betonun bu özelliğini belirlemek için silindirik veya prizmatik numunelere, üç veya dört noktadan yükler uygulanmaktadır (Kayalı vd., 2017).

Betonun çekme dayanımı üç farklı testle bulunabilir:

- ❖ Doğrudan Çekme Dayanımı Deneyi
- ❖ Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi
- ❖ Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi.

2.4.3.1. Eğilmede çekme dayanımı

Standartları: TS EN 12390-5, ASTM C293M ve ASTM C923'tür.

Bu deneyin diğer iki deneyden farkı beton kirişlerin eğilme yükü altında kırılmaya tabi tutulmasıdır (T. Y. Erdoğan, 2016).

Kiriş numunenin orta noktadan ve kiriş boyunun 1/3 noktasından yüklenmesi ile farklı sonuçlar elde edilmektedir.

Ortadan yüklenen beton kiriş kesitleri için eğilme dayanımı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$R = \frac{3.P.L}{b.d^2} \quad (2.2)$$

R: Kopma modülü (MPa), P: Kirişe gelen maksimum yük (N), L: Açıklık uzunluğu (mm), b: Kiriş kesitinin ortalama genişliği (mm) , d: Kiriş kesitinin ortalama derinliğidir (mm) (ASTM C923/C293M., 2002).

Mineral katkı ve aktivatör oranı, akışkanlaştırıcı ve lif ilavesi gibi etkenler bu parametreyle doğrudan bağlantılıdır. Premkumar ve arkadaşlarının çalışmasında, SD ve YFC bazlı GB için farklı karışım oranları denenmiştir. Sonuçta SD içeriğinin artmasıyla beraber eğilmede çekme dayanımının artış gösterdiği savunulmuştur (Premkumar vd.,

2022). Rao ve Kumar, SD, UK ve YFC bazlı GB üzerinde eğilmede çekme deneyi yapmışlardır. SD katkılı GB'nin 28. günde diğer mineral katkılı betonlara kıyasla en yüksek eğilme dayanımını verdiğini tespit etmişlerdir (Krishna Rao ve Rupesh Kumar, 2020). Özbayrak ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, alkali aktivatör oranı azaldıkça eğilmede çekme dayanımının artış gösterdiği bulunmuştur (Özbayrak vd., 2023). Ghafoor ve arkadaşları, 14 M NaOH için aktivatör oranının 2'den 2.5'a çıkmasıyla eğilmede çekme dayanımının düştüğünü bildirmişlerdir (Ghafoor vd., 2021). Bunu destekleyecek bir başka çalışmada Juniad ve arkadaşları, numunelerin 28. günde eğilmede çekme dayanımlarını incelerken alkali aktivatör oranının 2'den 2,5'a çıkmasıyla dayanımda düşüş yaşandığını belirtmişlerdir (Junaid vd., 2021). Şenol ve Demiral çalışmalarında, YFC bazlı GB'nin farklı akışkanlaştırıcı oranlarıyla beton numuneler hazırlamışlardır. Farklı akışkanlaştırıcı oranındaki betonlar eğilmede çekme deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçta karışıma her oran için eklenen akışkanlaştırıcının dayanımı düşürdüğü gözlemlenmiştir (Şenol ve Demiral, 2023). Literatürde bazalt ve cam lifinin farklı yükleme koşulları altında GB'lerin eğilmede çekme dayanımını arttırdığı ileri sürülmüştür (Ahmad vd., 2021; S. Ali vd., 2021; Alomayri, 2021; Chithambar ve Muthukannan, 2019; Guler ve Akbulut, 2022; Midhun vd., 2018; Nematollahi vd., 2014; Saloni vd., 2020; Y. Wang vd., 2021).

2.4.4. Su emme testi

Betonun dayanıklılığı açısından bakılması gereken bir diğer önemli özellik ise su emmedir. Su emme testi, su tutma özelliklerini ve su geçirgenliğini değerlendirmek için yapılmaktadır. Kullanılan standart TS EN 12350-6'dır.

Sertleşmiş betonun su emme özelliğinin bilinmesi betonun durabilitesi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bu özellik betonun kullanım süresi boyunca kimyasal ve fiziksel etkiler altındaki dayanıklılığı ile ilgilidir.

Su emme oranı aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$m_1 = (B_s - A_s) / A_s \times 100 \% \quad (2.3)$$

m₁: Ağırlıkça su emme oranı (%) A_s: Numunenin etüv kurusu ağırlığı (g) B_s: Doygun yüzey kuru numune ağırlığı (g).

GB'ler, PÇB bileşenlerinden daha ince olduğundan GB daha az su emilimine ve daha az gözenekliliğe sahiptir (Niveditha ve Srikanth, 2020). Daha az su emilimine sahip numune, daha fazla basınç dayanımı sağlamaktadır. Alkali aktivatör içeriğinin artırılması, ortam

kürlenmesine bırakılan numunedeki su emilimini arttırmaktadır. Yüksek oranda alkali/bağlayıcı, su emiliminin artmasına neden olmaktadır (Huseien vd., 2016; Thokchom vd., 2009). Luhar ve Khandelwal yaptıkları çalışmada, UKGB'nin kontrol betonuna göre daha az gözenekli yapıya sahip olduğunu böylece PÇB'ye kıyasla su emmesinin daha az olduğunu savunmuşlardır (Luhar ve Khandelwal, 2015). Sravanthi ve arkadaşları YFC bazlı GB üzerinde yaptıkları çalışmada, NaOH molaritesinin betonda gözenek oluşumunda etkisi olduğunu dolayısıyla molaritenin su emmeyi etkilediğini tespit etmişlerdir (Sravanthi vd., 2020b).

2.4.5. Donma-çözünme testi

Standartları: ASTM C310 ve ASTM C666/ C666M'dir.

Betonun içerisinde boşluklar bulunmaktadır. Kapiler boşluklar bağlayıcı harcın içindeki malzeme tanelerinin arasında bulunan suyun oluşturduğu mini boşluklar şeklinde tanımlanmaktadır. İçerideki su ıslak ortamda genişleyebilmektedir. Böylece soğuk havada donma etkisi gösterebilmektedir. Bu boşluklarda su -15/-20°C donmaktadır (ASTM C666/C666M, 2003). Bunun sonucunda betonda çatlaklar görülebilmektedir. O halde donma-çözünme fiziksel bir olaydır denilebilmektedir (T. Y. Erdoğan, 2016).

Betonun donma-çözünme dayanıklılığı gözenek yapısı ile yakın ilişkiye sahiptir. Suya doyan ve donma-çözünmeye bırakılan tüm numuneler kısa süre içinde hasar almaktadırlar. Sonuçta boşluk arttıkça dayanım düşmektedir. Bu nedenle, donma nedeniyle betonda meydana gelen hasarların belirlenmesinde, beton gözeneklerinde buz oluşum sürecinin incelenmesi kritik öneme sahiptir (Cai ve Liu, 1998).

2.4.6. Ultrases geçirgenlik deneyi

Standardı: ASTM C597-16 (ASTM C597, 2016a)

Ultrason, 1876'da Pierre ve Jacques Curie tarafından piezoelektriğin keşfedilmesinden sonra ve 1913'te Richardson tarafından sonar için uygulanmasıyla gelişmeye hızla devam etmiştir (Curie ve Curie, 1880; Richardson, 1912). Günümüzde ultrason, tahribatsız test yöntemi; plastik, kauçuk ve köpük ; ahşap ve kereste; beton, otoyol, köprüler ve hava şeritleri; gibi malzemeler için yaygın olarak kullanılmaktadır (AN-305-4, 2005; Application Note, 2001; Note, 2001; Vun vd., 2006).

Ultrasonik geçiş hızı test cihazı (UGHC); alıcı ve verici arasında oluşturulan ultrases dalgalarının beton içerisindeki geçiş süresini belirlemektedir. UGHC’nin test yapılacağı alanın düz olması gerekmektedir. UGH tahribatsız bir deneydir (T. Y. Erdoğan, 2016; “Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyiyle Beton Dayanım Tayini”, 2022).

Bu test yardımıyla, beton basınç dayanımı hakkında net bilgi elde edilemez. Fakat UGHC ile betonun içerisinde geçirilen ses üstü dalgaların hızı, yapı malzemelerinde deformasyona neden olan yangın derinliğinin ve betonun erken yaş dayanımının tahmininde, çatlak bilgisi ve çatlak onarımının değerlendirilmesinde kullanılabilmektedir (“Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyiyle Beton Dayanım Tayini”, 2022). Aynı zamanda ultrases geçirgenlik, betonun elastisite modülü, homojenliği ve yoğunluğu hakkında bilgiler verebilmektedir (Mardani-Aghabaglou vd., 2018; “Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyiyle Beton Dayanım Tayini”, 2022).

Yoğunluk ile geçirgenlik ters orantılı olarak ultrases geçiş süresini (UGS) etkilemektedir. Geçirgenliği fazla olan betonda UGS daha uzundur. Yoğunluğu fazla olan beton için bu durum tam tersidir. Araştırmacılar, beton içindeki boşlukların bilinmesinin beton kalitesinin incelenebilmesi açısından önemli olduğunu vurgulamıştır (T. Y. Erdoğan, 2016; Mardani-Aghabaglou vd., 2018; “Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyiyle Beton Dayanım Tayini”, 2022).

2.4.7. SEM ve EDS analizi

Malzemenin mikroyapısını incelemek üzere tahribatsız bir yöntem olarak; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizleri yapılmaktadır.

SEM ve EDS beton içyapısındaki gözeneklilik değerlendirmeleri yoluyla mikroyapısal analizler, sertleştirilmiş numunelerin mukavemet gelişim mekanizmasını açıklığa kavuşturmak ve alkali aktivatörlerin molarite seviyeleri, karışım oranları ve farklı beton yaşları arasındaki ilişkileri tanımlamak için kullanılabilen yöntemlerdir (Ryu vd., 2013a).

Betonun içyapısını bilmek önemlidir çünkü betonun mikroyapısında meydana gelen çatlaklar yayılarak mikroyapıda zayıf halkalar oluşturmaktadır. Mikroyapının bağ kuvveti böylece zayıflamakta ve küçük kılcal çatlaklar eksenel bir yük altında büyük kırılmalara sebebiyet verebilmektedir (Mehta ve Siddique, 2017).

SEM ve EDS numunesinin, maksimum uzunluğu 10 cm, kalınlığı yaklaşık 2,5 cm olmalıdır. Eğer numune yalıtkan ise elektronik şarjı önlemek için, numune altınla kaplanmalıdır (Ay, 2017; “SEM-EDS Analizi”, 2022).

2.4.8. Ağırlık düşürme ile darbe dayanımı testi

Darbe kuvvetleri, yapısal maddelerin dayanıklılığı, hasar toleransı ve enerji emme kapasitesi gibi özelliklerini belirleyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle, darbe kuvvetleri kritik öneme sahip olan birçok uygulamada dikkate alınması gereken bir faktördür. Burada gözlem altına alınması gereken en önemli faktörlerden biri hızdır. Hız ile oluşan kuvvet ve buna bağlı deformasyon doğru orantılıdır (Davies ve Olsson, 2004).

Darbe kuvvetleri, deneylerde ölçülebilmektedir. Sonuçlar, yapısal tasarımları optimize etmek, enerji emici malzemeler geliştirmek ve darbe hasarını azaltmak için kullanılabilir. Aynı zamanda, darbe kuvvetlerinin etkisini azaltmak için malzemelerin şekli, boyutu ve yapısal özellikleri değiştirilebilmektedir (Rattan, 2008).

Darbe gibi ani yüklemeler, malzemenin plastik deformasyonuna neden olabilmektedir. Böylece yapılarda çatlak kırılmalar gözlenebilmektedir. Bu nedenle, ani yüklemelerden kaynaklı yüksek gerilmeleri karşılayabilecek malzemelerin kullanılması, yapıların dinamik yüklenmeler karşısında daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır (Orhan, 2021).

Betonun darbe direncini gözlemek için çarpma deneyleri kullanılmaktadır. Elde edilen verilerden, betonun dinamik yük altında kırılğan bir davranış gösterdiği pek çok araştırma sonucunda gözlemlenmiştir. Bu davranışı gözlemek için şekil 2.6’da gösterildiği gibi birçok farklı teknik kullanılmıştır (Erdinç Arıcı, Resul Dursun, 2007).



Şekil 2.6. Sırasıyla ağırlık düşürme, serbest düşen top, charpy, izod,, mermin darbe testi (1. Güç ünitesi, 2. Kılavuz namlu ve 3. Hedef çerçeve ve test bölümü) ve bölünmüş hopkinson basınç çubuğu testi (Kim vd., 2011; Yoo ve Banthia, 2019)

Kullanılan birçok teknik Kim ve arkadaşları (Kim vd., 2011) tarafından yüksek gerilme oranı test metodlarına göre 4 sınıfa ayrılmıştır:

1. Potansiyel enerjiye bağlı metodlar: Numune üzerine serbest düşen büyük kütleler (Ağırlık düşürme, Charpy ve Izod testleri),
2. Kinetik enerjiye bağlı metodlar: Bir kütlenin numuneye çok hızlı bir şekilde çarptığı testler (Mermi darbe testi ve fiber çekme testleri),
3. Hidrolik makinelerin numuneleri orta yükleme hızında deforme etme yöntemleri,
4. Bir gerilme dalgasının uzun bir çelik çubuktan üretildiği, yayıldığı ve numuneleri etkilediği gerilme dalgası yayılımına dayanan yöntemler (Bölünmüş Hopkinson Basınç Çubuğu (BHBC) testi).

Yükleme koşulu (sıkıştırma, gerginlik, bükülme veya mermin) ve numune türü (örneğin, silindir, küp, kiriş veya levha) göz önüne alındığında, amaca uygun bir şekilde farklı darbe testi yöntemleri kullanılabilir (Yoo ve Banthia, 2019).

Darbe yüklerinden kaynaklanan hasarlar, darbe hızı, darbe aletinin geometrik özellikleri, hem aletin hem de yapının malzeme özellikleri ve hedefin geometrik özellikleri (kalınlık) gibi birçok faktöre bağlı olarak değişim göstermektedir (M. H. Zhang vd., 2005). Birçok araştırmacı, darbe yükleri altında PÇB tabanlı materyalin davranışını ve bu davranışın nasıl geliştirileceğini incelemiştir (Al-Tayeb vd., 2012; Soufeiani vd., 2016; Vossoughi vd., 2007; Yankelevsky, 1997; M. H. Zhang vd., 2005). Bununla birlikte, literatürdeki sınırlı araştırmalar alkali aktive edilmiş malzemelerin tepkisine ve darbe yüklerine karşı direncine odaklanmıştır. Önceki çalışmalar, GB'lerin darbe yükü altında zayıf performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu sebeple literatürde konuyla ilgili çalışma yapan araştırmacılar tarafından darbe mukavemetini arttırmak için liflerin dahil edilmesi önerilmiştir (W. Li ve Xu, 2009a; Yunsheng vd., 2006).

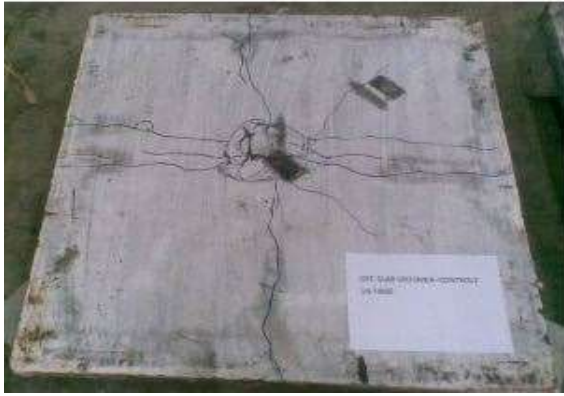
Tekrarlanan düşük hızlı darbe yükü altında güçlendirilmiş GB levhanın davranışı Madheswaran ve arkadaşları (2014) tarafından araştırılmıştır. Darbe yükü altında davranışlarını incelemek için 1000x1000x60 mm boyutlarında PÇB ve GB plaklar imal edilmiştir. Plaklar, çerçeveye mesnetlenmiştir. Darbe testi için 8.4 kg'lık bir çekiç kullanılmıştır. Dinamik bir yükleme bir gerinim ölçer aleti ve bir amplifikatör aracılığıyla kaydedilmiştir. TEAC kayıt cihazı, her düşüş için darbe yükü, deformasyon ve hızlanma sinyallerini kaydetmek için kullanılmıştır. Test sonuçlarından, GB plakların, darbe testi altındaki ilk çatlama ve hasar aşamalarında PÇB plaklarına kıyasla daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur (Şekil 2.7 ve 2.8). Düz levhalar delinmelerle ile başarısız olurken, lif takviyeli levhalar sadece yüzey (çatlama) hasarı göstermiştir (Şekil 2.9 ve 2.10). Düşük enerjili tekrarlanan darbe yükü altında beton sertliğinde devam eden hasar ortaya çıkmıştır (K vd., 2014). Sonuçlar ANSYS programı kullanılarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.7. PÇB'nin darbe altında çatlak hasarı (K vd., 2014)



Şekil 2.8. GB'nin darbe altında çatlak hasarı (K vd., 2014)



Şekil 2.9. Lifli PÇB'nin darbe altında çatlak hasarı (K vd., 2014)



Şekil 2.10. Lifli GB'nin darbe altında çatlak hasarı (K vd., 2014)

Nagan ve Mohan (2014) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda, GB plaklarının darbe yükü altında bir çelik bilyeyi önemli bir yükseklikten düşürerek direnci bulunmuştur. Bu çalışma için, farklı tavuk ağı ve dikdörtgen kaynak ağı kombinasyonlarıyla 230x230x25 mm boyutlarında örnekler kullanılmış ve düşme ağırlığı testi ile darbe yüküne maruz bırakılmıştır. Daha sonra, ilk ve son çatlak için gereken darbe enerjisi ölçülmüştür. Tavuk ağının ve dikdörtgen kaynak ağının kombinasyonunun, enerji emilimi ve artık darbe mukavemeti durumunda daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. 10 m boyutunda GB numunelerinin basınç dayanımı, eğilme mukavemeti ve bölünmüş çekme mukavemeti, PÇB numunelerine kıyasla sırasıyla %36.05, %33 ve %27.7 daha fazla bulunmuştur. Ayrıca,

takviye hacmindeki artışla birlikte, geopolimer ferroçimento numunesinin enerji emiliminin, PÇB'ye kıyasla arttığı rapor edilmiştir (Nagan ve Mohana, 2014).

Bu deneysel çalışmada, ferroçimento levhaların darbe yükü altındaki davranışları, kafes katmanlarının sayısı, polimer içeriği ve düşme yüksekliği gibi parametreleri değiştirerek incelenmiştir. Bu çalışma için 500x500x50 mm ebatlarında, düşme ağırlığı yaklaşık 1.3 kg, düşme yüksekliği 2.5 m, 1.2 m ve 0.83 m olan numuneler kullanılmıştır. İlk ve son çatlak için gerekli darbeler kaydedilmiştir. Numunelerin darbe dayanımı kapasitesi hesaplanmıştır. Ferroçimento numunesinin darbe enerjisi emme kapasitesinin, polimer içeriği yüzdesi ve tel örgü katmanlarının sayısı arttıkça arttığı sonucuna varılmıştır (Al-Hadithi vd., 2014).

Darbe sırasında malzeme tarafından emilen enerjinin, enerji dağılımı veya enerjinin deformasyon hızına bağlı olduğu bulunmuştur (Dong vd., 2019).

Abubakr ve arkadaşları, darbe dayanımını hesaplamak için düşen ağırlık deneyi yapmışlardır. Sonuçta, alkali aktive edilmiş cürufun (AAC) PÇB'ye kıyasla sırasıyla %70 ve %40 daha iyi basınç ve çekme mukavemeti sergilediğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda AAC'nin darbe yüklemesi sonucu meydana gelen deformasyonların ve enerji emilimlerinin kullanılan aktivatör ile değişebileceğini ve AAC karışımlarının; basınç, çekme ve darbe emilimi açısından çimento bazlı karışımlara kıyasla daha iyi mekanik özellikler gösterdiğini bildirmişlerdir. Genel olarak silika modülü ve sodyum oksit yüzdesinin artırılması ile basınç mukavemetinin ve darbe enerjisi emiliminin arttığı sonucuna varmışlardır (Abubakr vd., 2020).

Kızılırmak çalışmasında, 100x100x6 cm beton numunelere 200 cm yükseklikten artarda iki kere 4,278 kg ağırlık düşürmüştür. Darbe sonrası betonun 3 mm deplasman yaptığı gözlemlenmiştir (Kızılırmak vd., 2019).

Al-Rousan, 100x100x7 cm plaklar üzerine 1,2 ve 2,4 cm yükseklikten 7 kg ağırlık düşürerek betonun darbe dayanımını test etmiştir. İki farklı hız değeri için farklı deplasman değerleri elde etmiştir. Yüksekliğin artmasıyla ağırlığın hızı artmış ve deplasman değerinin de aynı şekilde artış gösterdiği kaydedilmiştir (Al-Rousan, 2019).

İncelenen literatür çalışmalarında ani yükleme altında GB'lerin PÇB'lere göre daha dayanıklı olduğu savunulmuştur. Bu çalışmalarda, GB fiziksel ve kimyasal olarak incelenmiştir. Fakat betonun darbe direncinin modern anlayışı sınırlıdır. Sorunun temeli, darbe yükü altında betonu test etmek için standart bir test tekniğinin olmamasıdır (Zhu vd., 2015). Bu sorun nedeniyle deneysel çalışmalar yerine numerik analiz tercih edilmektedir.

Bu sayede daha az maliyet ve iş gücü ile çalışmalar yürütülebilmektedir. Yine de sonuçların kıyaslanabilir ve daha güvenilir olması için iki test türünün de uygulanması tercih edilmiştir (Savaş vd., 2021).

2.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Betonun tepkisini değerlendirmek için sonlu elemanlar yöntemi (SEY), tüm yapısal elemanı bir dizi küçük parçaya bölen ve daha sonra yükleme koşullarını uygulayan sayısal bir analiz yöntemidir. Mühendislik ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler nedeniyle, SEY tekniğinin kullanımı her geçen gün artmaktadır. Bir dizi düğüm noktasında, bilinmeyen bir fonksiyonun her bir elemanının tepkisini bulmak için karakterize edilen sınırlı sayıda serbestlik derecesi vardır. Fakat gerçekte tüm problemler doğrusal değildir. Bu nedenle, doğrusal olmayan analiz için kesin bir çözüm elde etmek üzere SEY etkili bir araç olmaktadır. Malzemenin tam davranışını göz önünde bulundurarak yeniden dağıtım, kesme ve çekme mukavemeti yoluyla bileşenlerin yüksek yük taşıma kapasitesinin potansiyelini bulmak için doğrusal olmayan analiz yöntemi kullanılmaktadır. Malzemenin doğrusal olmayan gerilme-deformasyon ilişkisi, malzemenin doğrusallığını tartışmaktadır. Bu nedenle elastisite modülü ayırt edici bir değer değildir (Fahjan, 2018).

SEY, karmaşık mühendislik problemlerine matematiksel çözümle yaklaşarak problemi çözmeye yarayan bir analiz yöntemidir. Bu yöntemin birçok avantajı mevcuttur. Öncelikle yöntem sayısal bir temele dayandığı için bu yöntemi, mühendislik problemlerinde rahatça kullanabilmek için farklı yazılımlar geliştirilmiştir (ABAQUS, ANSYS vb.). Fakat analiz süresi ve çözümün doğruluğunun deneysel verilere bağlı olması gibi dezavantajları da mevcuttur (Moaveni, 2011).

SEY'in tercih edilmesinin en önemli iki sebebi vardır:

- ❖ Problemin karmaşık yapısını sonlu elemanlara ayırır.
- ❖ Sonlu eleman üzerinde yaklaşım fonksiyonları (cebirsal polinomlar) oluşturur.

SEY, varyasyonel metotların bölünmüş bir yöntemidir. Bu metodun amacı fiziksel yaklaşımın hata sınırları ve yakınsama gibi yetersiz kaldığı sorunlara çözüm üretmektir (Ersöz, 2005).

1941'de Hrenikoff, çubuk ve kirişler kümesini temsil eden düzlemsel elastik bir ortam geliştirmiştir (Hrennikoff, 1941). 1943'te Courant, fonksiyonlarla ilgili çalışmasında

minimum potansiyel enerji kanununu kullanmıştır (Courant, 1943). Her ne kadar bu yöntem önceki yıllarda kullanılmış olsa da ismini Argyris, Kelsey, Clough vd., tarafından almıştır (Argyris ve Kelsey, 1960; Ersöz, 2005; M. J. Turner vd., 1956).

2.5.1. Numerik analiz

Deforme olabilen gövdeler ve sütunlar gibi ince elemanlarda yükleme, gövdenin geometrisine bağlı olarak değişmektedir. Bu durumda, geometrik doğrusal olmayan bir problem ile karşılaşmaktadır. Pek çok araştırmacı, ANSYS kullanarak yapıların davranışlarını tahmin etmeye çalışmaktadır. Ağ yoğunluğu, betonun özellikleri, tolerans değerleri vb. bu, çözümün yakınsamasını ve doğruluğunu etkileyecek temel değerlerdir. SEY, kısmi diferansiyel denklem problemlerini bir dizi doğrusal cebirsel denklem haline getirmektedir (Sarath Chandra Kumar ve Ramesh, 2018).

Kumar ve Ramesh çalışmasında, 700x150x150 mm boyutlarında çelik çubuklarla güçlendirilmiş normal ve geopolimer betonlardan oluşan on iki numunenin sapmasını ve kaymasını tahmin etmek için SEY kullanmıştır. Bulgularına göre SEY, betonarme yapıların deneysel ve analitik araştırmalarından elde edilenlere benzer sapmaları etkili bir şekilde simüle etmiştir (Sarath vd., 2018).

Başka bir çalışmada, Uma ve arkadaşları tarafından geopolimer betonarme elemanların eğilme performansını tahmin etmek için SEY modellemesi geliştirilmiştir. Sonuçlar, gerçek kirişlerden elde edilen sapmaların, ANSYS modellemesinden elde edilenlere kıyasla yaklaşık %20 farklılık sağladığını göstermiştir. Bu durumun, geopolimer bağlayıcının yüksek sertliği ile ilişkili olabileceği savunulmuştur (Uma, 2012).

Madheswaran vd., çalışmalarında, 1000x1000x60 mm boyutlarında güçlendirilmiş GB plakları SEY kullanarak analiz etmişlerdir (K vd., 2014).

Kumar ve Ramesh'in çalışmasına göre, ANSYS yazılım tarafından geliştirilen sonlu elemanlar modellerinden elde edilen sonuçlar, takviyeli GB ve PÇB'nin deneysel ve analitik sonuçlarıyla karşılaştırıldığında benzer sapmalar gösterdiği savunulmuştur (Sarath Chandra Kumar ve Ramesh, 2018).

Aleem ve Arumairaj, 100x150x1000 mm boyutundaki beton kirişleri, 24 saat boyunca buhar kürleme altında hazırlanmış ve sertleştirmiştir. Daha sonra 28 güne kadar oda sıcaklığında kürlemeye bırakmıştır. Kirişleri iki nokta yük yöntemi için test etmiş ve

sapmaları ölçmüşlerdir. Deneysel sonuçlar ANSYS modelleme ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yakın değerler vermiştir (A. Aleem ve Arumairaj, 2016).

Sajith ve Pal yaptıkları çalışmada, 150x150x700 mm boyutundaki GB kirişi üzerine 13 cm çapında 5 kg ağırlığı farklı yüksekliklerden (3, 2.5, 2 m) düşürmüşlerdir. Darbe çekicinin beton üzerindeki etkisini incelemek için 6x6x32 cm boyutlarında darbe kutusu kullanmışlardır. Daha sonra ANSYS paket programında testi simüle etmişlerdir. Sonuçta darbe yüksekliği arttıkça kirişin mukavemetinin azaldığı tespit edilmiştir. Daha yüksek dayanıma sahip betonun deformasyona karşı daha fazla mukavemete sahip olduğu ve kutu darbecisi ile merkezi darbe konumunun, kirişin deformasyonunu arttırdığı bulunmuştur. Çalışmadan, sonlu elemanlar modellemesinin, beton kirişlerin darbe yükü altındaki davranışlarını tasarım aşamasında doğru bir şekilde belirlemede kullanılabileceği sonucuna varılmıştır (Sajith ve Pal, 2023).

AlAraza ve Mahmud çalışmalarında, Ansys Expilicite Dynamics kullanarak önizleme çalışmasından; pist döşemesinin döşeme kalınlığı, beton yoğunluğu, elastisite modülü, eğilme çekme dayanımı, basınç dayanımı, çarpma hızı ve ağırlığı ekleyerek beton özelliklerini test etmişlerdir (AlAraza ve Mahmud, 2022).

ANSYS programı kullanılarak betonun 3D modellemesi (katı 65 elemanı) ve takviyenin ayrık modellemesi (Link 8 elemanı) ile kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Yük saptırma özellikleri, arıza modları ve çatlak kalıpları deneysel ve analitik çalışmalardan elde edilmiştir. Çalışmanın sonuçları, ANSYS modellemenin, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiğini ortaya koymuştur (Madheswaran ve Philip, 2014).

3. MATERYAL ve METOD

3.1. DeneySEL Materyaller

UK, YFC ve SD bazlı GB numunelerinin yapımında kullanılan malzemeler; mineral katkıları, agregalar, alkali sıvılar, su ve süper plastikleştiricilerdir.

Bağlayıcı:

Oluşturulan GB için çimento yerine bağlayıcı olarak mineral katkıları; UK, YFC, SD kullanılmıştır. Isıl küre ihtiyaç duymaması sebebiyle kaynak malzeme tüm karışım oranları için YFC seçilmiştir.

Uçucu Kül:

Termik santrallerin yan ürünü olan UK, Cenal Elektrik Üretim AŞ.'den tedarik edilmiştir. Düşük kalsiyum içeriğine sahip ASTM-F sınıfı UK kullanılmıştır. Resim 3.1'de deneyde kullanılan UK gösterilmiştir.



Resim 3.1. Deneyde kullanılan UK

UK'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de belirtildiği gibidir.

Tablo 3.1. Deneyde kullanılan UK'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

SO₃	%0,20	Özgül Ağırlık (g/cm³)	2,38
SiO₂	%59,37		
Fe₂O₃	%8,62		
Al₂O₃	%21,40	Yoğunluk (kg/m³)	2300±200
CaO	%3,23		
MgO	%2,10	Kızdırma Kaybı	Kategori: A
Na₂O	%1,27		
K₂O	%1,80	İncelik	Kategori: N %20±10
Cl	%0,06		

Yüksek Fırın Cürufu:

Malzeme Çimsa Çimento Mersin'den tedarik edilmiştir. YFC, hem taze hem de sertleşmiş betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu katkı sağladığı için çimentoya veya beton karışımına ayrı olarak ilave edilerek kullanılabilir. Aşağıdaki şekilde gösterilen, teknik özellikleri ve kimyasal bileşenleri Tablo 3.2'de verilen YFC bu çalışma kapsamında kullanılmıştır. Resim 3.2'de deneyde kullanılan YFC gösterilmiştir.



Resim 3.2. Deneyde kullanılan YFC

Tablo 3.2. Deneyde kullanılan YFC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

SO ₃	%0,20	Blaine İnceliği (m²/kg)	442
MgO	%59,37		
S ²⁻	%8,62		
Cl	%21,40	Kızdırma Kaybı (%)	1,20
CaO	%3,23		
Si+Mg+Ca	%2,10		

Silis Dumanı:

Silis dumanı Antalya Eti Krom AŞ.'den tedarik edilmiştir. Resim 3.3'te deneyde kullanılan SD gösterilmiştir.



Resim 3.3. Deneyde kullanılan SD

SD'nin kimyasal özellikleri Tablo 3.3'te belirtildiği gibidir.

Tablo 3.3. Deneyde kullanılan SD'nin kimyasal özellikleri

C_2O_3	%3,5-5
SiO_2	%70-80
Fe_2O_3	%1,17-5,0
Al_2O_3	%2,55-4,10
CaO	%1,06-1,80
MgO	%8,05-9,9

Agregalar:

Agregalar Dersim Beton AŞ. tarafından tedarik edilmiştir. 0-5 mm ince agrega ve kum, 5-12 mm kaba agrega kullanılmıştır. Agregalar betonda boşluk oluşturup dayanımı düşürmemesi için bu boyutlarda seçilmiştir (Nath ve Sarker, 2017). Resim 3.4'te deneyde kullanılan agregalar gösterilmiştir.



(a)



(b)

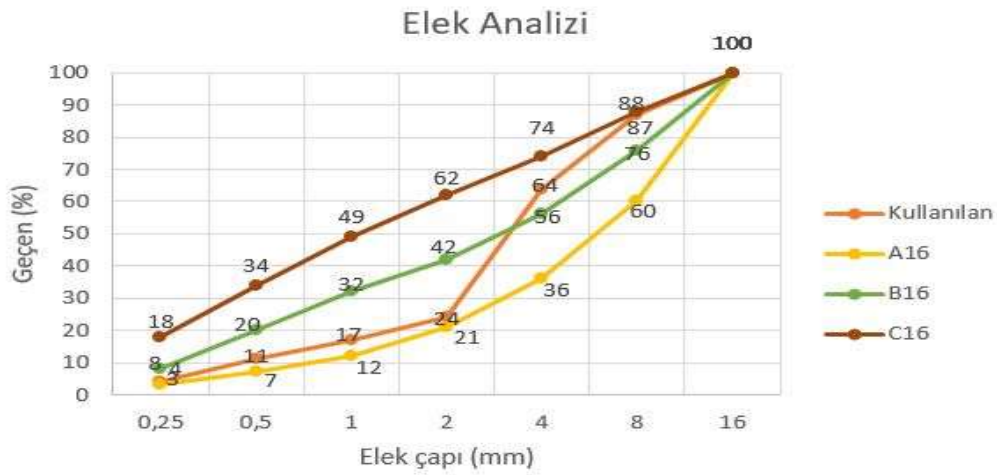
Resim 3.4. Deneyde kullanılan ince (a) ve kaba (b) agrega

Agregalar için elek analizi ve su emme deneyleri yapılmıştır.



Resim 3.5. Elek analizi deney aleti

Elek analizi titreşimli elektronik deney aleti ile yapılmıştır (Resim 3.5)



Resim 3. 6. Agregaların granülometri eğrisi

Resim 3.6’da belirtilen granülometri eğrisi incelendiğinde kullanılan agrega eğrisinin referans eğrileri arasında kaldığı tespit edilerek malzemenin uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aktivatörler:

$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranı 2.5 alınmıştır. Bu oran genellikle ekonomik nedenlerden dolayı 1.5 ile 2.5 arasında seçilmektedir (Olivia ve Nikraz, 2012). Bu oran arttıkça dayanım artış göstermektedir (Mustafa Al Bakri vd., 2012).

NaOH katı halde, %98 saflıkta pelet olarak bulunmaktaydı. Çalışmada 12M NaOH kullanılmıştır (M. Amran vd., 2021). 12M NaOH çözeltisi elde etmek için oda sıcaklığında 1000 litre suda 480 gr katı NaOH çözülmüştür. Bu karışım, numuneler dökülmeden 24 saat önce hazırlanmıştır (M. A. Aleem ve Arumairaj, 2012; Nath ve Sarker, 2017). Resim 3.7’de deneyde kullanılan alkali aktivatörler, sodyum silikat ve sodyum hidroksit sulu çözeltisi gösterilmiştir.



(a)



(b)

Resim 3.7. Deneyde kullanılan alkali aktivatörler (a) sodyum silikat, (b) sodyum hidroksit sulu çözeltisi

Bazalt Lif:

GB’nin gerilme mukavemetini arttırmak için lif takviyesi yapılmıştır. Lifler betona süneklik ve tokluk kazandırmaktadır. Bazalt lif uzunluğu 12-16 mm arasında seçilmiştir.



Resim 3.8. Deneyde kullanılan BL

Çalışmada kullanılan BL Kompozit Pazarı tarafından tedarik edilmiştir. Lifi fiziksel ve kimyasal özellikleri tabloda belirtildiği gibidir.

Tablo 3.4. Deneyde kullanılan BL'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler	Değer	Birim
Özgül Ağırlık	2,60-2,80	g/cm ³
Uzunluk	12-16	mm
Çap	9-23	μ
Çekme Dayanımı	>4000	MPa
Elastisite Modülü	80-90	GPa
Kopma Uzaması	2,0-4,5	%
Nem	<1	%
Uygulama Sıcaklığı	-850	°C

Süperakışkanlaştırıcı:

Süperakışkanlaştırıcının aşırı dozajının, beton basınç dayanımını düşürdüğü bulunmuştur. Bununla birlikte, dozaj seviyeleri optimum dozajdan düşükse, katkı dozajındaki artış, somut özelliklerin geliştirilmesine yardımcı olabilmektedir (Alsadey, 2012).

Polikarboksilat bazlı süperakışkanlaştırıcının naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcıya kıyasla işlenebilirlikteki etkisinin daha fazla olduğu bildirilmiştir (Jang vd., 2014).

Bu çalışmada polikarboksilik asit esaslı betonda akışkanlık/işlenebilirlik sağlayan süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı, bağlayıcının %1'i oranında kullanılmıştır.



(a)



(b)

Resim 3.9. Deneyde kullanılan süperakışkanlaştırıcı

Donatı:

Hasır çelik donatılar; dayanımı yükseltilmiş ve nervürlendirilmiş, farklı çap ve aralıklardaki çelik çubukların birleştirilmesiyle üretilen hasır biçiminde donatı türüdür. Bir hasırın boyutları 5x2,15 m'dir (Cihangir, 2022).

Maliyetinin düşük olması ve uygulama kolaylığından ötürü hasır çelik donatı, tünel kalıp ve prefabrik yapılarda, tabliye, radye ve kat döşemelerinde, zemin betonlarında, istinat duvarlarında gövde donatısı olarak kullanılmaktadır (Cihangir, 2022).

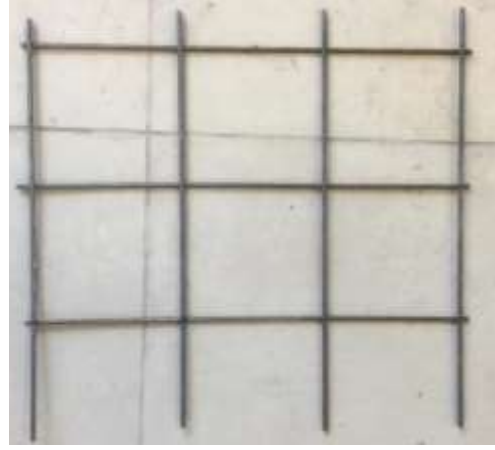
Bu çalışmada donatı olarak 15x15x0,5 cm'lik (Q131/131) hasır çelik kullanılmıştır. Donatıyı betonun ortasına sabitlemek için 2,5 cm'lik paspayı (Resim 3.10) kullanılmıştır.



Resim 3.10. 2,5 cm'lik paspayları



(a)



(b)

Resim 3.11. Deneyde kullanılan hasır çelik donatı

Portland Çimentosu:

Kontrol numunesi olarak dökülen PÇB yapımında içerdği kalker, cüruf bileşenleri ve 42,5+ MPa dayanım göstermesi sebebiyle CEM II/42,5 çimentosu seçilmiştir. Bu çimento türü, standartlara uygun olarak en çok %20 oranında pomza, kalker ve optimum oranda alçıtaşı kullanılarak elde edilmektedir (www.sezacimento.com.tr).



Resim 3.12. Deneyde kullanılan PÇ

3.2. Beton Karışım Tasarımı ve Karıştırma Prosedürü

3.2.1. Tasarım

Ön deney numuneleri için Tablo 3.5’te görülen 10 adet karışım oranı belirlenmiştir.

Tablo 3.5. GB karışım oranları

%	B100	BA10	BA20	BA30	BS10	BS20	BS30	BS50	S100	BSA25
SD	0	0	0	0	10	20	30	50	100	25
YFC	100	90	80	70	90	80	70	50	0	50
UK	0	10	20	30	0	0	0	0	0	25

Ön deney numunelerinde her karışım oranı için 6’şar adet donma-çözünme numunesi, 9’ar adet eğilme numunesi, 9’ar adet basınç numunesi dökülmüştür. Toplamda 240 adet ön deney numunesi dökülmüş, bunlar üzerinde mekanik ve fiziksel deneyler yapılmıştır. Ön deneylerde ana deney numunesinin karışım oranı belirlenmiştir. Böylece en yüksek mukavemeti veren BS10 karışım oranı esas alınmıştır. %0,5-%1-%2 oranlarına BL eklenmiş numuneler yayılma, basınç ve eğilme testlerine tabi tutulmuştur. Buradan istenen özellikleri sağlayan iki lif oranı seçilerek ana deney numunelerinde kullanılmıştır. Tablo 3.6., GB ve PÇB örneklerinin ayrıntılı oranlarını sunmaktadır.

Tablo 3.6. GB ve PÇB örnekleri için karışım oranları (Nath ve Sarker, 2017)

Numune	Kaba Ag. (kg/m ³)	İnce Ag.+ Kum (kg/m ³)	Bağlayıcılar (kg/m ³)			Alkali Aktivatörler (kg/m ³)		Lif (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Super-plastikl eştirici (kg/m ³)	Sıvı/Bağlayıcı
	5-12mm	0-5 mm	SD	YFC	PÇ	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Bazalt			
BS10-F0.5	637,6	1184,2	40	360		114,3	45,7	1,35	0	4	0,4
BS10-F1	633,3	1176	40	360		114,3	45,7	2,7	0	4	0,4
BS10-F2	624,5	1159,8	40	360		114,3	45,7	5,4	0	4	0,4
PÇB	799,2	921,4			550			0	198	0	0,36

3.2.2. Prosedür

Beton mikserine daha önce miktarı hesaplanarak tartılmış olan kaba agregalar yerleştirmiştir. Sonra üzerine ince agreg ve kum eklenmiştir. Kuru malzemeler 2 dakika karıştırıldıktan sonra agreganın su emme kapasitesine göre hesaplanmış olan su agregaya ilave edilmiştir. Bu işlem agregayı suya doygun hale getirmek için yapılmıştır. 1 dakika böyle karıştırılmıştır. Daha sonra mineral katkıları (YFC, SD, UK) karışıma dahil edilerek 2 dakika boyunca malzemeler harmanlanmıştır. Karışıma işlenebilirliği arttırmak için süperakışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Böylece 1 dakika daha karıştırma hali devam etmiştir. En sonunda alkali aktivatörler (NaOH ve Na_2SiO_3) ilave edilerek yaklaşık bir buçuk dakika daha karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi bittikten sonra taze beton yağlanmış kalıplara yerleştirilmiştir. Betonun daha iyi ve hızlı yerleşmesi için kalıplara sarsma tablasında vibrasyon uygulanmıştır. Beton suyunu kusmadan hemen önce kalıpların üstü mala yardımıyla düzlenmiştir. Numuneler hava almayacak şekilde üstü kapanarak ortam kürüne bırakılmıştır. Betonun hidrasyonunu bozmamak için havayla teması kesilmiştir.



Resim 3.13. Beton mikseri

3.3. DeneySEL Metod

Bu araştırma çalışması deneysel ve nümerik analiz şeklinde iki ana süreçten meydana gelmektedir. Deneyler ise ön ve ana deney olmak üzere iki aşamalıdır. Ön deneylerde mekanik ve fiziksel deneyler ile ana deney matrisi oluşturulmuştur.

3.3.1. Ön deneyler

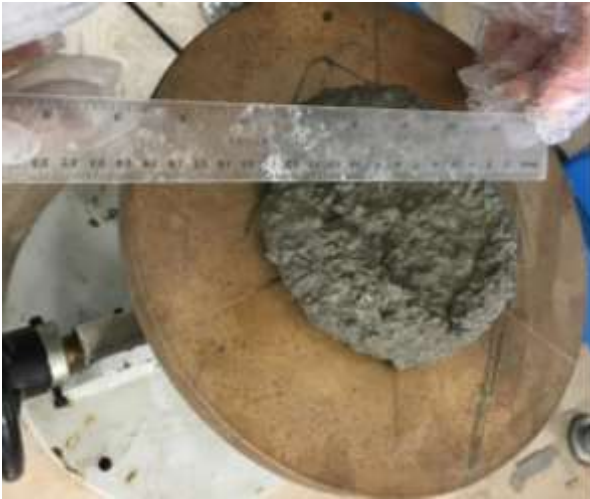
10x10x10 cm küp ve 10x10x50 cm kiriş numunelerin işlenebilirliğini ölçmek için sarsma tablası deney yöntemi kullanılmıştır.

3.3.1.1. Sarsma Tablası Deneyi

ISO 9812 standardına uygun şekilde tatbik edilmiştir (“ISO 9812, Fresh Concrete, Determination of the Consistency (Flow Test)”, 1979). Taze beton huni şeklindeki kalıba iki seferde yerleştirilmiş ve kalıp düşey halde yukarı çekilmiştir. Metal tabla 15 saniyede 15 düşme yaparak betonun çökmesini sağlayacak şekilde çalıştırılmıştır. Deney sonunda yayılma bir cetvel yardımıyla mm cinsinden ölçülmüştür. Akıcılık aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmaktadır:

$$\text{Akıcılık \%} = \frac{D-254}{254} \times 100 \quad (3.1)$$

D: Yayılma gösteren betonun taban çapı (mm), 254: Beton tabanının yayılma öncesindeki çapı (mm).

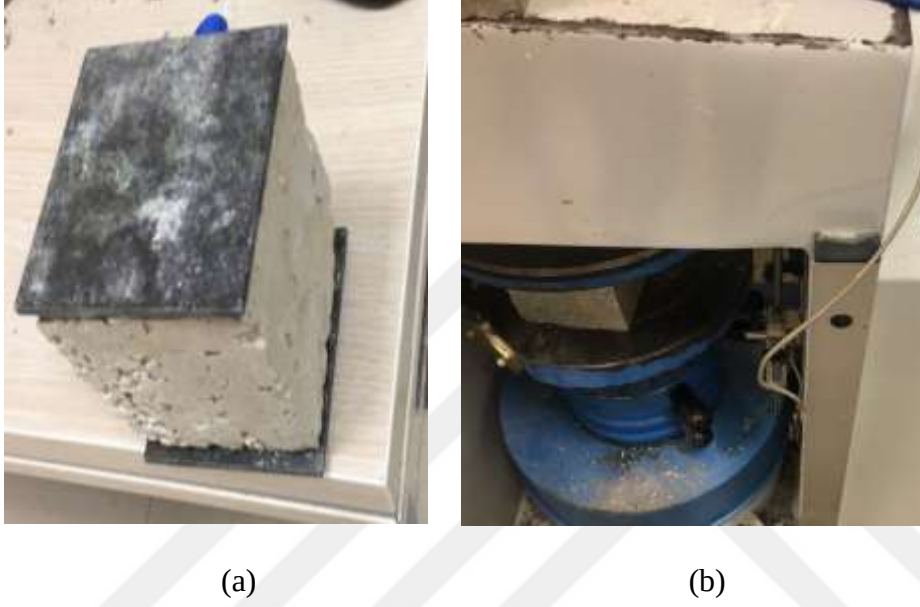


Resim 3.14. Sarsma tablasında akıcılığı ölçülen numune

Beton numunelerin kürlendikten sonra artık şekillendirilemediği zaman diliminde uygulanan deneyler aşağıda sıralanmıştır.

3.3.2.1. Basınç deneyi

Basınç dayanımı testi, boyutları 10 cm olan kübik numuneler üzerinde TS EN 206/1'e uygun olarak yapılmıştır (Türk Standardları Enstitüsü, 2014). Yükleme oranı 0,2 MPa/s idi (Moghadam vd., 2020).



Resim 3.15. Basınç numunesi (a) ve basınç aleti (b)

3.3.2.2. Eğilme deneyi

Deney, TS EN 12390-5 standardına uygun olarak tatbik edilmiştir. 10x10x50 cm kiriş kalıplardan çıkartılan numuneler, deney tarihine kadar (3, 7, 28. gün) kürlendikten sonra üç noktalı eğilme aleti numune kırılıncaya kadar eğilme yükü uygulanmıştır. Böylece eğilmede çekme dayanımı hesaplanmıştır (TSE, 2002a).



Resim 3.16. Üç noktalı eğilme testi için kullanılan 10x10x50 cm kiriş numuneler

3.3.2.3. Donma-çözünme deneyi

Deney aleti -18 ile +4 °C sıcaklıklar arasında döngü yapabilmektedir. Deney ASTM C666/ C666M standardına göre yapılmıştır (ASTM C666/C666M, 2003). 10x10x10 cm küp kalıplardan çıkartılan numuneler, deney tarihine kadar (28. gün) kürlendikten sonra ultrases geçiş hızları ölçülmüştür. Daha sonra bu numuneler donma-çözünme aletine bırakılmıştır.

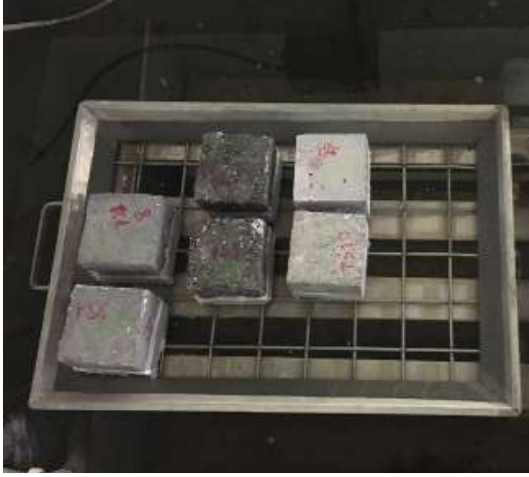
40. ve 100. devir de 1 ölçümler yapılmıştır. Daha sonra UGH değişimleri kıyaslanarak sonuçlar elde edilmiştir. 100. döngüde deney bitmiştir.



Resim 3.17. Donma-çözünmeye bırakılan numuneler

3.3.2.4. Su emme deneyi

Deney TS EN 12350-6 standardına göre yapılmıştır (Bilim, 2011). 10x10x10 cm hazırlanan küp numunelerin önce ağırlıkları ölçülmüş ve sonra 24 saat $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$ etüv fırınına bırakılmıştır. Daha sonra numunelerin etüv kurusu ağırlığı ölçülmüştür. Numunelerin, sadece alt yüzeyleri betonla temas edecek şekilde su geçirmez malzeme ile yan duvarları kaplanmıştır. Ölçümü yapılan numuneler su dolu bir kap içerisine bırakılarak 1., 2., 4., 6., 12., 18. saatler içinde sudan çıkartılarak ağırlıkları ölçülmüştür. Her saat için etüv kurusu ağırlık ve su emmiş numunelerin ağırlık farkından su emme yüzdeleri hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Resim 3.18. Su emmeye bırakılan numuneler

3.3.2.5. Ultrases geçirgenlik deneyi

ASTM C597-16'a uyularak, 10x10x10 cm küp numuneler, transdüser başlıklar arasına yerleştirilmiş ve ses dalgaları yardımıyla veriler elde edilmiştir (ASTM C597, 2016b).



Resim 3.19. UGH testi

3.3.2.6. SEM ve EDS analizi

Ön deney numunelerinden 1 cm²'den küçük boyutlarda parçalar alınıp cihaza yerleştirilmiştir. Numuneler lif varlığının, CaCO₃ ve C-S-H oluşumunun kanıtı için SEM ve EDS analizlerine tabii tutulmuştur.



(a)



(b)

Resim 3.20. SEM/EDS numuneleri (a) ve deney aleti (b)

3.3.2. Ana deneyler

Ön deneyler sonucunda 3 farklı lif katkılı GB'ler arasında en iyi sonuçları veren 2 lif oranı ana deneyler için seçilmiştir. Sonuçlar doğrultusunda, %1 ve %2 BL katkılı GB (BLGB) üzerinde ağırlık düşürme deneyleri yapılmıştır. Kontrol numunesi olarak PÇB'ye de aynı test uygulanmıştır.

3.3.2.1. Ağırlık düşürme deneyi

Ana deney numuneleri 50x50x5 cm boyutlarında plak şeklinde dökülmüştür. %1 BLGB, %2 BLGB ve PÇB numuneleri için 3'er adet olmak üzere toplamda 9 adet plak imal edilmiştir.



(a)



(b)

Resim 3.21. GB'nin kalıptaki (a) ve PÇB'nin su küründeki (b) görüntüsü

Bu plakların üzerine 3,035 kg ağırlığındaki çelik küre 413 cm yükseklikten 9,0001 m/s hız ile düşürülmüştür. Test düzeneği Resim 3.22'de görüldüğü gibidir.



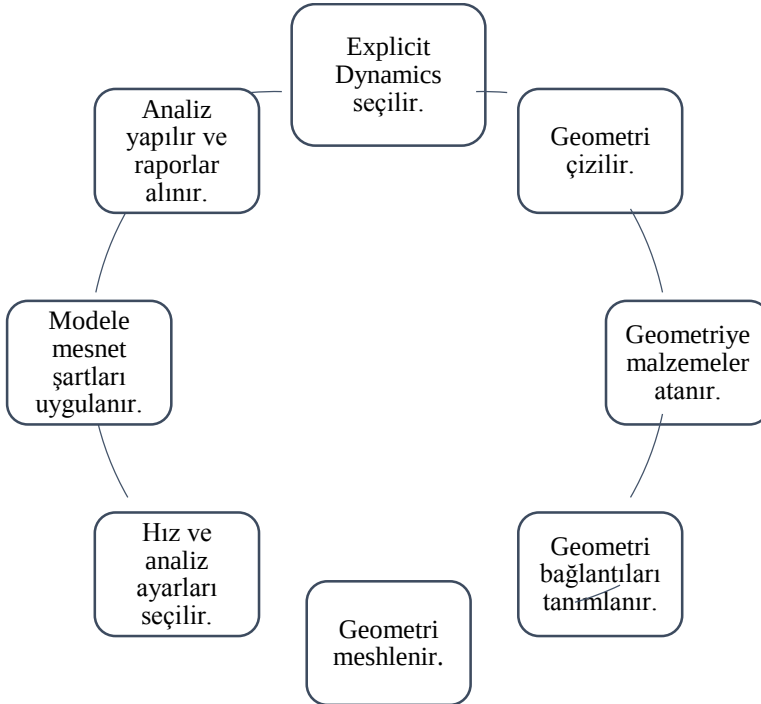
(a)

(b)

Resim 3.22. Ağırlık düşürme test düzeneği (a), küresel ağırlık (b)

3.4. Modelleme

Modelleme adımları Şekil 3.1’de akış şemasında belirtildiği şekilde takip edilmiştir.



Şekil 3.1. Modelleme akış şeması

3.4.1. Deplasman verilerinin alınması

Sayısal görüntü işleme yöntemi (SGİY) son zamanlarda, sensörler ve veri toplama cihazlarıyla yapılan geleneksel veri alma yöntemleri yerine bir alternatif olmuştur. Nedeni ise, veri alma sensörlerinin malzemeye ve cihaza kurulmasının hem maliyet hem zaman açısından dezavantaj oluşturmamasıdır. Oysa SGİY’de numunenin hareketi kamera yardımıyla görüntülenerek veriler işlenmektedir. Böylece geleneksel yöntemde oluşan olumsuz koşullar engellenmektedir (Y. S. Erdoğan, 2018). Özellikle dinamik yüklerin, yapılardaki analizi esnasında ivme, hız, zaman, deplasman verileri hasar tespiti açısından önemlidir. Bahsi geçen parametre verilerinin geleneksel yöntemler kullanılarak işlenmesi SGİY’ye kıyasla daha zordur (Y. S. Erdoğan, 2018).

Ağır çekim video kaydı SONY RX 100-4 kamera yardımı ile çekilmiştir. Böylece yer değiştirme verileri elde edilmiştir. Şekil 3.23’te nesne takibinin yapılacağı beyaz etiketin bulunduğu donanım görünmektedir. Kamera saniyede 1000 fps’de çekim yapabilmektedir. Toplam kayıt süresi 7 saniyedir.

Veriler korelasyon tabanlı şablon eşleştirme yöntemiyle elde edilmiştir. Etiketin bulunduğu piksel aralığı MATLAB dili kullanan yazılıma tanıtılmıştır. Yazılım, videodaki etiketi her kare için tarayarak videodaki ilk kareye göre deplasman-zaman grafiği oluşturmuştur. Şekil 3.23’te görülen beyaz etiketin boyutu 1,2x2,1 cm’dir. Veriler etiketin boyutuna göre ölçeklenerek zamana bağlı deplasman verileri bulunmuştur (Orhan, 2021).



Resim 3.23. Plağın deplasmanını bulmak için SGİY ile nesne takibi yapılacak etiket

3.4.2. Deplasman verilerinin programa işlenmesi

Çarpma deney sonuçlarının kıyaslanması için SEY'e dayalı olarak geliştirilen ANSYS Workbench yazılımı kullanılmıştır. Çarpma simülasyonu, Explicit Dynamics ile modellenmiştir. Bu analizin seçilme nedeni ise darbe gibi kompleks dinamik yükler altındaki malzemenin yapısını daha iyi analiz edebilmesinden kaynaklanmaktadır (AlAraza ve Mahmud, 2022). Daha sonra Designer Model ile oluşturulan geometrinin her bir parametresi Engineering Data bloğunda tanımlanmıştır.

Betonun dinamik davranışını tanımlamak için ticari yazılımda önerilen ve kullanılabilen birkaç malzeme modeli vardır, örneğin Holmquist-Johnson-Cook (YYK) modeli (Holmquist ve Johnson, 2011), Karagozian ve Case (KC) modeli (Malvar vd., 1997) ve Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) modeli (Borrvall ve Riedel, 2011). Bu çalışmada, dinamik yükler altında beton davranışını daha iyi tanımladığı düşünüldüğü için GB, RHT ile tanımlanmıştır (Pavlovic vd., 2017; Vacev vd., 2023).

RHT beton modeli, Riedel ve arkadaşları tarafından geliştirilen kırılğan malzemeler için gelişmiş bir plastisite modelidir (W. Riedel, 2004; W. Riedel vd., 1999; Werner Riedel vd., 2009). Betonun dinamik yüklenmesini modellemek için özellikle yararlıdır. Kaya ve seramik gibi diğer kırılğan malzemeler için de kullanılabilir.

RHT kurucu modeli, malzemedeki sapma geriliminin, formun genelleştirilmiş bir hasar yüzeyi ile sınırlandırıldığı birleşik bir plastisite ve kayma hasarı modelidir. Denklem (3.2), plastisite ve kayma hasar modelinin matematiksel ifadesini temsil etmektedir.

$$f(P, \sigma_{eq}, \theta, \dot{\epsilon}) = \sigma_{eq} - Y_{TXC(P)} * F_{CAP(P)} * R_3(\theta) * (F)_{RATE(\dot{\epsilon})} \quad (3.2)$$

Bu hasar yüzeyi, jeolojik malzemelerin tepkisinin aşağıdaki yönlerini temsil etmek için kullanılabilir:

- ❖ Basınçta sertleştirme
- ❖ Gerilme sertleşmesi
- ❖ Gerilmede ve basınçta gerilme oranı sertleşmesi
- ❖ Basınç ve çekme meridyenleri için üçüncü değişmez bağımlılık
- ❖ Gerilme yumuşaması
- ❖ Gözenekli çökme nedeniyle hasarın birleştirilmesi

Model, doğası gereği modülerdir ve malzeme davranışının ayrı ayrı yönlerini açılıp kapatılabilecek şekilde tasarlanmıştır. Modelin malzeme davranışının çeşitli yönlerini nasıl temsil ettiğine dair daha fazla ayrıntı aşağıda sunulmaktadır.

Basınç dayanımları 35 MPa ve 140 MPa olan betona ilişkin veriler malzeme kütüphanesinde tanımlanmıştır. RHT model, girilen verilerin basınç dayanımı tanımlayacak şekilde formülize edilmiştir. Böylece seçilecek malzeme için kütüphanedeki tanımlanmış bu iki betondan biri alınabilmekte, basınç dayanımı tanımlanmak istenilen betona uyacak şekilde değiştirilebilmektedir. Böylece kalan terimler bağlantılı olarak ifade edilebilecektir. Analizde kullanılan RHT modelin CONC-35 için girdi değerleri varsayılan olarak alınmıştır. Tablo 3.7 girilmesi gereken verileri ve analizde kullanılan değerleri göstermektedir.

Tablo 3.7. Analizde kullanılan RHT model değerleri (Vacev vd., 2023)

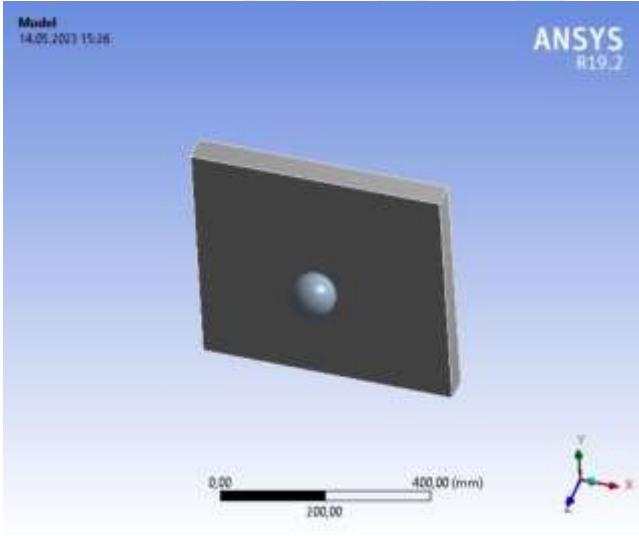
İsim	Değer		
	PÇB	%1 BLGB	%2BLGB
Basınç Dayanımı (f_c) [MPa]	53	60.1	60.4
Çekme Dayanımı (f_t/f_c)	0.1190	0.12	0.1223
Kayma Dayanımı (f_s/f_c)	0.18	0.18	0.18
Sağlam yüzey hasar sabiti A (A_{Fail})	1.6	1.6	1.6
Sağlam yüzey hasar derecesi (N_{Fail})	0.61	0.61	0.61
Çekme D./ Basınç D. Meridyen Oranı ($Q_{2.0}$)	0.6805	0.6805	0.6805
Kırılmandan Sünekliğe Geçiş (BQ)	0.0105	0.0105	0.0105
Sertleşme Eğimi	2	2	2
Elastik Mukavemet/ft	0.7	0.7	0.7
Elastik Mukavemet/fc	0.53	0.53	0.53
Kırılma Mukavemeti Sabiti (B)	1.6	1.6	1.6
Kırılma Mukavemeti Derecesi (m)	0.61	0.61	0.61
Basınç Gerinim Oran Derecesi (α)	0.032	0.032	0.032
Çekme Gerinim Oran Derecesi (δ)	0.036	0.036	0.036
Maksimum kırılma mukavemeti oranı (SFMAX)	1,00E+20	1,00E+20	1,00E+20
Elastik Yüzeyde Kapak Kullanımı	evet	evet	evet
Hasar Sabiti D1	0.04	0.04	0.04
Hasar Sabiti D2	1	1	1
Hasar İçin Minimum Zorlanma	0.01	0.01	0.01
Bölme Kesme Modülü Fraksiyonu	0.13	0.13	0.13

Düşürülen küre için paslanmaz çelik seçilmiştir. Malzeme özellikleri Tablo 3.8’de görüldüğü gibidir. Yoğunluk kürenin ağırlığını uygulamak için 7950 kg/m^3 olarak girilmiştir.

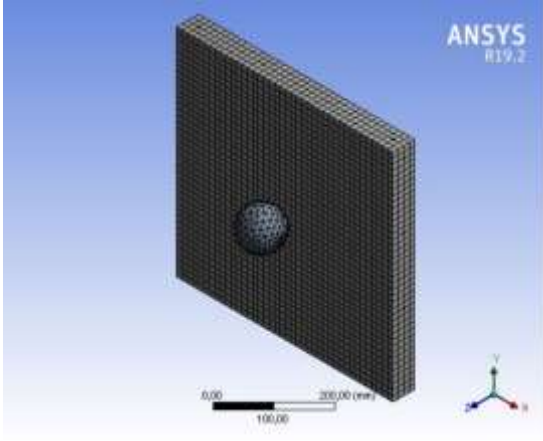
Tablo 3.8. Paslanmaz çeliğin malzeme özellikleri

Veriler	Değer	Birim
Yoğunluk	7950	kg/m^3
Elastisite Modülü	200	GPa
Poisson Oranı	0,3	GPa
Bulk Modülü	167	GPa
Kesme Modülü	76923	MPa

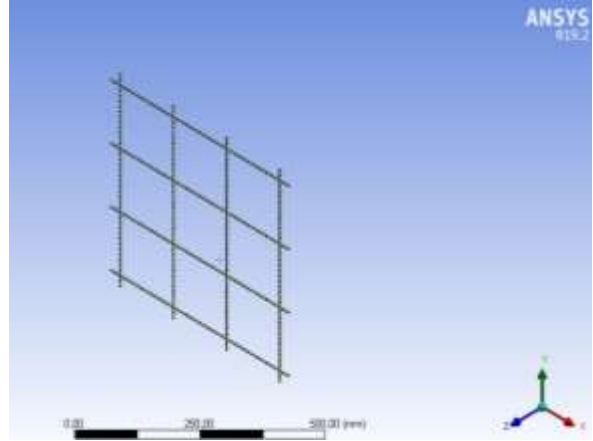
Resim 3.24/3.25/3.26’da; betonun modellenmesi, ağırlara bölünmesi ve mesnetlenmesi aşamaları görülmektedir.



Resim 3.24. Beton ve darbe küresi modeli

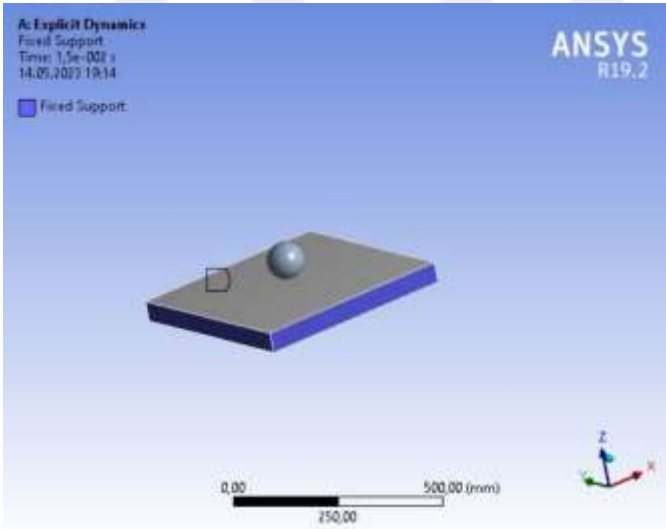


(a)



(b)

Resim 3.25. Betonun, darbe küresinin (a) ve hasır çeliğin (b) meshlenmesi



Resim 3.26. Betonun mesnetlenmesi

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Ön Deney Bulguları

Belirlenen 10 adet karışım oranı içinden optimum değeri bulmak için 10 set numune hazırlanmıştır. Her set için 3., 7. ve 28. gün için aşağıda bahsedilen deneyler yapılmıştır. Daha sonra optimum orana %0.5, %1, %2 oranlarında katılan BL ile oluşturulan yeni numunelerin sadece 28. gün basınç dayanımı dikkate alınmıştır. Bunun nedeni optimum oranda karışmış numunenin önceden incelenmiş olmasıdır.



Resim 4. 1. 10 set küp ve kiriş numuneler

4.1.1. Yayılma deneyi

Bu deney betonun kalıba yerleşebilme kabiliyetini öğrenmek amacıyla yapılmıştır.

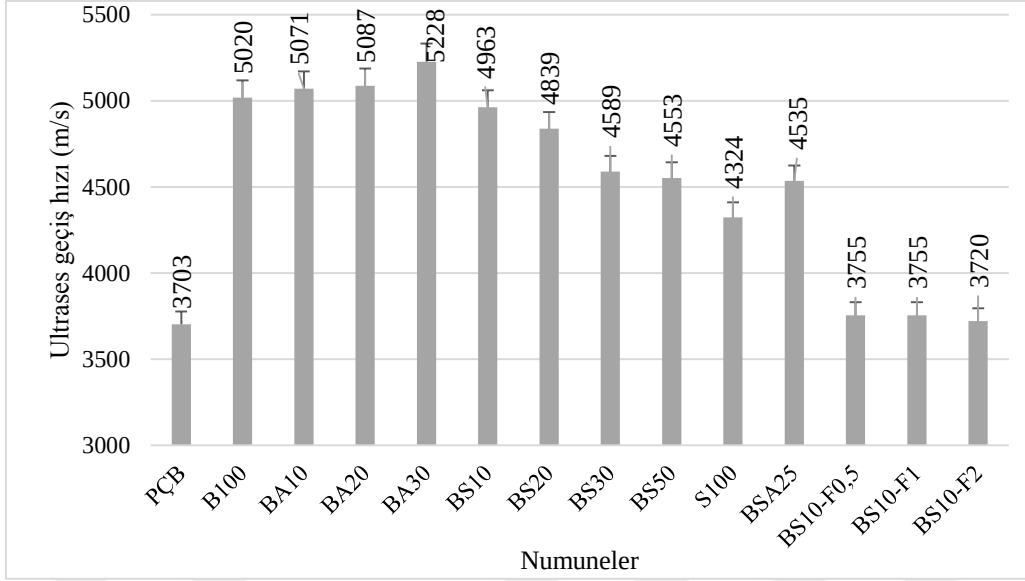
Tablo 4.1. Numunelerin yayılma değerleri (mm)

Numune	B100	BA10	BA20	BA30	BS10	BS20	BS30	BS50	S100	BSA25	PCC	BS10 -F0,5	BS10 -F1	BS10 -F2
Yayılma Çapları	83	90	100	102	103	107	108	113	87	115	96	112	107	103

En uygun oranı bulmak üzere hazırlanan ön deney numunelerini karşılaştırmak için bir yayılma testi yapılmıştır. İpek ve Mermerdaş'ın araştırmasına göre, harçların akışkanlığı mm cinsinden sunulduğunda, 200 mm'lik akışkanlık %100 akışkanlık olarak tanımlanmıştır (İpek ve Mermerdaş, 2022). Tablo 4.1 incelendiğinde UK ilavesi ile YFC oranındaki azalma işlenebilirliği arttırmıştır. Bunun nedeni, yuvarlatılmış UK parçacıklarına açısız ve pul YFC parçacıkları eklendiğinde, yuvarlak UK parçacıklarının hareketini kısıtlayarak geopolimer harcının akışını azaltmasıdır (Alexander ve Shashikala, 2022). Aynı zamanda Yang ve Song'a göre YFC bazlı GB'ler UKGB'lere kıyasla daha az akışkandır (K.-H. Yang ve Song, 2009). Sonuçlar incelendiğinde, PÇB'nin GB'ye kıyasla daha az akışkan olduğu bulunmuştur. Alexander ve Shashikala çalışmalarında, bunun nedeninin kullanılan alkali sıvının viskoz doğası olduğunu açıklamışlardır (Alexander ve Shashikala, 2022). Son olarak, basınç dayanımı açısından benzer değerler gösteren B100 ve BS10 numuneleri arasındaki seçimi belirleyen etken işlenebilirlik olmuştur. Bu nedenle, %24,09 daha yüksek işlenebilirliğe sahip olan BS10 numunesi ana karışım oranı olarak seçilmiştir. Ancak lif oranı arttıkça işlenebilirliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle %0,5 -%1- %2 gibi lif oranları sınırdan tutularak daha yüksek oranlarda test yapılmamıştır. Ranjbar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, türü ve geometrisi ne olursa olsun lif içeriğinin arttırılmasının lif takviyeli geopolimer kompozitlerin akışkanlığını azalttığını bildirmişlerdir (Ranjbar vd., 2016). Wang'ın 2021'de yaptığı çalışmasına göre BL işlenebilirliği azaltmaktadır (Y. Wang vd., 2021). Ranjbar ve Zhang, çalışmalarında işlenebilirliği azaltmasına rağmen lif içeriğinin arttırılmasının büyük makro çatlaklar yerine birçok mikro çatlak oluşumuna yol açtığı sonucuna varmışlardır (Ranjbar ve Zhang, 2020). Deneysel sonuçlar ve literatür göz önüne alındığında, dayanımın yanı sıra, darbe deneyleri için %1 ve % 2'lik optimum lif oranları seçilmiştir. PÇB, BS10'a yaklaşık bir işlenebilirlik değeri vermiştir.

4.1.2. Ultrases geçirgenlik deneyi

UGH testi betonun iç matrisini anlamak için gereklidir ve zahmetsiz bir yöntem olması en büyük avantajlarından biridir. Numunelerin standart sapma değeri %2'dir.

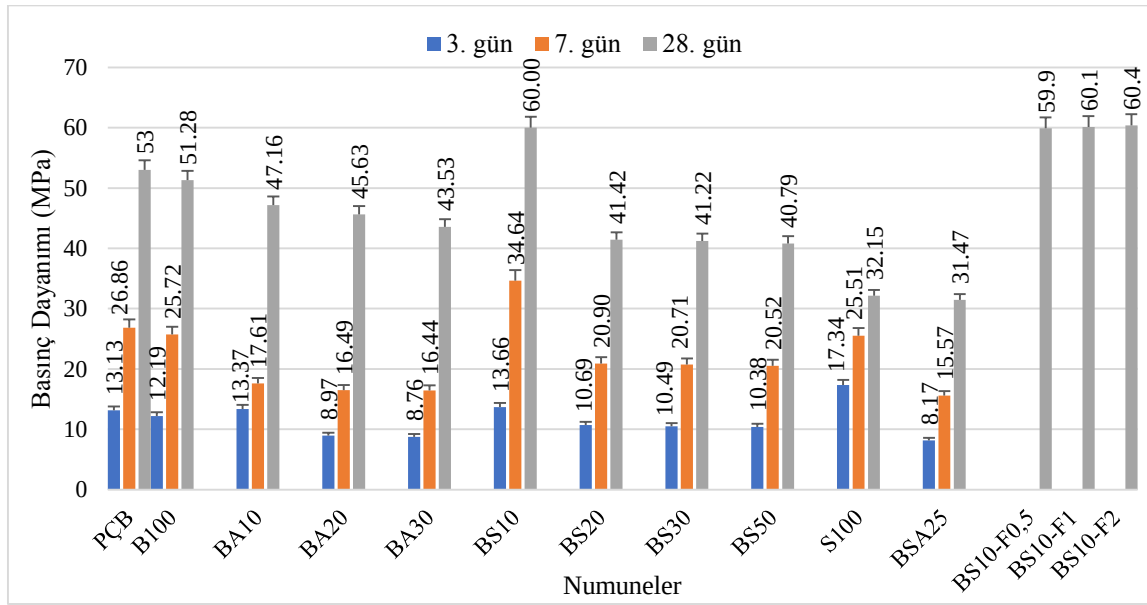


Şekil 4.1. Numunelerin ultras ses geçiş hızı

Genel olarak, UGH, betonun geçirgenlik özelliklerini doğrudan etkileyen boşluklar ve çatlaklar gibi mikroyapı ve gözenek yapısındaki kusurların homojenliğini ve varlığını temsil etmektedir (Yap vd., 2013). Şekil 4.1 incelendiğinde, UK oranı arttıkça geçiş oranı da artış göstermiştir. Bunun nedeni, UK'nin boşlukları doldurmasıdır, çünkü YFC'ye kıyasla daha küçük bir mikron boyutuna sahiptir. UKGB numunelerinin SD numunelerine göre daha boşluksuz olması, yoğunluklarının daha yüksek olmasına bağlıdır (Holland, 2005). %100 YFC kullanıldığında, %100 SD kullanılan numuneye kıyasla numunelerin geçiş hızı %16,09 artmıştır. Basınç ve eğilme dayanımları incelendiğinde, B100 numunesi S100 numunesinden %59,5 fazla basınç ve %3,78 fazla eğilme dayanımı göstermiştir. Buradan UGH değerleri ile basınç ve eğilme dayanımlarının paralel olduğu görülmektedir. UK ve SD'nin %25 oranında kullandığı BSA25 numunesi %20 UK ve %20 SD ilaveli betona kıyasla geçiş hızında sırasıyla %10,85 ve %6,28 azalış göstermiştir. Sadece lifli numunelerin UGH değerleri, 4000 m/s değerinin altında kalmıştır. Bunun nedeni liflerin beton içinde dağılması nedeniyle oluşturduğu boşluklar olabilir. Ek olarak şekilde belirtilen bütün betonların, UGH değerleri 3702 ila 5228 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Bu sebeple Hint standartlarında belirtilen değerlendirme kriterlerine göre beton matrisinin çok az miktarda boşluk ve çatlak içerdiği, 'İYİ' ve 'MÜKEMMEL' kategorisine girdiği sonucuna varılmıştır (IS 13311 (Part 1), 1992).

4.1.3. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı, malzeme kalitesi ve sınıfını tespit etmek amacıyla yapılmıştır. 10x10x10 cm küp kalıplardan çıkartılan numuneler, deney tarihine kadar (3, 7, 28. gün) kürlendikten sonra deney presi olarak adlandırılan alet ile üniform basınç yükü yüklenerek kırılmaya maruz bırakılmıştır. Numunelerin standart sapma değeri %3'tür.



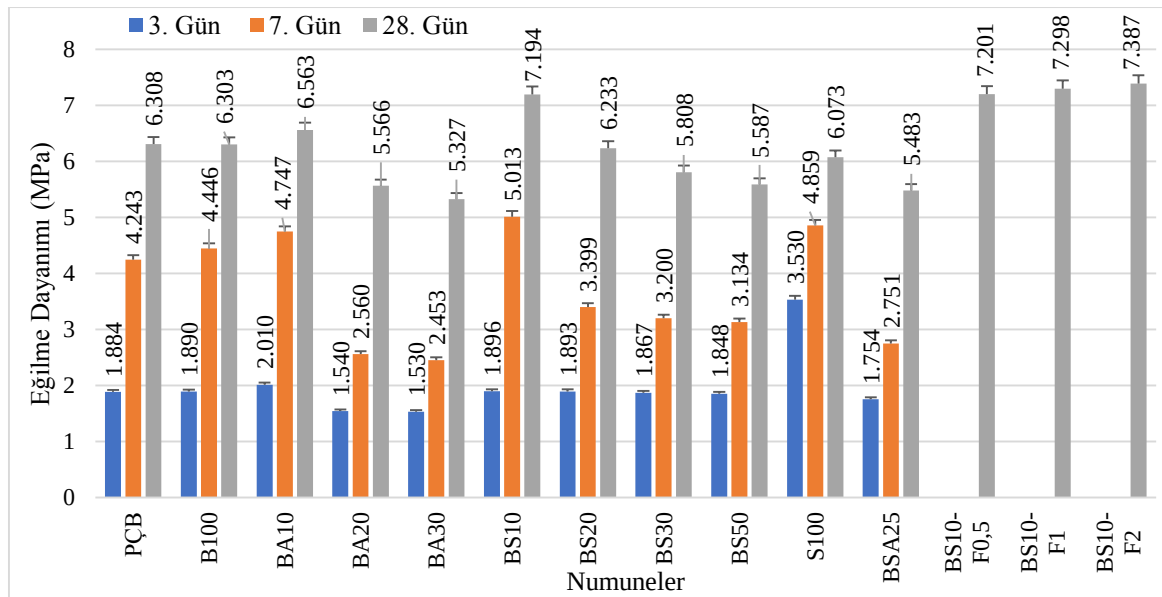
Şekil 4.2. Numunelerin 3., 7. ve 28. gün basınç dayanımları

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, 7. ve 28. günde 34,64 ve 60 MPa ile en yüksek mukavemeti veren BS10, optimum karışım oranı olarak seçilmiştir. PCB basınç dayanımı kontrol numunesi olması dolayısıyla BS10'a yakın değerlerde sonuç verecek şekilde dizayn edilmiştir. Ek olarak, UK ilavesiyle mukavemet azalım göstermiştir. Bu sonuca benzer olarak, Singh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, karışıma %50 ilave edilerek UK'nin en yüksek basınç etkisi bulunmuştur. %50'nin altına düştüğünde mukavemet azalış göstermektedir (R. P. Singh vd., 2023). Ayrıca UK ilavesi ile betonun akışkanlığı artmıştır. Buradan akışkanlık arttıkça basınç dayanımı azaldı sonucuna varılabilir. Karışıma %10 oranında SD eklenmesiyle dayanım artmıştır. Buna neden olarak, boşlukların SD'nin mikro yapısı ile doldurulması sayesinde daha kompakt bir yapı oluşturması, böylece mukavemetin artması söylenebilir (R. P. Singh vd., 2023). Fakat diğer oranlarda azalım görülmüştür. UGH, SD katılım oranı arttıkça azalmıştır. Buradan %10 SD oranının üzerine çıkıldığında betonun akıcılığı arttıkça dayanımın azaldığı söylenebilir. Tıpkı UK'de olduğu gibi SD

betonun akışkanlığını arttığı ölçüde dayanım kaybetmiştir. Bununla birlikte, 28. günde SD katkısı %100'e ulaştığında, mukavemet diğer SD oranlarına kıyasla sırasıyla %46.41, %22.38, %22, %21.18 oranında azalış göstermiştir. Bu tez çalışmasının sonuçlarına paralel olarak, Sai ve Katya çalışmalarında, SD oranı artışıyla YFC'nin azalmasına bağlı olarak mukavemetin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır (W. Sai ve K. Satya, 2019). Buna neden olarak betonun işlenebilirliğinin düşük olması sebebiyle betonun tam yerleşmemesi gösterilebilir. Singh ve arkadaşlarının çalışmasında, SD'nin %20 oranında karışıma katılmasıyla dayanımın azaldığı bulunmuştur (R. P. Singh vd., 2023). Ayrıca Şekil 4.2 incelendiğinde, lif oranlarının %1'den daha az değişim göstererek basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı bulunmuştur. Dias ve Thaumaturgo'ya göre, BL'nin %1 oranında eklenmesinin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisi yoktur (D. P. Dias ve Thaumaturgo, 2005). Ancak Ronald ve arkadaşlarının çalışmalarında, %2 BLGB'nin basınç dayanımının %1 BLGB'den yüksek olduğu sonucuna varılmıştır (Ronad vd., 2016). Literatür, bulunan deneysel sonuçlar ile paralellik göstermektedir.

4.1.4. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilmede çekme dayanımı bu çalışmada liflerin darbe direncini sönmlemedeki etkisini araştırabilmek için önemli bir bulgudur. Numunelerin standart sapma değeri %2'dir.



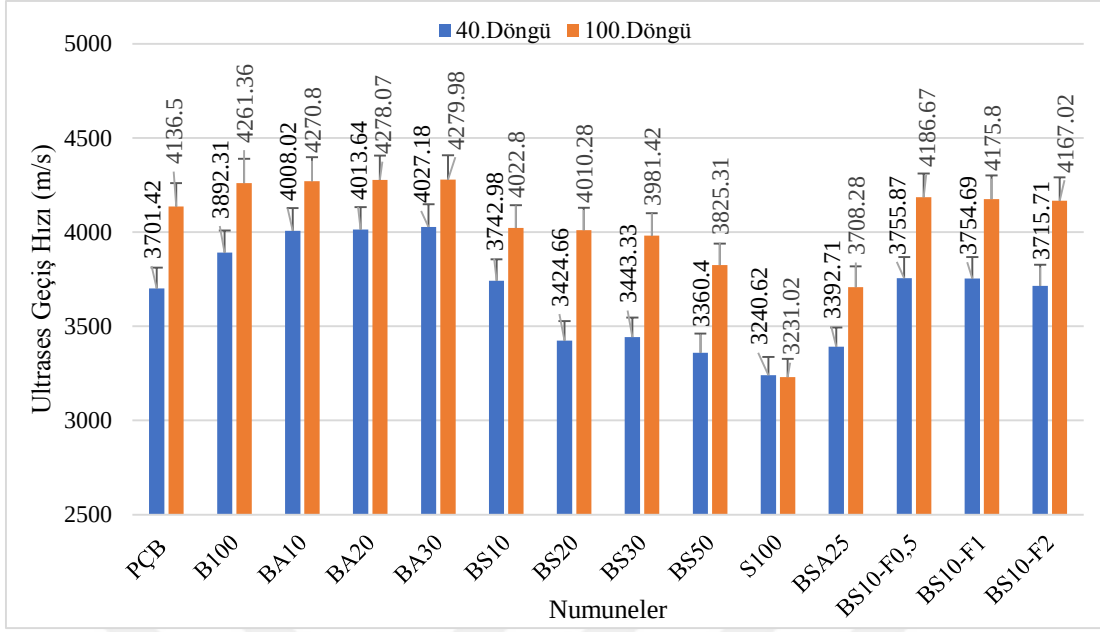
Şekil 4.3. Numunelerin 3., 7. ve 28. gün eğilme dayanımları

Şekil 4.3, incelendiğinde, 3. gün değerlerinde 3,53 MPa ile en yüksek eğilme mukavemetini veren S100 karışımı bulunmuştur. Bunun nedeni SD'nin, betonun erken yaş mukavemetini arttırması olabilir (Mustakim vd., 2021). Fakat %100 YFC bazlı GB'lerin %100 SD bazlı GB'lere göre eğilme dayanımı %3,64 yüksektir. 3., 7. 28. günde basınç dayanımında olduğu gibi SD oranı arttıkça eğilme dayanımı düşmüştür. Bu sonuca benzer olarak Basheer ve Antherjanam çalışmalarında, %10 ila %60 oranında SD ilave ettikleri YFC bazlı GB'lerde, oranın artmasıyla eğilme dayanımının düştüğünü gözlemlemişlerdir (Basheer ve Antherjanam, 2020). Ancak YFC karışımına yüzde 10'dan fazla UK eklendiğinde eğilme mukavemeti azalmıştır. Literatürde benzer sonuçlar elde edilmiştir (Parashar vd., 2022). Böylece küçük mikron yapıları UK ve SD'nin %10'dan fazla betona ilavesinin iyi sonuçlar vermediği savunulabilir. BSA25 içeriğinde %25 oranlarında UK ve SD bulundurduğu için BS20 ve BA20'e yakın değerler göstermiştir. PÇB ise literatürle benzer olarak, 3., 7. ve 28. günde yaklaşık olarak B100'e yakın değerler göstermiştir (Basheer ve Antherjanam, 2020; Nath ve Sarker, 2017). BS10 3., 7. ve 28. günde SD'nin diğer oranlarına ve diğer karışım oranlarına kıyasla en yüksek sonucu vermiştir. Gupta yaptığı çalışmasında, %10 oranında SD ilavesinin optimum olduğu sonucuna varmıştır (Gupta, 2021). Lifli GB'lerin lifsiz karışımlara ve PÇB'ye göre eğilme dayanım değerleri daha yüksek çıkmıştır. Annadurai yaptığı çalışmasında benzer sonuçlar elde etmiştir (Annadurai vd., 2023).

Elde edilen deneysel veriler ve bunları destekleyen literatür çalışmaları göz önüne alındığında, YFC karışımına %10 oranında SD ilave edildiğinde en yüksek eğilme dayanımı bulunmuştur. Ayrıca %1 BLGB ve %2 BLGB sırasıyla %0,5 BLGB'ye kıyasla %1,34 ve %2,58 daha yüksek eğilme direncine sahip olduğundan ana deneyler için bu iki lif oranı tercih edilmiştir.

4.1.5. Donma-çözünme deneyi

Betonun uzun vadede dayanıklılığını ölçmede donma-çözünme gibi zamanla betona zarar verici etkilerin araştırılması beton ömrünü iyileştirmek adına gereklidir. Bu nedenle durabilite deneylerinden donma-çözünme testi numuneler için uygulanmıştır. Numunelerin standart sapma değeri %3'tür.



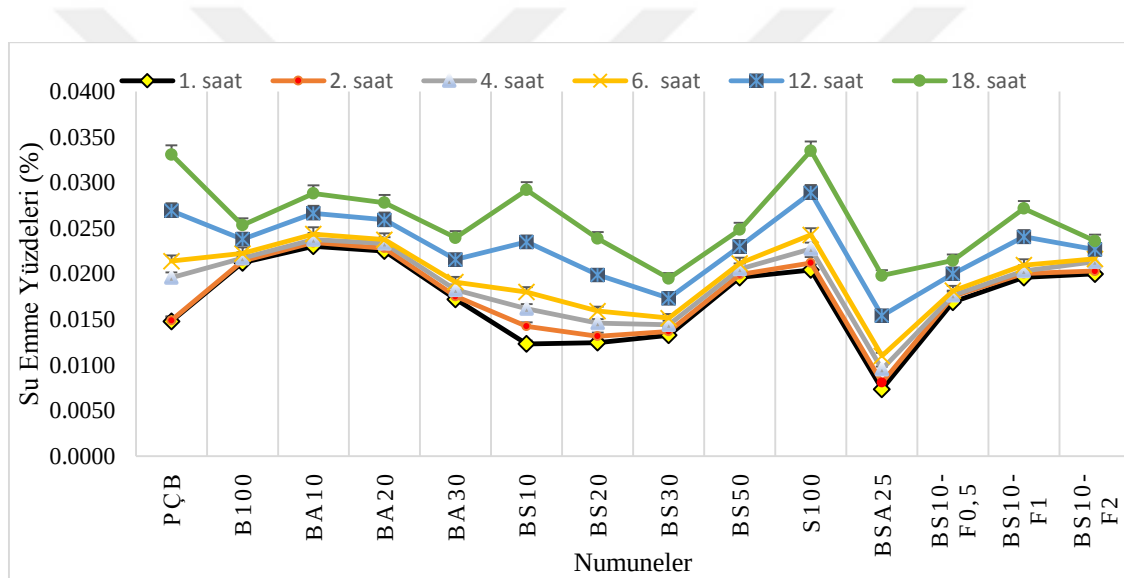
Şekil 4.4. Donma-çözünme numunelerinin UGH'leri

Numunelerinin donma-çözünme dirençlerini gözlemlemek için literatürdeki benzer çalışmalarda görüldüğü üzere, 40. ve 100. döngülerde numunelerin, UGH'lerine bakılmıştır (Ziada vd., 2023). Grafik incelendiğinde 40. ve 100. döngüler paralellik göstermektedir. Döngü arttıkça geçiş hızı artmıştır yani numunelerde boşluk oranı su emilmesiyle azalmıştır. Dimas'ın çalışmasına benzer olarak, YFC bazlı GB'ye ilave edilen SD'nin oranı arttıkça donma çözünme direnci azalmıştır (Dimas vd., 2009). Literatüre paralel olarak su emme testinde de görüldüğü üzere SD katkılı betonlar yüksek oranda su emme eğilimindedir (Bajpai vd., 2023). UGH deneylerinde gözlemlendiği üzere SD oranı arttıkça geçiş hızı azalmıştır. Buradan betonun içyapısında boşluklar veya çatlaklar olduğu anlaşılabılır. Basınç dayanımları da aynı şekilde düşüş göstermiştir. Bu sonuçlar eşliğinde donma-çözünme deneyi ile tespit edilen geçiş hızında gözlenen azalım beklenen bir sonuç olmuştur. Ayrıca Temuujin'in çalışmasında bulunduğu gibi, UKGB'lerin 40. döngüde daha fazla direnç kaybı yaşadığı gözlemlenmiştir (Temuujin vd., 2014). Döngüler incelendiğinde, en hızlı geçiş oranıyla BA30 numunesinin en yüksek donma-çözünme direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Literatürde bunun nedeni UK parçacıklarının birbirlerine yapışarak boşlukları azaltması şeklinde yorumlanmıştır (Diaz-Loya vd., 2011). 100. döngüde oluşan azalım mikro çatlaklar sebebiyle açıklanabilir. Çünkü UGH daha kompakt yapılardan daha hızlı geçmektedir. Lif oranı arttıkça donma-çözünme direnci azalmıştır. Literatürde bu durumun, liflerin uzunlukları ve çaplarına bağlı olabileceği savunulmuştur (Y. Yuan vd.,

2020). Ayrıca su emme testinde lif oranı arttıkça su emme oranı artmıştır. Ultrases geçiş hızları da lif oranı arttıkça azalmıştır. Buradan hareketle betonun geçirgenliği lif oranı arttıkça artmış sonucuna varılabilir. PÇB, lifli GB'lere yakın değerler göstermiştir. Literatürde, bu konuda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır (M. Amran vd., 2021).

4.1.6. Su emme deneyi

Bir diğer durabilite deneyi ise betonun su emme kapasitesinin ölçümüdür. Deney betonun ne kadar su emme kapasitesi olduğunu ölçmek için tatbik edilmiştir. Numunelerin standart sapma değeri %3'tür.



Şekil 4.5. Su emme yüzde grafiği

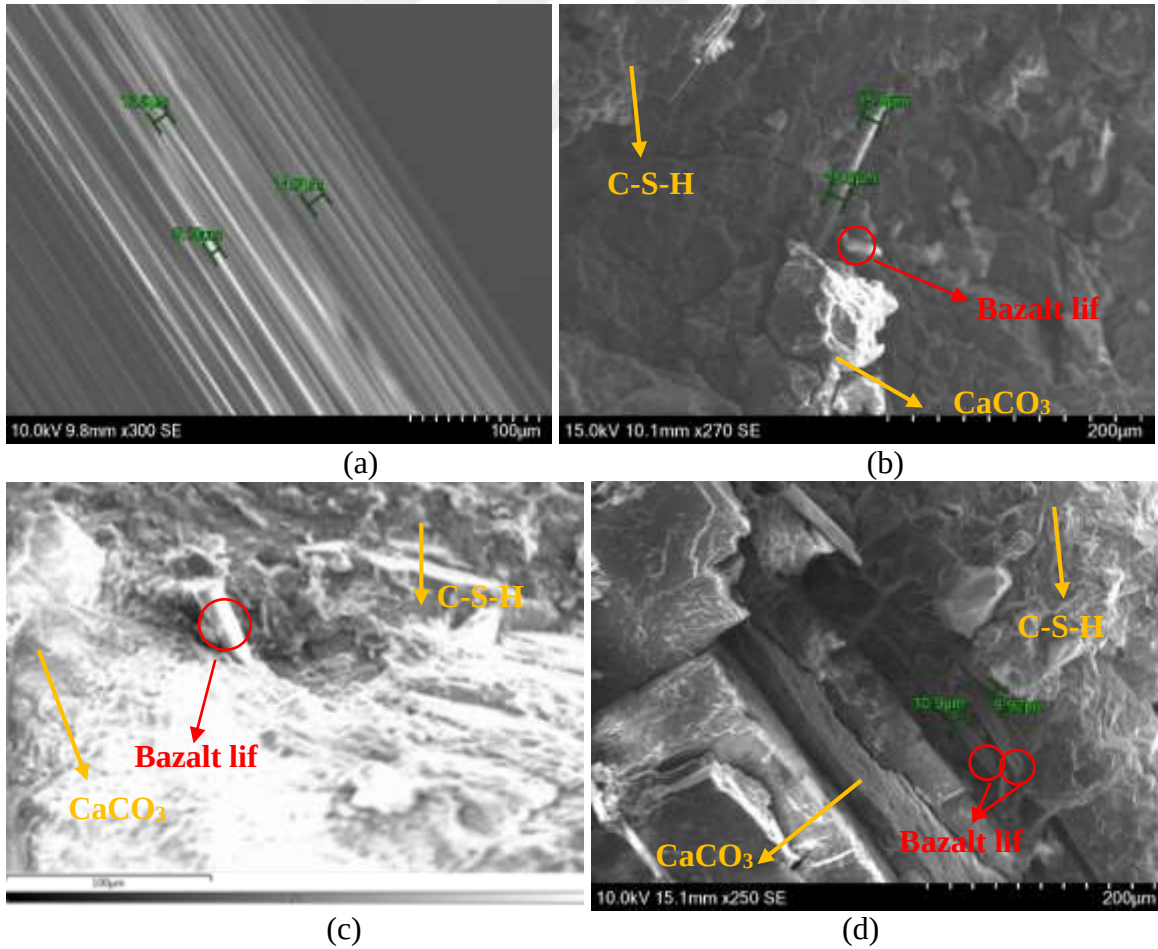
En az su emme değeri BSA25 numunesinde gözlenmiştir. SD oranı arttıkça numunelerin su emme yüzdeleri artmıştır. UK oranı arttıkça su emme yüzdeleri azalmıştır. Wardhono vd., yaptığı çalışmada da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Wardhono vd., 2017). Ayrıca Luhar ve Khandelwal GB ve PÇB üzerinde su emme testi yapmışlardır. Sonuçları kıyasladıklarında UKGB'nin PÇB'ye göre daha az gözenekli yapısı nedeniyle su geçiriminin az olduğunu bildirmişlerdir. Bu sonuca UGH testinden ulaşılabilir. Grafikler incelendiğinde UKGB'lerin geçiş hızları 5000-5500 m/s arasında bulunmuştu. Buna neden olarak UK'nin ince yapısı gösterilmiştir (Luhar ve Khandelwal, 2015). Literatüre benzer olarak lif oranı arttıkça betonun su emme kapasitesi artmıştır (Annadurai vd., 2023). Lifli GB'lerin UGH

sonuçları incelendiğinde buna neden olarak liflerin betonda oluşturduğu boşluklar gösterilebilir.

4.1.7. SEM ve EDS analizi

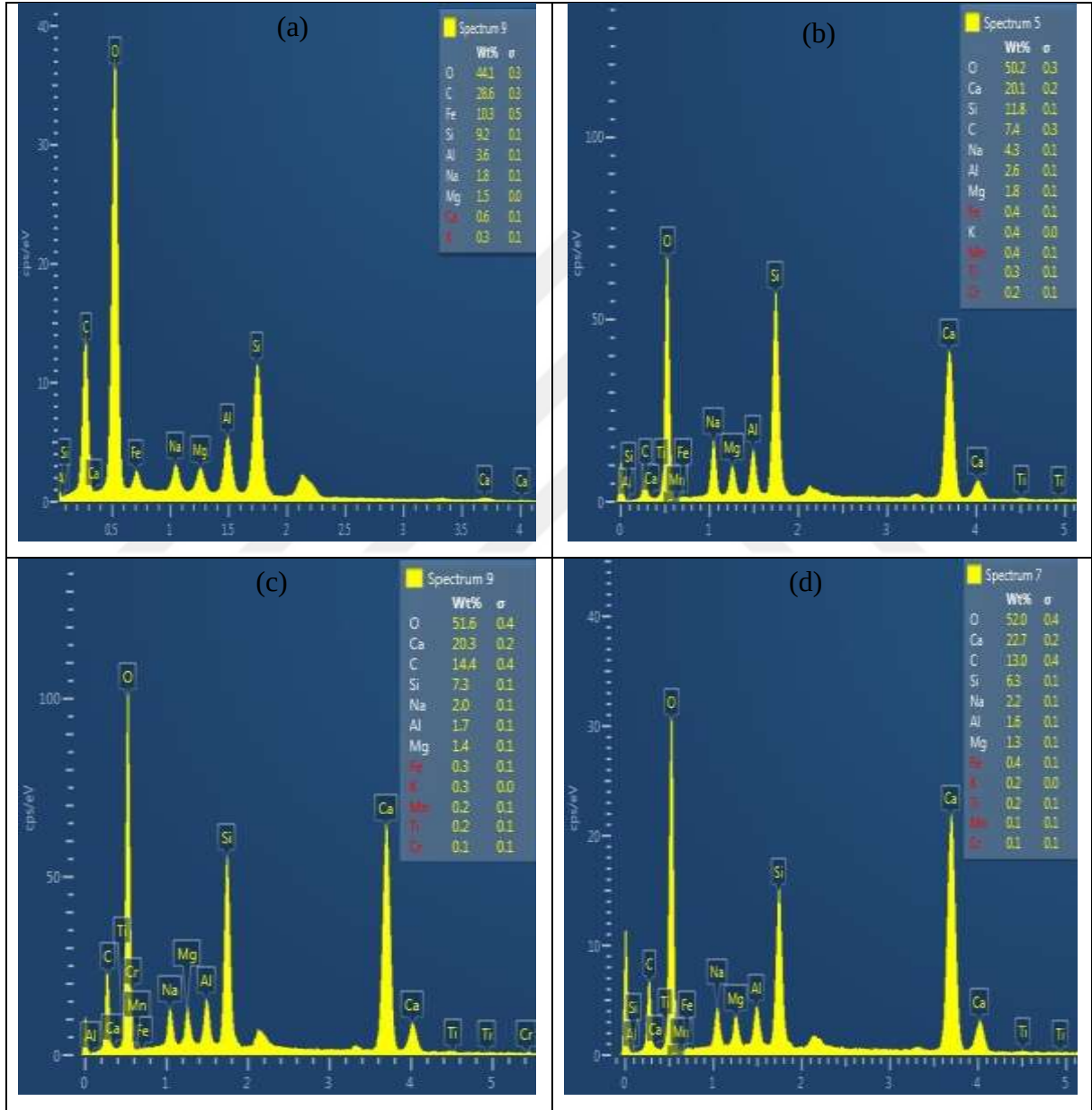
Malzemenin mikro yapısını incelemek için tahribatsız bir yöntem olarak taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağıtıcı spektrometre (EDS) ve X-ışını kırınım (XRD) analizleri yapılabilir. SEM ve EDS, betonun içyapısındaki gözeneklilik değerlendirmeleri yoluyla sertleştirilmiş numunelerin mukavemet gelişim mekanizmasını netleştirmek için kullanılabilecek yöntemlerdir (Ryu vd., 2013b).

Numuneler deney için belirtilen prensiplere göre hazırlanmıştır (Ay, 2017; Doğan ve Bideci, 2016). Farklı oranlarda BL içeren numunelerde lif varlığını anlamak için BL'nin SEM görüntüsü alınmıştır.



Resim 4. 2. Bazalt lif (a), %0,5 BLGB (b), %1 BLGB (c), %2 BLGB (d) numunelerinin SEM görüntüleri

Resim 4.2’de farklı BL oranlarına sahip numunelerin içyapıları görülmektedir. Beton numunelerin SEM görüntüleri, bazalt lifin ve geopolimerizasyon sonucu ortaya çıkan CaCO_3 , C-S-H jellerinin varlığını kanıtlamayı amaçlamıştır. Mikroskop altında incelenen görüntülerde gözlenen nispeten daha sert yapılar CaCO_3 ve jel şeklindeki yapılar ise C-S-H’dir (Bouaissi vd., 2019).



Resim 4. 3. Bazalt lif (a), %0,5 BLGB (b), %1 BLGB (c), %2 BLGB (d) numunelerinin EDS grafikleri

SEM ve EDS analizleri betonun içinde lifin varlığını ve lif ile ortaya çıkan elementleri açıklamak için kullanılan bir yöntemdir. Buradan hareketle ilk olarak BL'nin EDS spektrumu incelendiğinde; O, C, Fe, Si, Al, Na, Mg, Ca ve K element içeriğine sahip olduğu görülmektedir. Buna kıyasla farklı BL içeriğine sahip GB'lerde bu elementlere rastlanıldığında veya elementin ağırlıkça yüzde değerinde artış gözlemlendiği takdirde GB'lerin BL içerdiği söylenebilir. Resim 4.3 (b),(c),(d), incelendiğinde, aynı element içerikleri varlığını korumuş olup yüzde değerlerinde artış tespit edilmiştir. Buna ek olarak Mn, Ti ve Cr element oluşumları gözlemlenmiştir. Bunun nedeni BL'nin alkali difüzyon ile beton matrisindeki farklı yapılarla tepkimesi sonucunda farklı element oluşumları şeklinde açıklanabilir (Welter vd., 2015). Nitekim GB matrisi mineral katkıları ve alkali aktivatör içeriğine sahiptir.

4.2. Ana Deney Bulguları

Her beton (%1 BLGB, %2 BLGB, PÇB) 3'er plak numune içermektedir. Bu yarı-statik mesnetlenmiş plakların üzerine belirli bir yükseklikten ağırlık düşürülerek bir darbe testi yapılmıştır. Bu konuda belirli bir standart bulunmaması nedeniyle deney literatür araştırmalarına dayandırılarak test edilmiştir. Küresel darbe vurucu 3,035 kg ağırlığındadır.

Küresel darbe vurucuda iki darbe yapıldığı için numunenin ilk darbe ve ikinci darbe isimlendirmesi ise harf1-harf2 eklenerek tanımlanmıştır. Örneğin, %1 BLGB-1, %1 BLGB ilk numunesi üzerine düşürülen küresel yük sonrası ilk darbeyi temsil etmektedir. %1 BLGB-2 ise %1 BLGB'nin küresel yük sonrası ikinci darbesini temsil etmektedir.

Burada oluşan kabuk atımı gibi yapılara verilen isimler, Wang vd., yaptığı çalışmada kullandığı terimlere Türkçe karşılık olarak verilmiştir (W. Wang vd., 2022).

4.2.1. Küresel Ağırlık Düşürme Deneyi

Beton kabuk atana kadar iki defa küresel ağırlık düşürülmüştür. İlk darbeye oluşan deplasman incelenmiştir. İkinci darbe de deplasman ölçülemediği olup en önemli bulgu kabuk atım çapları ve derinliği olmuştur. Bu nedenle ikinci darbe simülasyona dahil edilmemiştir.

Resim 4.4, PÇB-1'e düşürülen küresel yük sonrası ilk darbe sonucunda gözlemlenen çatlakları ve Şekil 4.6, numunede oluşan ortalama deplasman değerini göstermektedir.

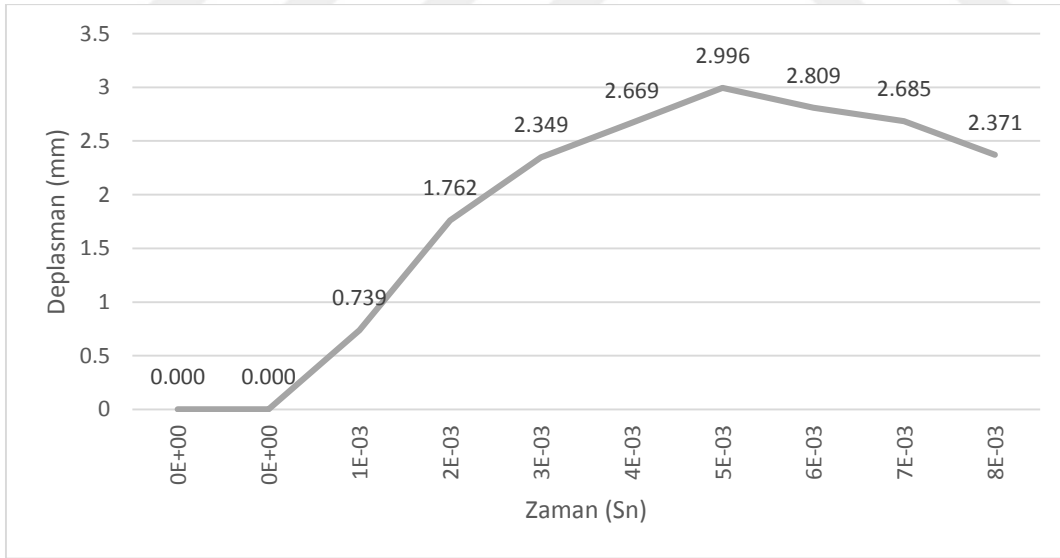


(a)

(b)

Resim 4.4. PÇB-1'in darbe sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeyinde oluşan deformasyon

PÇB numunelerinde, ilk darbe sonrasında oluşan herhangi bir kabuk atımına rastlanılmamış olup sadece çatlak ve deplasman oluşumu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.6. PÇB-1'nin ortalama deneysel deplasman-zaman grafiği

Deney sonucunda oluşan ortalama deplasman değeri 3,00 mm olarak ölçülmüştür.

Resim 4.5, %1 BLGB-1'e düşürülen küresel yük sonrası ilk darbe sonucunda gözlemlenen çatlakları ve Şekil 4.7, numunede oluşan ortalama deplasman değerini göstermektedir.

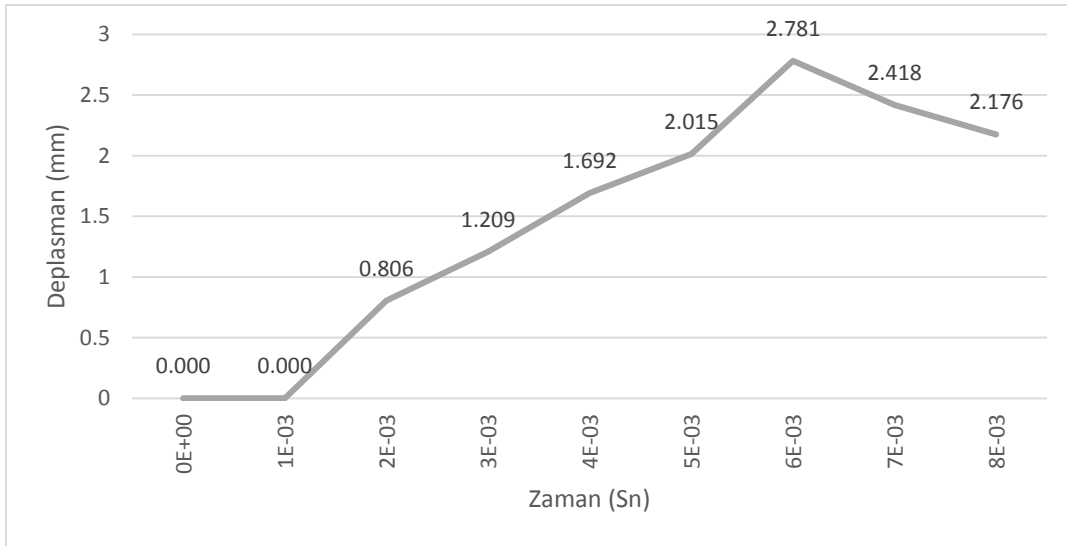


(a)

(b)

Resim 4.5. %1 BLGB-1'nin darbe sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeyinde oluşan deformasyon

%1 BLGB numunelerinde, ilk darbe sonrasında oluşan herhangi bir kabuk atımına rastlanılmamış olup sadece çatlak ve deplasman oluşumu gözlemlenmiştir.



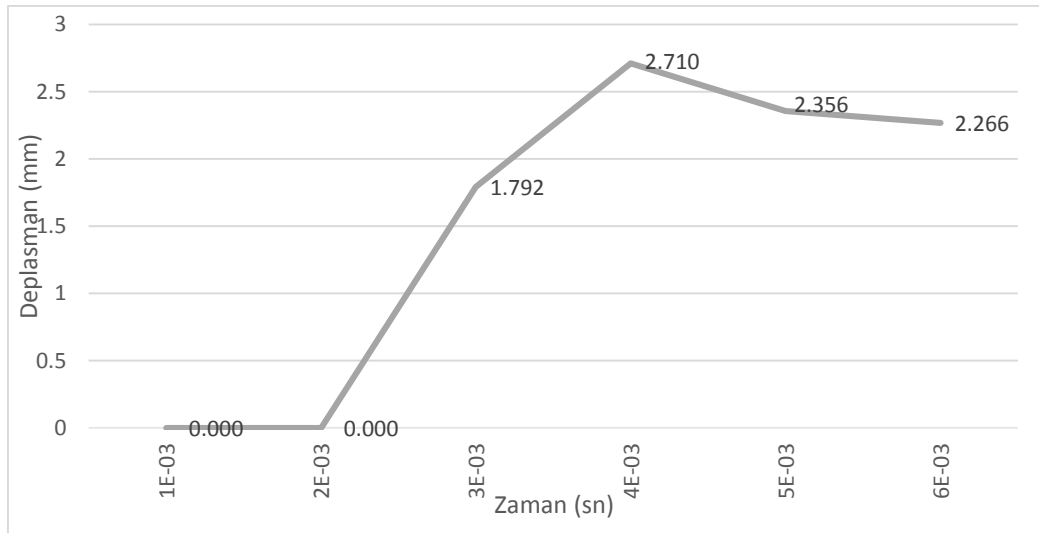
Şekil 4. 7.%1 BLGB-1'nin ortalama deneysel deplasman-zaman grafiği

Deney sonucunda oluşan ortalama deplasman değeri 2,78 mm olarak ölçülmüştür.

Resim 4.6, %2 BLGB-1'ye düşürülen küresel yük sonrası ilk darbe sonucunda gözlemlenen çatlakları ve Şekil 4.8, numunede oluşan ortalama deplasman değerini göstermektedir.

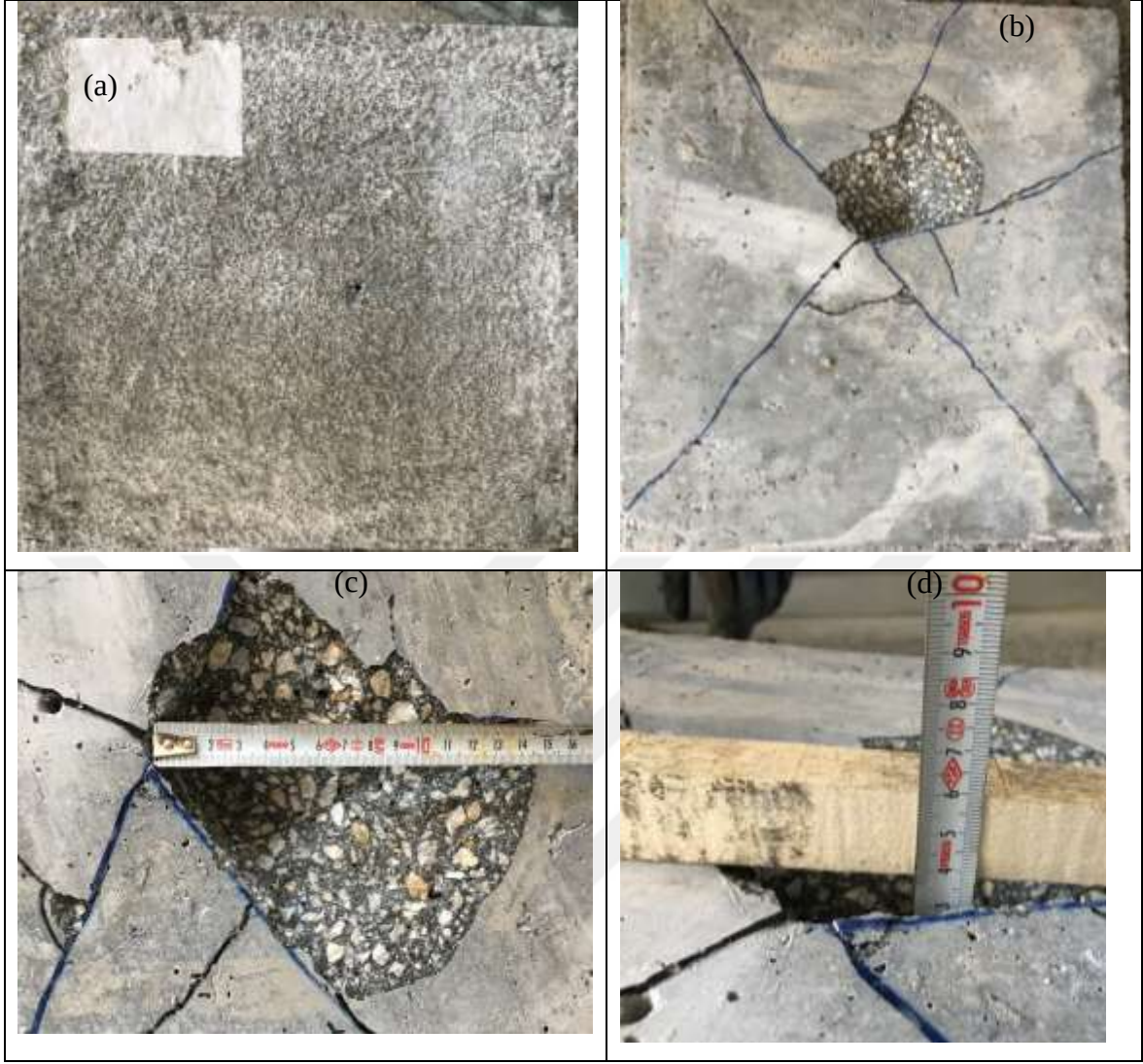


Resim 4.6. %2 BLGB-1'in darbe sonrası ön (a) ve arka (b) yüzeyinde oluşan deformasyon



Şekil 4.8. %2 BLGB-1'in ortalama deneysel deplasman-zaman grafiği

Deney sonucunda oluşan ortalama deplasman değeri 2,71 mm olarak ölçülmüştür.



Resim 4.7. İkinci darbe sonrası PÇB-2'nin ön (a) ve arka (b),(c),(d) tarafında oluşan kabuk atımları

Resim 4.7 (b), (c), (d)'de görüldüğü üzere numunenin ikinci darbe sonrasında arka yüzeyinde oluşan kabuk atım çapları ortalama olarak 138,33 mm olarak ölçülmüştür. Atılan kabuk nedeniyle oluşan derinlik ise ortalama 40 mm'dir. Ön yüzeyde (a) herhangi bir kabul atımı saptanmamıştır.



Resim 4.8. İkinci darbe sonrası %1 BLGB-2 ön (a) ve arka (b), (c), (d) yüzeyinde oluşan kabuk atımları

Resim 4.8 (b), (c), (d)'de görüldüğü üzere numunenin ikinci darbe sonrasında arka yüzeyinde oluşan kabuk atım çapları ortalama olarak 157 mm olarak ölçülmüştür. Atılan kabuk nedeniyle oluşan ortalama derinlik ise 35 mm'dir. Ön yüzeyde (a) herhangi bir kabuk atımı saptanmamıştır.

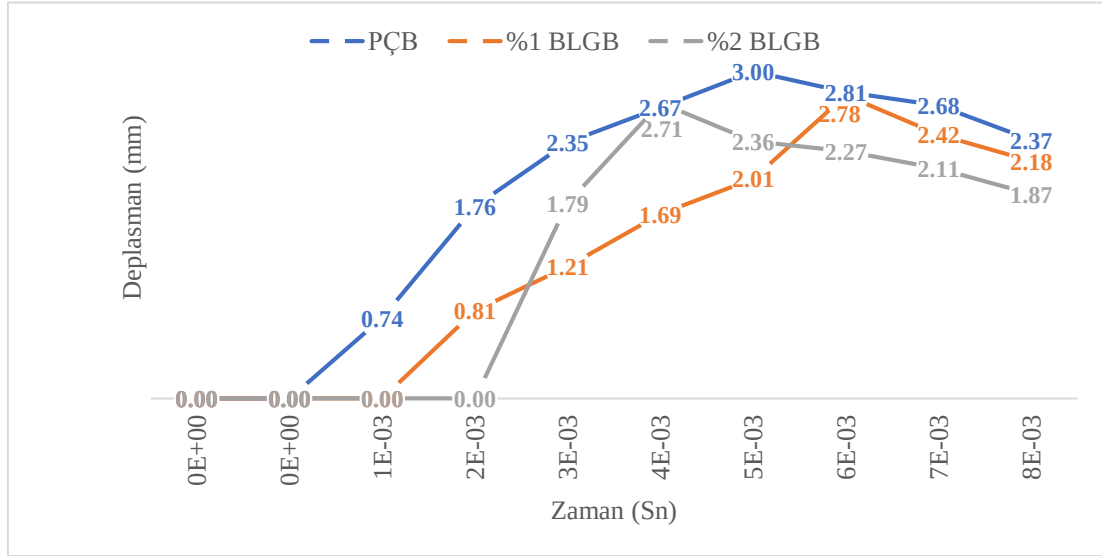


Resim 4.9. İkinci darbe sonrası %2 BLGB-2'nin ön (a) ve arka (b),(c),(d) oluşan kabuk atımları

Resim 4.9 (b), (c), (d)'de görüldüğü üzere numunenin ikinci darbe sonrasında arka yüzeyinde oluşan kabuk atım çapları ortalama olarak 148,33 mm olarak ölçülmüştür. Atılan kabuk nedeniyle oluşan ortalama derinlik ise 33 mm'dir. Ön yüzeyde (a) herhangi bir kabul atımı saptanmamıştır.

Tablo 4.2. Numunelerin ilk darbe sonrasındaki ortalama deplasman değerleri

Numuneler	Ortalama Deplasman(mm)
PÇB	3
%1 BLGB	2,78
%2 BLGB	2,71



Şekil 4. 9. PÇB, %1 BLGB ve %2 BLGB'nin ortalama deplasman-zaman grafikleri

Tablo 4.2. ve Şekil 4.9 incelendiğinde en büyük yer değiştirme ortalama 3,00 mm ile PÇB numunelerinde gözlemlenirken, %2 BLGB'lerde yaklaşık %9,67 oranında daha az deplasman tespit edilmiştir. Bunun nedeni lif varlığı ve miktarı ile açıklanabilir. Çünkü lif oranı arttıkça numunelerin eğilmede çekme dayanımı artmıştır. Eğilmede çekme direnci 7,39 MPa ile en yüksek numune olan %2 BLGB burada ortalama 2,71 mm ile en az deplasman değerini vermiştir. Al Rousan iki yönlü betonarme plaklar üzerine yaptığı çalışmasında, 2,4 m yükseklikten düşürülen 7 kg küresel ağırlık sonucunda farklı lif oranlarındaki 100x100x7 cm boyutlu plaklarda yaklaşık olarak 2 ve 3 mm arasında deplasman değerleri gözlemlenmiştir (Al-Rousan, 2019). Bu sonuçlara göre kıyaslama yapıldığında, bu deneysel çalışmada 4,13 m yükseklikten 500x500x50 cm plaklara 3,035 kg ağırlık sonucunda bulunan deplasman değerleri yaklaşık olarak 2-3 mm arasında deplasman sonucu vermiştir. Al Rousan'ın çalışması incelendiğinde, düşürme yüksekliği arttıkça deplasmanın artması beklenmektedir. Aynı şekilde Bheemaraya ve Chittappa çalışmalarında, 80x80x15 cm boyutlu sandviç plaklar üzerinde yaptıkları ağırlık düşürme deneyi sonucunda plak

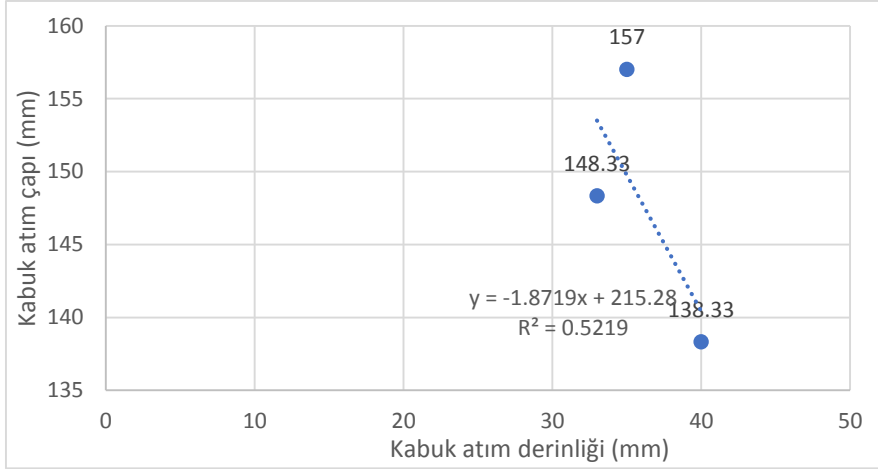
kalınlığının artmasıyla deplasmanın azaldığını bildirmişlerdir (Bheemaraya ve Chittappa, 2022). Buradan Rousan'a göre %72,08 daha yüksekten bırakılan %40 daha az plak kalınlığında yaklaşık aynı deplasmanların bulunması nedeniyle GB'lerin iki yönlü betonarme plaklara kıyasla darbe direnci daha yüksek bulunmuştur. Sohel ve Liew, çelik lifli çelik sandviç plaklarda yaptıkları ağırlık düşürme testi sonucunda plak kalınlığının artmasının eğilme sertliğine ve yük taşıma kapasitesinin artmasına bağlı olarak plakların maksimum saptasında bir azalma saptamışlardır (Sohel ve Liew, 2014). Singh vd., bu deneysel çalışma sonucuyla paralel olarak kendi çalışmalarında yüksek hızlı yüklemelerde GB'nin PÇB'ye kıyasla daha iyi sonuç verdiğini bulmuşlardır (I. Singh vd., 2022).

Tablo 4.3. Numunelerin ortalama basınç, deplasman, kabuk atım derinliği ve çap değerleri

Değerler	%1 BLGB	%2 BLGB	PÇB
Kabuk atım derinliği, mm	35	33	40
Kabuk atım çapı, mm	157	148,33	138,33
Deplasman, mm	2,78	2,71	3,00
Basınç Dayanımı, MPa	60,1	60,4	53

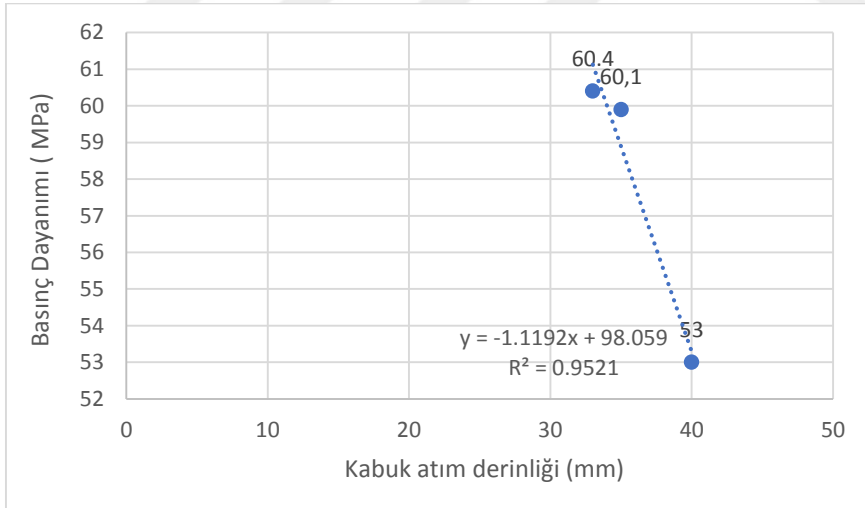
Tablo 4.3 incelendiğinde en büyük deformasyon ortalama 156,67 mm kabuk atım çapıyla %1 BLGB numunelerinde gözlemlenirken yaklaşık %8,51 daha az deformasyon %2 BLGB'lerde tespit edilmiştir. Bunun nedeni yine lif varlığı ve miktarı ile açıklanabilir. En büyük derinlik değeri ortalama 40 mm olarak PÇB'de gözlenmiştir. Değerler kabuk atım çaplarıyla paralellik göstermiştir. %2 BLGB 33 mm ile kabuk atımı sonucunda oluşan en az boşluk derinliğine sahiptir. Deplasman ve kabuk atım derinliğinin %1 BLGB'ye kıyasla sırasıyla %6,06, %2,58 ve PÇB'ye göre sırasıyla %21,21, %10,70 daha düşük olması sebebiyle darbe direnci en yüksek numune %2 BLGB olmuştur. Sonuçlar arasındaki korelasyonlar ile yorum yapılması daha güvenilir sonuçlar oluşturmaktadır. Bu nedenle ilişkili değerler beraber yorumlanmıştır. İlk darbe sonucu oluşan deplasman ve ikinci darbe sonrası oluşan kabuk atım çapları ve derinliği için korelasyonlar bulunmuştur.

Korelasyon grafikleri, veriler arasındaki ilişkiyi açıklamak için Microsoft Excel üzerinde korelasyon fonksiyonu kullanılarak çizilmiştir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere kabuk atım çapı ve derinliği arasında korelasyon katsayısının 0,5219 değerinde olması sebebiyle pek kuvvetli olmayan bir ilişki gözlemlenmiştir.



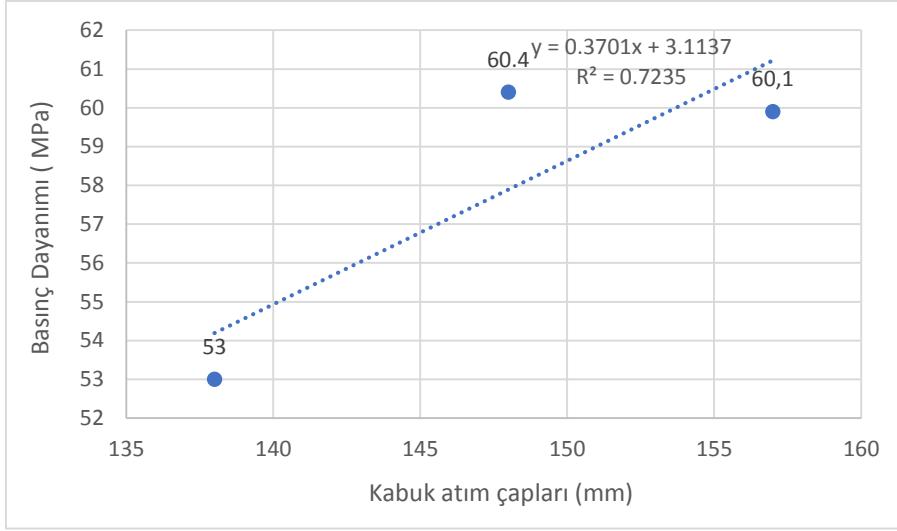
Şekil 4.10. Kabuk atım çapları ve derinliği arasındaki korelasyon

Bundan farklı olarak Şek. 4.11’de, görüldüğü üzere basınç dayanımı ve kabuk atım derinliği arasında orantısal bir uyum olduğu tespit edilmiştir. Korelasyon katsayıları hesaplandığında deplasman ve kabuk atım derinliğinin 0,9521 değerinde bir uyum sergilediği böylece bu iki değişken arasında oldukça kuvvetli bir korelasyon olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü korelasyon katsayısı 1’e yakınlıkla doğru uyum kuvveti artış göstermektedir (Durucasu, 2013).



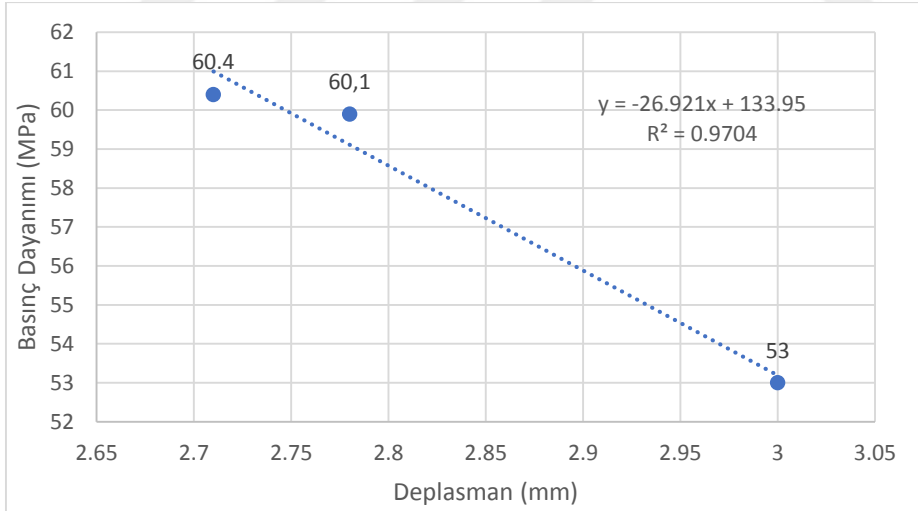
Şekil 4.11. Basınç dayanımı ve kabuk atım derinliği arasındaki korelasyon

Şekil 4.12, incelendiğinde basınç dayanımları ve kabuk atım çapları arasında ne çok kuvvetli ne de daha az düzeyde kuvvetsiz bir ilişki tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. Basma dayanımı ve kabuk atım çapları arasındaki korelasyon

Şek. 4.13'te görüldüğü üzere basma dayanımları ve deplasman değerleri arasında kuvvetli bir korelasyon varlığı tespit edilmiştir. Korelasyon katsayıları hesaplandığında basma dayanımı ve deplasman arasında 0,9704 değerinde bir uyum sergilediği görülmüştür. Buradan, beton kalitesi ne kadar yüksekse malzemenin ani yüklemeler altında yer değiştirme miktarı o kadar azalır sonucuna varılabilir.



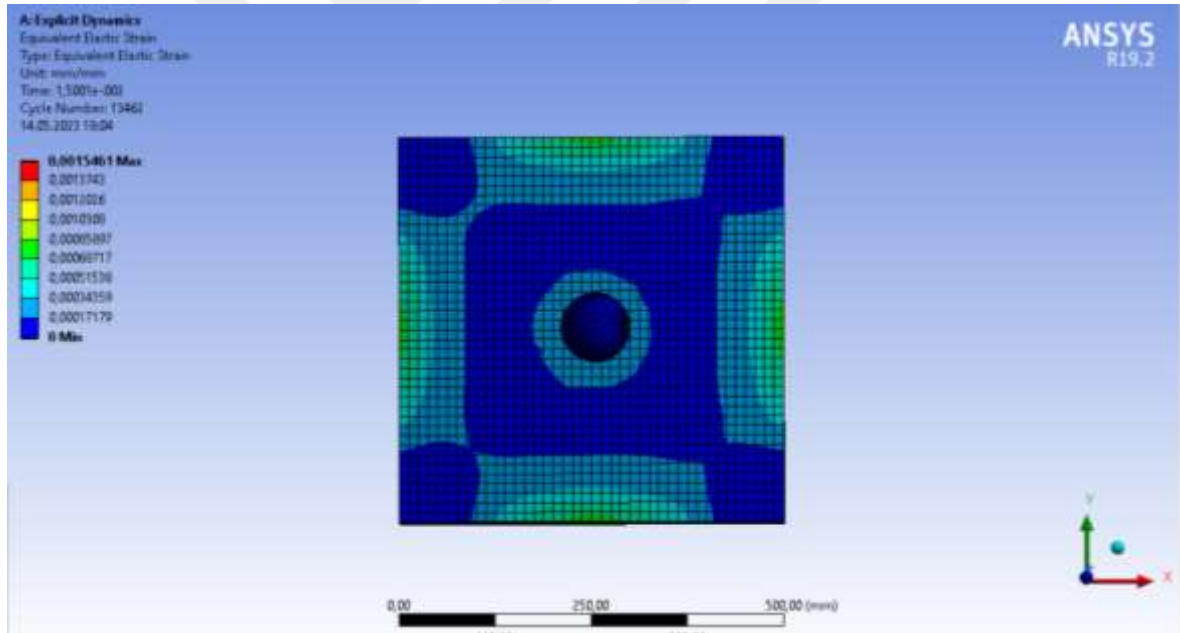
Şekil 4.13. Deplasman ve basma dayanımları arasındaki korelasyon

Son olarak bütün grafikler incelendiğinde, her ne kadar deplasman ve kabuk atım çapı-derinliği arasında direkt olarak bir korelasyon kurulamasa da basma dayanımıyla olan ilişkiler göz önüne alındığında ikincil bir bağlantı bulunarak kıyaslama yapılabilmektedir.

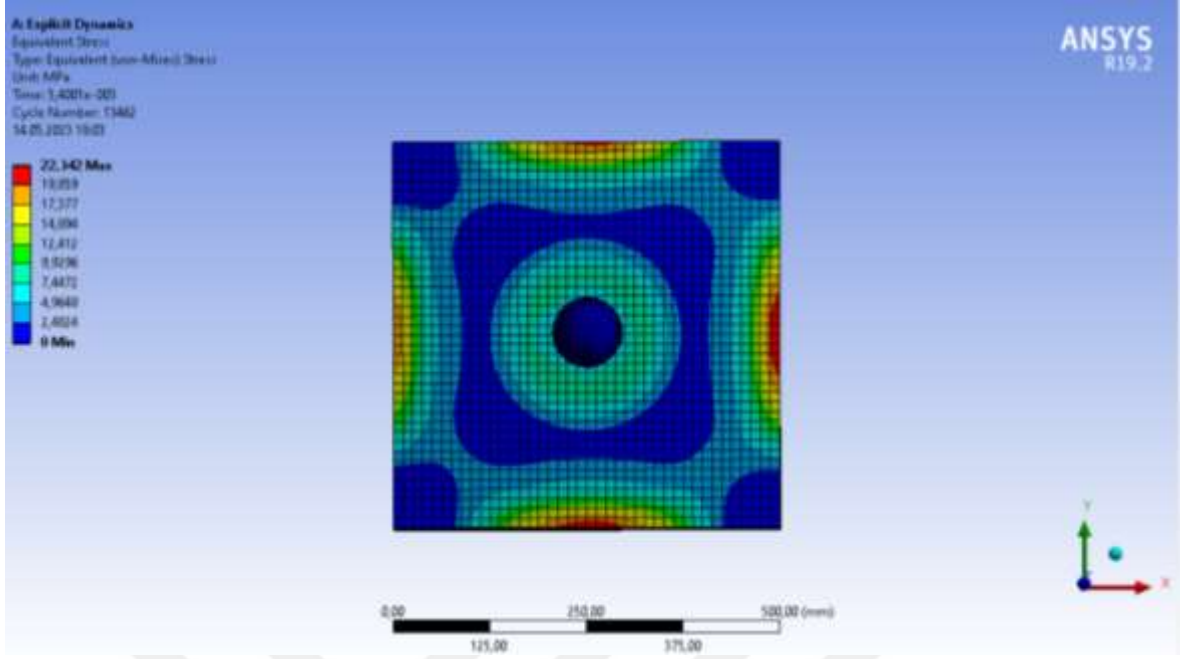
Basınç dayanımı yüksek olan numunenin deplasmanı düşmektedir. Böylece kabuk atım derinliğinin azalması beklenmektedir.

4.3. Modelleme Çalışması

Burada, betonların ilk darbe sonrasında yaptıkları deplasman simüle edilmiştir. Simülasyon ANSYS Workbench yazılımı ile yapılmıştır. Bu başlık, daha önce literatürde aynı malzeme ve deney şartlarında çalışılmadığı için simülasyon bu koşullarda özgün bir değer taşımaktadır. Modellemenin en önemli etkisi deneysel süreçte oluşan maliyet, iş yükü ve iş süresi gibi dezavantajları taşımayarak deneysel verilere yakın değerler vermesidir. Böylece aynı deneysel sürece gerek olmadan analiz ile farklı varyasyonlar altında beton davranışı incelenebilmektedir.



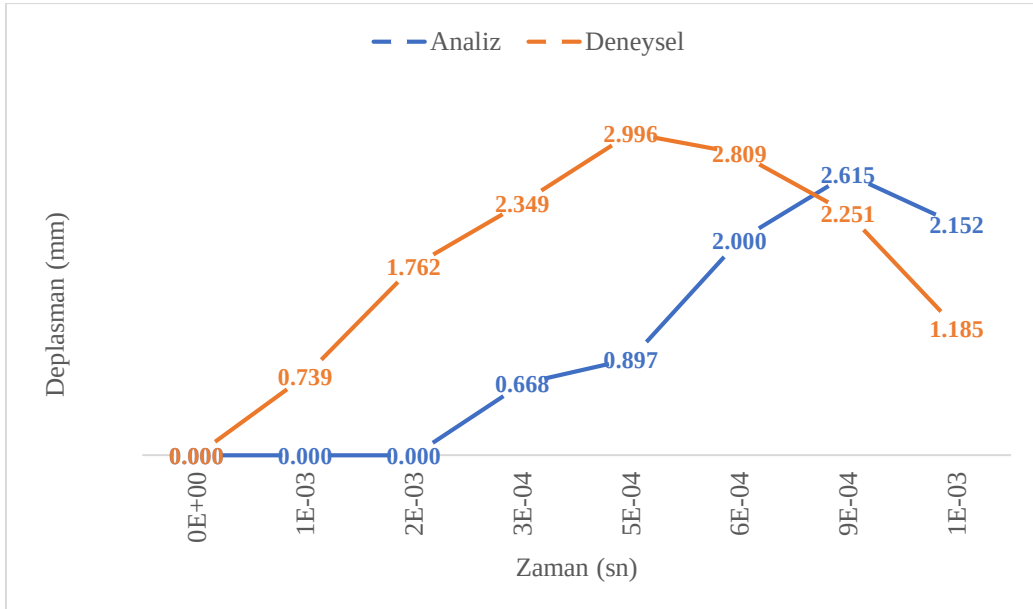
(a)



(b)

Resim 4.10. PÇB’de oluşan (a) elastik şekil değiştirme ve (b) gerilme

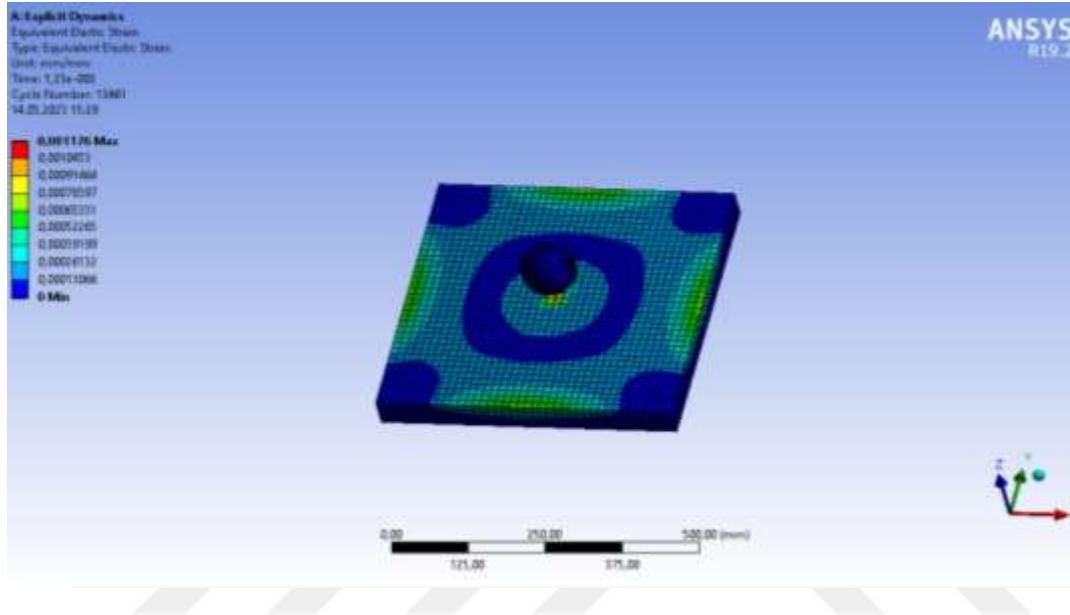
Resim 4.10’da PÇB’de darbe sonrasında oluşan elastik şekil değiştirme ve gerilme hareketleri görülmektedir.



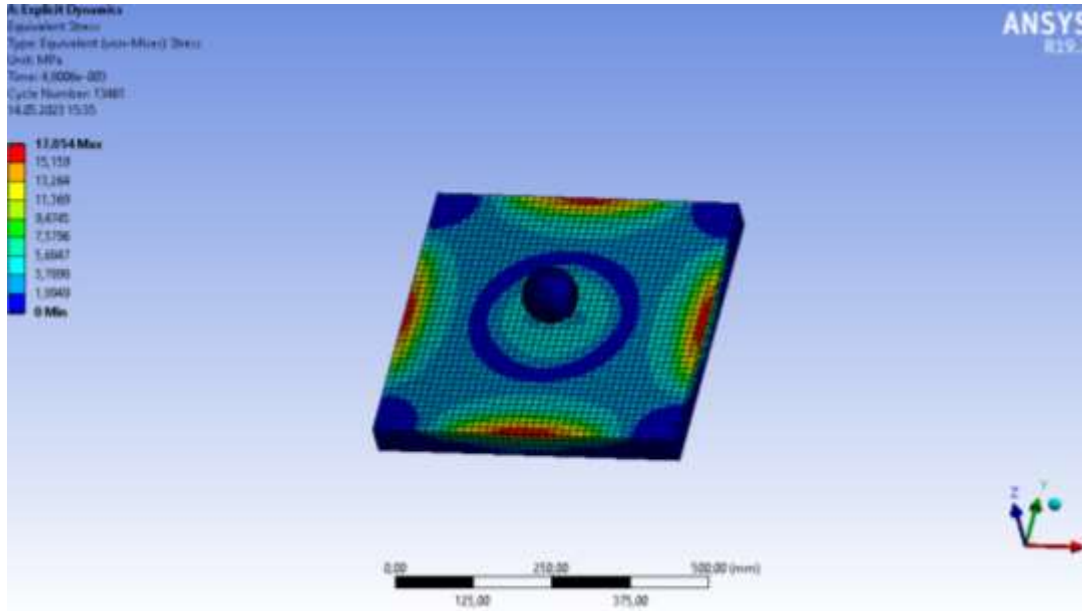
Şekil 4.14. PÇB’nin analiz ve deneysel ortalama deplasman-zaman grafiği

Analiz sonucunda PCB üzerinde oluşan deplasman yaklaşık olarak 2,61 mm'dir. Deneysel verilerde bu değer 3,00 mm olarak ölçülmüştür. Buradan analiz sonucunun deneysel verilere göre %12,99 azalış gösterdiği tespit edilmiştir.

Resim 4.11'de %1 BLGB'de darbe sonrasında oluşan elastik şekil değiştirme ve gerilme hareketleri görülmektedir.

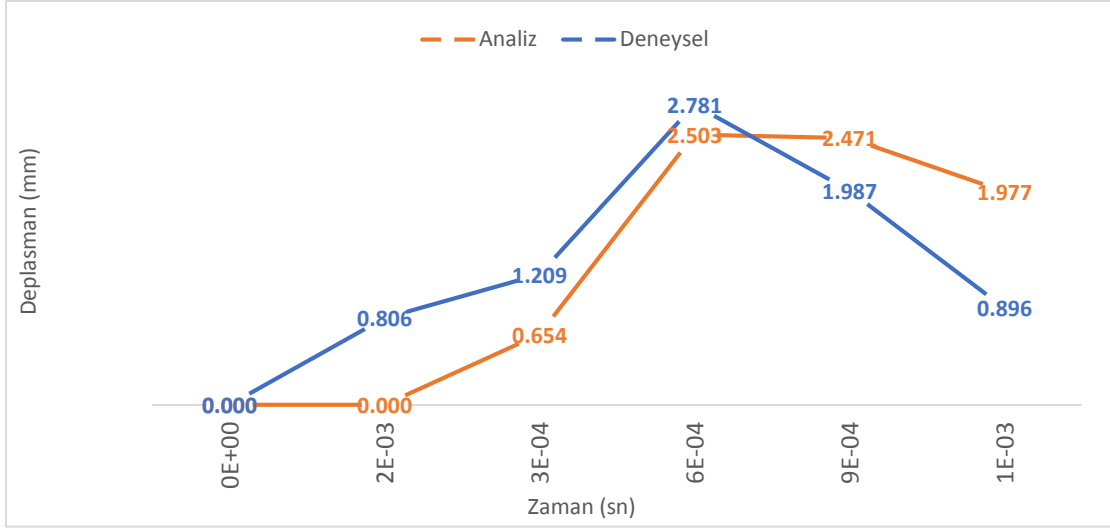


(a)



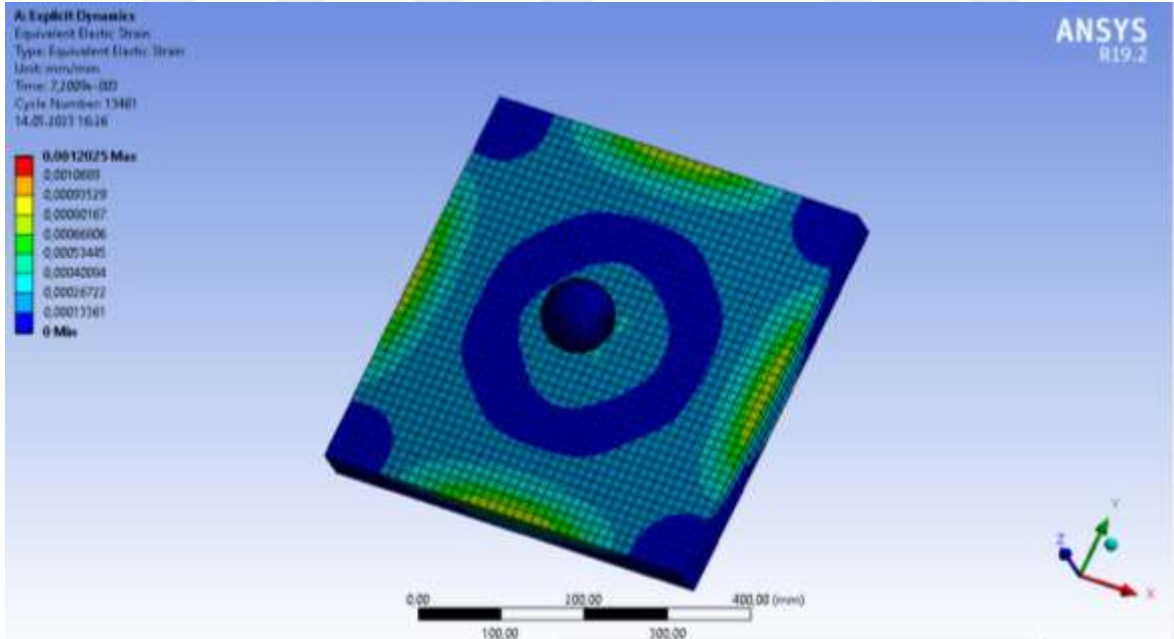
(b)

Resim 4. 11. %1 BLGB'de oluşan (a) elastik şekil değiştirme ve (b) gerilme

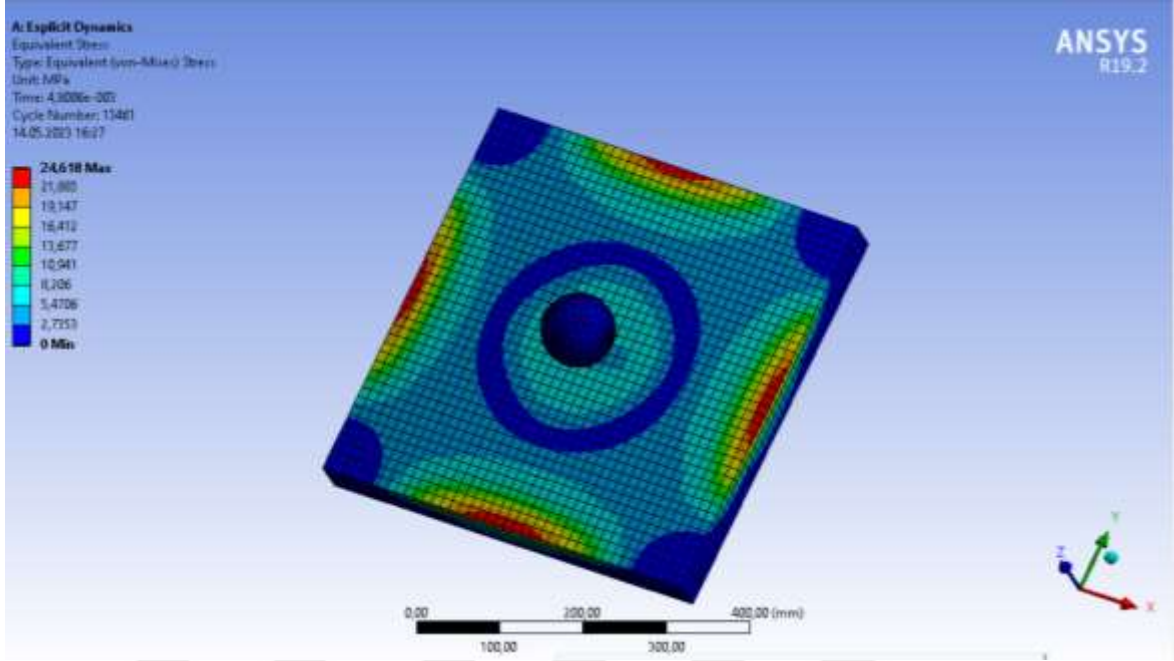


Şekil 4.15. %1 BLGB'nin analiz ve deneysel deplasman-zaman grafiği

Analiz sonucunda %1 BLGB üzerinde oluşan deplasman yaklaşık olarak 2,50 mm'dir. Deneysel verilerde bu değer 2,78 mm olarak ölçülmüştür. Buradan analiz sonucunun deneysel verilere göre %10,07 azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Buradaki fark; deneysel koşullara, analiz girdi verilerinin birebir sonuç verecek düzeyde olmamasından kaynaklanabilmektedir.



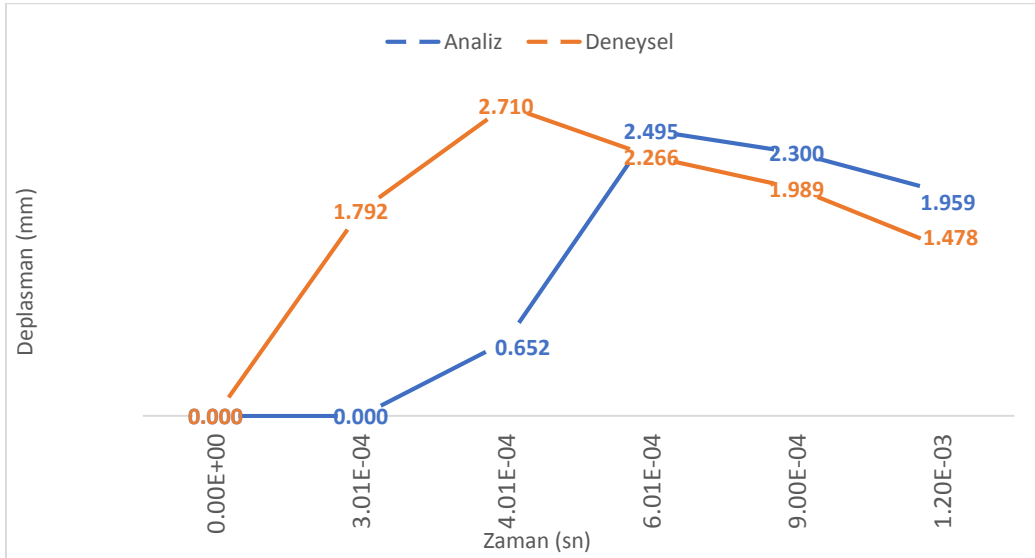
(a)



(b)

Resim 4.12. %2 BLGB’de oluşan (a) elastik şekil değıştirme ve (b) gerilme

Resim 4.12’de %2 BLGB’de darbe sonrasında oluşan elastik şekil değıştirme ve gerilme hareketleri görölmektedir.



Şekil 4.16. %2 BLGB’nin analiz ve deneysel deplasman-zaman grafiğı

Analiz sonucunda %2 BLGB üzerinde oluşan deplasman yaklaşık olarak 2,49 mm’dir. Deneyisel verilerde bu değır 2,71 mm olarak ölçölmüştür. Buradan analiz

sonucunun deneysel verilere göre %8,11 azalış gösterdiği tespit edilmiştir. Buradaki farkın nedeni; deneysel koşullara, analiz girdi verilerinin birebir sonuç verecek düzeyde olmamasından kaynaklanabilmektedir. %1 BLGB'ye kıyasla %1,96 oranında farklarda değişim görülmesinin nedeni deneysel koşullara bağlı olabilir. Çünkü %2,51 azalış farkı analiz yerine deneysel verilerde gözlenmiştir. Grafiklerdeki farklı zamanlarda maksimum deplasmanın nedeni simülasyondaki zaman ayarları sebebiyle açıklanabilir.

Tablo 4.4. Deneysel ve nümerik analiz arasındaki sapma

Numune	Deformasyon miktarları (mm)		
	Deneysel	Nümerik Analiz	Fark (%)
%1 BLGB	2,78	2,50	10,1
%2 BLGB	2,71	2,495	8,0
PÇB	3,00	2,61	13,0

Tablo 4.4. incelendiğinde PÇB'nin deplasmanı lifli GB'lere kıyasla ortalama %8,49 daha fazladır. Darbe direnci, eğilme de çekme dayanımıyla doğrudan ilişkili olduğu için eğilmede çekme dayanımı yüksek olan numuneler darbe direnci yüksek sonuçlar vermektedir. Deney sonuçları incelediğine ortalama 7,295 MPa ile lifli betonlar en yüksek eğilmede çekme dayanımını göstermiştir. Literatürde lif katkılı betonların dayanımı arttırdığı bildirilmiştir (W. Li ve Xu, 2009b). %2 BLGB ise %1 BLGB'ye kıyasla %2,58 daha iyi deplasman direnci göstermiştir. Bunun nedeni de, %2 BLGB'nin %1 BLGB' ye göre %1,21 daha yüksek eğilme dayanımına sahip olması olabilir (Annadurai vd., 2023). Son olarak, SEY kullanılarak yapılan analiz sonucunda oluşan deplasman değerleri, literatüre benzer olarak deneysel değerlere %89,63 oranında yakın sonuç vermiştir. Uma ve ark., yaptıkları çalışmada ANSYS verileri ile deneysel veriler arasında %20 fark saptanmıştır. Buna neden olarak GB'nin rijit yapısı gösterilmiştir (Uma, 2012). Khan vd, cam lifli betonların ve bazalt elyaf sarılı betonarme yapıların darbe altındaki davranışlarını incelemiştir. Deneysel verileri ANSYS ile simüle ederek kıyas yapmışlardır. Sonuçta deneysel veriler simülasyonla örtüşük sonuçlar vermiştir (Al-Rousan, 2019; Khan vd., 2018; Vacev vd., 2023).

Yapılan çalışmadan, sonlu elemanlar analizinin, betonların darbe yükü altındaki davranışlarını doğru bir şekilde belirlemek için kullanılabilecek en iyi araçlardan biri olduğu sonucuna varılmıştır. Tasarım aşamasında oluşan deformasyon, deneysel çalışmalara yol

göstermektedir. SEY ile tasarımı yapılan yapısal elemanı analiz ederek deney aşamasında maliyet ve zamandan tasarruf edilebilmektedir (Sajith ve Pal, 2023).



5. SONUÇLAR

Çalışma boyunca GB'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri ve bu doğrultuda çarpma etkisi altındaki davranış incelenmiştir. Derlenen bütün araştırmalar sonucunda varılan sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

❖ Geopolimer betona %10 oranında SD katılarak 60 MPa ile en yüksek basınç ve 7,19MPa ile diğer karışım oranlarına kıyasla en yüksek eğilme değeri bulunmuştur.

❖ Geopolimer betonların PÇB'ye kıyasla %0,5 BL katkısında %1,21, %1 BL katkısında %0,95, %2 BL katkısında %0,73 oranlarında daha yüksek donma-çözünme direncine sahip olduğu bulunmuştur. Lif oranı arttıkça direnç ortalama %0,35 düşmüştür.

❖ Bazalt lifin %1 oranına kadar ilave edilmesiyle ultrases geçiş hızı %0,32 oranında artış göstermiş fakat bazalt lif %2 oranında ilave edildiğinde %0,61 oranında azalım göstermiştir.

❖ Geopolimer betonların PÇB'ye kıyasla %0,5 BL katkısında %13,01, %1 BL katkısında %13,39, %2 BL katkısında %13,96 oranlarında daha yüksek basınç dayanıma sahip olduğu bulunmuştur.

❖ Geopolimer betonların PÇB'ye kıyasla %0,5 BL katkısında %14,15, %1 BL katkısında %14,58 , %2 BL katkısında %17,10 oranlarında daha yüksek eğilme dayanıma sahip olduğu bulunmuştur.

❖ Küresel ağırlık düşürme sonucunda, deplasman ve kabuk atım derinliğinin %1 BLGB'ye kıyasla sırasıyla %6,06, %2,58 ve PÇB'ye göre sırasıyla %21,21, %10,70 daha düşük olması sebebiyle darbe direnci en yüksek numune %2 BLGB olmuştur.

❖ ANSYS modelleme ile alınan deplasman ve deneysel verilerinin %89,63 oranında benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan bu tez çalışması ile bazalt lif katkılı geopolimer betonun darbe direncinin PÇB'ye alternatif olması ve deneysel çalışmanın nümerik analiz ile kıyaslanarak yaklaşık değerlerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonuçta veriler incelendiğinde tez amacına ulaşılmış olup gelecekteki çalışmalara öncülük edeceği öngörülmektedir.

❖ Sonraki çalışmalar için, akademik çalışmalarla kıyaslama yapabilmek için referans alınan çalışmada uygulanmış olan test tekniğinin kullanılması daha uygun sonuçlar verebilir.

❖ Aynı zamanda geopolimer betona yapılan takviyeler dışında dayanımı güçlendirmek için darbe sönümleyici malzemeler kullanılabilir.

❖ Lif etkisini daha iyi anlamak için kontrol betonuna lif ilave edilerek kıyaslama yapılabilir.

Teşekkür

Bu tez Munzur Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası YLMUB021_09. Mineral katkıları; Cenal Elektrik AŞ, Antalya EtiKrom AŞ., Mersin Oyak Çimento; Bazalt Lif; Kompozit Pazarı, Akışkanlaştırıcı katkı: Polisan Kimya tarafından ücretsiz olarak temin edilmiştir.



6. KAYNAKLAR

- Abhilash, P., Sashidhar, C., Ramana Reddy, I. V.** 2016. "Strength properties of fly ash and GGBS based geo-polymer concrete". *International Journal of ChemTech Research*, 9(3), 350–356.
- Abubakr, A. E., Soliman, A. M., Diab, S. H.** 2020. "Effect of activator nature on the impact behaviour of Alkali-Activated slag mortar". *Construction and Building Materials*, 257, 119531.
- ACI 408.** 2003. "ACI 408R-03 Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension". American Concrete Institute, 1–49. Tarihinde adresinden erişildi <https://scholar.google.com/scholar?q=ACI 408R-03. Bond and development of straight reinforcing bars in tension>.
- Ahmad, J., Yu, T., Hadi, M. N. S.** 2021. "Basalt Fiber-Reinforced Polymer-Confined Geopolymer Concrete.". *ACI Structural*, 118(1), 289–300.
- Ahmed, H. U., Mohammed, A. A., Mohammed, A.** 2022. "Soft computing models to predict the compressive strength of GGBS/FAgeopolymer concrete". *PLoS ONE*, 17(5), 1–28.
- Ajansı, ihlas haber.** 2017. "Emniyetin Beton Bariyerlerine Çarpan Sürücü Yaralandı". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.trthaber.com/haber/turkiye/freni-patlayan-kamyonet-emniyetin-bariyerlerine-carpti-295042.html>
- Al-Hadithi, A. I., Aziz, K. I., Al-Dulaim, M. T. N.** 2014. "Behavior of ferro-cement slabs modified by polymer under low velocity impact". İçinde *Advanced Materials Research* (C. 925, ss. 3–7). Trans Tech Publications.
- Al-Rousan, R.** 2019. "Behavior of two-way slabs subjected to drop-weight". *Magazine of Civil Engineering*, 90(6), 62–71.
- Al-Tayeb, M. M., Bakar, B. H. A., Ismail, H., Akil, H. M.** 2012. "Impact Resistance of Concrete with Partial Replacements of Sand and Cement by Waste Rubber". *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 51(12), 1230–1236.
- AlAraza, H. A. A., Mahmud, K.** 2022. "A parametric study of concrete runway pavement layers depression under impact load". *Vestnik MGSU*, (9), 1206–1217.
- Aleem, A., Arumairaj, P. D.** 2016. "Analytical Modeling of Geopolymer Concrete With Manufactured Sand Using Ansys". *International Journal of Advanced Engineering Technology Int J Adv Engg Tech*, VII(Ii), 1253–1255. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.researchgate.net/publication/304604233>
- Aleem, M. A., Arumairaj, P. D.** 2012. "Optimum mix for the geopolymer concrete". *Indian Journal of Science and Technology*, 5(3), 2299–2301.
- Aleem, M. I. A., Arumairaj, P. D.** 2012. "Geopolymer concrete- a review". *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies* (C. 1).

- Alexander, A. E., Shashikala, A. P.** 2022. "Studies on the microstructure and durability characteristics of ambient cured FA-GGBS based geopolymer mortar". *Construction and Building Materials*, 347.
- Algin, Z., Ozen, M.** 2018. "The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete". *Construction and Building Materials*, 186, 678–685.
- Ali, A., Nidhin, J. T., Parappattu, B.** 2016. "Geopolymer As Repair Material -a Review". *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, 09(3), 2349–2763.
- Ali, S., Sheikh, M. N., N. S. Hadi, M.** 2021. "Behavior of axially loaded plain and fiber-reinforced geopolymer concrete columns with glass fiber-reinforced polymer cages". *Structural Concrete*, 22(3), 1800–1816.
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., Zeyad, A. M.** 2021. "Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review". *Case Studies in Construction Materials*, 15.
- Alomayri, T.** 2021. "Performance evaluation of basalt fiber-reinforced geopolymer composites with various contents of nano CaCO₃". *Ceramics International*, 47(21), 29949–29959.
- Alsadey, S.** 2012. "Influence of Superplasticizer on Strength of Concrete". *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 1(3), 164–166.
- Amran, M., Al-Fakih, A., Chu, S. H., Fediuk, R., Haruna, S., Azevedo, A., Vatin, N.** 2021. "Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review". *Case Studies in Construction Materials*, 15(July), e00661.
- Amran, Y. H. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., El-Zeadani, M.** 2020, Nisan 1. "Clean production and properties of geopolymer concrete; A review". *Journal of Cleaner Production*. Elsevier.
- Annadurai, S., Baskar, P., Elango, K. S.** 2023. "Geopolymer concrete reinforced with basalt fibres: An experimental investigation". *Materials Today: Proceedings*.
- Anon.** 2018. "Corrossive Drinking Water". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.water-research.net/index.php/drinking-water-issues-corrosive-water-lead-copper-aluminum-zinc-and-more>
- Anuradha, R., Thirumala, R., John, P. N.** 2014. "Optimization of molarity on workable self-compacting geopolymer concrete and strength study on SCGC by replacing fly ash with silica fume and GGBFS". *Int. J. Adv. Struct. Geotech. Eng* 3.1, 11–18.
- Application Note.** 2001. "Non-Contact Ultrasound PLASTICS, RUBBER AND FOAM ANALYSIS ANALYSIS Application Note AN-305-2 SecondWave™ M510 Ultrasonic Analysis System", 3–8.
- Argyris, J. H., Kelsey, S.** 1960. "*Energy Theorems and Structural Analysis*". *Energy Theorems and Structural Analysis*. Springer US.

- ASTM C-618-03.** 2010. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete". Annual Book of ASTM Standards, 04(C), 3–6. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.astm.org/c0618-08.html>
- ASTM C 39/C 39M .Test, C. C., Drilled, T., Test, C. C., Statements, B.** 2014. "ASTM C 39/C 39M – 01. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", 3–9.
- ASTM C597.** 2016a. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA. Tarihinde adresinden erişildi https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=ASTM.+%012002b%02.+“Standard+test+method+for+pulse+velocity+through+con%02crete.”+Annual+book+of+American+Society+of+Testing+and+Materials%2C+ASTM+C+597–02%2C+Vol.+04–02%2C+West+Conshohocken%2C+Pa
- ASTM C597.** 2016b. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, USA. Tarihinde adresinden erişildi [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Standard test method for pulse velocity through concrete&publication_year=2016&author=ASTM C597–16%2C](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Standard+test+method+for+pulse+velocity+through+concrete&publication_year=2016&author=ASTM+C597–16%2C)
- Astm C666/C666M.** 2003. "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing". ASTM International, West Conshohocken, PA, 03(Reapproved), 1–6.
- ASTM C923/C293M.,** 2002). 2002. "ASTM Standards C 293-02". Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), 1–3. Tarihinde adresinden erişildi <https://normanray.files.wordpress.com/2010/10/kuliah-7-c293.pdf>
- B. N. Sangeetha.** 2015. "Effect of Rice Husk Ash and GGBS on Performance of Concrete". International Journal of Engineering Research and, V4(12).
- Bajpai, R., Soni, V., Shrivastava, A., Ghosh, D.** 2023. "Experimental investigation on paver blocks of fly ash-based geopolymer concrete containing silica fume". Road Materials and Pavement Design, 24(1), 138–155.
- Baradan, Bülent Serdar, Aydın Yazıcı, H.** 2012. "Beton". İzmir.
- Basheer, B., Antherjanam, G.** 2020. "Effect of Silica Fume in the Mechanical Properties of Ambient Cured GGBS Based Geopolymer Concrete". *Lecture Notes in Civil Engineering* (C. 46). Springer International Publishing.
- Bhanja, S., Sengupta, B.** 2005. "Influence of silica fume on the tensile strength of concrete". Cement and Concrete Research, 35(4), 743–747.
- Bheemaraya, Chittappa, H. C.** 2022. "Impact analysis of spiral cellular structured hybrid sandwiched panel using ANSYS explicit dynamics". Materials Today: Proceedings.

- Bilim, C.** 2011. "Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material". *Construction and Building Materials*, 25(8), 3175–3180.
- Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N., Ramezaniapour, A. A.** 2011. "Engineering properties of alkali-activated natural pozzolan concrete". *ACI Materials Journal*, 108(1), 64–72.
- Borrvall, T., Riedel, W.** 2011. "The RHT concrete model in LS-DYNA". İçinde *8 th European LS-DYNA Users Conference*. Strasbourg. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.dynamore.it/de/download/papers/konferenz11/papers/session12-paper1.pdf>
- Bouaissi, A., Li, L. Yuan, Al Bakri Abdullah, M. M., Bui, Q. B.** 2019. "Mechanical properties and microstructure analysis of FA-GGBS-HMNS based geopolymer concrete". *Construction and Building Materials*, 210, 198–209.
- Brik, V. B.** 2003. "Advanced Concept Concrete Using Basalt Fiber / BF Composite Rebar Reinforcement". *Report*. Tarihinde adresinden erişildi https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highway/NCHRP86_Final_Report.pdf
- Brik, V. B.** 1999. "Performance evaluation of basalt fibers and composite rebars as concrete reinforcement". Tech Res Report submitted to NCHRP-IDEA, Project, 45, 1999. Tarihinde adresinden erişildi <https://scholar.google.com/scholar?q=Brik VB. Performance evaluation of basalt fibers and composite rebars as concrete reinforcement. Tech Res Report submitted to NCHRP-IDEA Project 45; 1999.>
- Cai, H., Liu, X.** 1998. "Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores". *Cement and Concrete Research*, 28(9), 1281–1287.
- Caijun Shi, Della Roy, P. K.** 2006. "Alkali-Activated Cements and Concretes". Tarihinde 19 Mart 2021, adresinden erişildi https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=K0NZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Caijun+Shi,+P.V.K.,+Della+Roy,+Alkali-Activated+Cements+and+Concretes,+2006,+p.245-256&ots=oQH7D7quCL&sig=rqAXwrmSnEIdkIOWphyGa0EjR1E&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Castel, A., Foster, S. J.** 2015. "Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement". *Cement and Concrete Research*, 72, 48–53.
- Cecel, R. T., Abrão, P. C. R. A., Cardoso, F. A., John, V. M.** 2019. "Consumption of superplasticizer admixture for different cements and their binder efficiency". *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 12(6), 1260–1287.
- Chithambar, G. A., Muthukannan, M.** 2019. "Investigation on the glass fiber reinforced geopolymer concrete made of M-sand". *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES* (C. 6). Tarihinde adresinden erişildi <https://revue.ummto.dz/index.php/JMES/article/view/2027>

- Cihangir, S.** 2022. "Hasır Çelik İçin Pratik Bilgiler". Tarihinde 02 Ekim 2022, adresinden erişildi <http://www.serbestcihangir.com/hasir-celik-icin-pratik-bilgiler/>
- Çitoğlu, S. G., Bayraktar, O. Y., Çağlar, A., Çağlar, H.** 2017. "Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Beton Basınç Dayanımına Etkileri". İçinde *1st International Turkish World Engineering and Science Congress* (s. 85). Antalya.
- Çivici, F.** 2006. "Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu". Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 183–188.
- Collins, F., Sanjayan, J. G.** 1999. "Effects of ultra-fine materials on workability and strength of concrete containing alkali-activated slag as the binder". *Cement and Concrete Research*, 29(3), 459–462.
- Courant, R.** 1943. "Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations". *Bulletin of the American Mathematical Society*.
- Cui, Y., Gao, K., Zhang, P.** 2020. "Experimental and Statistical Study on Mechanical Characteristics of Geopolymer Concrete". *Nature*.
- Curie, J., Curie, P.** 1880. "Development by Pressure of Polar Electricity in Hemihedral Crystals with Inclined Faces". *Bulletin de la Société minéralogique de France*, 3(4), 90–93. Tarihinde adresinden erişildi https://www.persee.fr/doc/bulmi_0150-9640_1880_num_3_4_1564
- D. Suresh, K. N.** 2015. "Ground Granulated Blast Slag (GGBS) In Concrete - A Review". *International Journal of Advanced Engineering Technology E- Int J Adv Engg Tech V/Issue VI*, 12(4), 76–82.
- Dana, H. Z.** y.y. "What is concrete? | Components, Types and Applications — In Simple Language". Tarihinde 02 Ekim 2022, adresinden erişildi <https://blog.faradars.org/بئن-چیست/>
- Das, S. K., Mishra, J., Mustakim, S. M.** 2018. "An Overview of Current Research Trends in Geopolymer Concrete". *International Research Journal of Engineering and Technology*, 376–381. Tarihinde adresinden erişildi www.irjet.net
- Davidovits, J.** 1991. "Geopolymers - Inorganic polymeric new materials". *Journal of Thermal Analysis*, 37(8), 1633–1656.
- Davidovits, J.** 2010. "What Is a Geopolymer?". İçinde *Institute Geopolymere, Saint-Quentin, France*. Tarihinde adresinden erişildi https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=Davidovits+J+%282010%29+What+Is+a+Geopolymer%3F+Introduction.+Institut+Géopolymère%2C+Saint-Quentin%2C+France.+Accessed+on+January+29+at+http%3A%2F%2Fwww.geopolymer.org%2Fscience%2Fintroduction.&b
- Davidovits, J.** 1988. "Geopolymer chemistry and properties". *Geopolymer*, 88(1), 25–48.

- Davidovits, Joseph.** 1999. "Chemistry of geopolymeric systems, terminology". *Geopolymer*, 99(292), 9–39.
- Davidovits, Joseph.** 1988. "Soft Mineralurgy and Geopolymers". *Geopolymer* 1988, 1(June 1982), 19–23. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.researchgate.net/publication/328783506>
- Davidovits, Joseph.** 1994. "Properties of Geopolymer Cements". First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 131–149. Tarihinde adresinden erişildi www.geopolymer.org
- Davidovits, Joseph.** 2011. "*Geopolymer chemistry and applications / Joseph Davidovits.*". Tarihinde adresinden erişildi <http://login.ezproxy.library.ualberta.ca/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cacat03710a&AN=alb.6700595&site=eds-live&scope=site>
- Davidovits, Joseph, Buzzi, L., Rocher, P., Gimeno, D., Marini, C., Tocco, S.** 1999. "Geopolymeric cement based on low cost geologic materials. Results from the european research project geocistem". *Géopolymère '99 Proceedings*, 2(June), 83–96. Tarihinde adresinden erişildi <https://scholar.google.com/scholar?q=Davidovits J, Buzzi L, Rocher P, Marini DGC, Tocco S. Geopolymeric cement based on low cost geologic materials geocistem. In: second international conference geopolymer 99, France; 1999.>
- Davidovits, Joseph, Comrie, D.** 1988. "Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals". 1st European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France, 1, 125–134. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.researchgate.net/publication/312970236>
- Davidovits, P. J.** 2002. "30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications . Market Trends and Potential Breakthroughs .". *Geopolymer 2002 Conference*, 1–16. Tarihinde adresinden erişildi www.geopolymer.org
- Davies, G. A. O., Olsson, R.** 2004. "Impact on composite structures". *Aeronautical Journal*, 108(1089), 541–563.
- Deb, P. S., Nath, P., Sarker, P. K.** 2014. "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature". *Materials and Design*, 62, 32–39.
- Di Ludovico, M., Prota, A., Manfredi, G.** 2010. "Structural upgrade using basalt fibers for concrete confinement". *Journal of composites for construction*, 14(5), 541–552.
- Dias, D.** 1999. "Avaliação da Tenacidade à Fratura em Cimentos Especiais à Base de Aluminossilicatos Polimerizados Reforçados por Fibras de Rochas Ígneas". *Içinde 5th Conferência Brasileira em Cimento (CBC)*. Sao Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).
- Dias, D. P., Thaumaturgo, C.** 2005. "Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers". *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 49–54.

- Diaz-Loya, E. I., Allouche, E. N., Vaidya, S.** 2011. "Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete". *ACI Materials Journal*, 108(3), 300–306.
- Dimas, D., Giannopoulou, I., Panias, D.** 2009. "Polymerization in sodium silicate solutions: A fundamental process in geopolymerization technology". *Journal of Materials Science*, 44(14), 3719–3730.
- Domone, P.** 1998. "The slump flow test for high-workability concrete". *Cement and Concrete Research*, 28(2), 177–182.
- Dong, Z., Bouaissi, A., Wang, X., Huang, Y., Li, L.-Y., Abdullah, M., Ramasamy, S.** 2019. "Dynamic Behaviors of FA- GGBS- HMNS Based Geopolymer Paste When Subjected to Impact Compressive Loadings".
- Doğan, M., Bideci, A.** 2016. "Effect of Styrene Butadiene Copolymer (SBR) admixture on high strength concrete". *Construction and Building Materials*, 112, 378–385.
- Durucasu, H. Ş. & A. Ö.** 2013. "Regresyon ve Korelasyon Analizi". *İstatistik II - AÖF*.
- Dutta, D., Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S.** 2010. "Effect of silica fume additions on porosity of fly ash geopolymers". *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 5(10), 74–79. Tarihinde adresinden erişildi <https://www.academia.edu/download/31221857/doaj.pdf>
- Duxson, P., Provis, J. L.** 2008. "Designing precursors for geopolymer cements". *Journal of the American Ceramic Society*, 91(12), 3864–3869.
- El-Gelani, A. M., High, C. M., Rizkalla, S. H., Abdalla, E. A.** 2018. "Effects of Basalt Fibres on Mechanical Properties of Concrete". *MATEC Web of Conferences*, 149, 01028.
- El Hafid, K., Hajjaji, M., El Hafid, H.** 2017. "Influence of NaOH concentration on microstructure and properties of cured alkali-activated calcined clay". *Journal of Building Engineering*, 11, 158–165.
- Embong, R., Kusbiantoro, A., Shafiq, N., Nuruddin, M. F.** 2016. "Strength and microstructural properties of fly ash based geopolymer concrete containing high-calcium and water-absorptive aggregate". *Journal of Cleaner Production*, 112, 816–822.
- TS-EN/12350-2.** Beton-taze beton deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi. Türk Standartları Enstitüsü. 2010.
- Engin, Y.** 2014. "Çimento Üretiminde Kullanılan Mineral Katkılar". Tarihinde 19 Mart 2021, adresinden erişildi <https://www.betonvecimento.com/surdurulebilirlik/mineral-katkilar>
- Enstitüsü, T. S.** 2014. "TS EN 206-1: Beton-Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk". Ankara: Türk Standartları Enstitüsü. Tarihinde adresinden erişildi https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=.%2C+EN+206-1%2C+2002%2C+“Beton%2C+Özellik%2C+Performans%2C+İmalat%2C+Uygunluk”+Türk+Standartları+Enstitüsü%2C++Ankara&btnG=

- Erdinç Arıcı, Resul Dursun, R. İnce.** 2007. "Betonun çarpma mukavemetinin tesbiti" (ss. 628–633).
- Erdoğan, T. Y.** 2016. "*Beton*".
- Erdoğan, Y. S.** 2018. "Sayısal Görüntü İşleme ile Titreşim Yer Değiştirmelerinin Ölçümü ve Modal Parametre Tayini". Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering, 20(59), 201–211.
- Eren, N. A.** 2021. "*Behavior Of Geopolymer Concrete Under Impact*". Gaziantep University.
- Ersoy, U.** 1985. "*Betonarme: temel ilkeler ve taşıma gücü hesabı*".
- Ersöz, M.** 2005. "*Sonlu Elemanlar Yöntemi*". Sakarya Üniversitesi.
- Esaifan, M., Khoury, H., Aldabsheh, I., Rahier, H., Hourani, M., Wastiels, J.** 2016. "Hydrated lime/potassium carbonate as alkaline activating mixture to produce kaolinitic clay based inorganic polymer". Applied Clay Science, 126, 278–286.
- Fahjan, Y.** 2018. "*SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ (SAP2000 UYGULAMASI) I. Genel Kavramlar*". Tarihinde adresinden erişildi <http://www.gyte.edu.tr/deprem/>
- Fernández-jiménez, A.** 2015. "Geopolymer Technology : The Current State of the Art Geopolymer technology : the current state of the art". Journal of materials science, 42(MAY 2007), 2917–2933.
- Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., Palomo, A.** 2007a. "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials". Journal of Materials Science, 42(9), 3055–3065.
- Fernandez-Jimenez, A., García-Lodeiro, I., Palomo, A.** 2007b. "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials". Journal of Materials Science, 42(9), 3055–3065.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A.** 2003. "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements". Fuel, 82(18), 2259–2265.
- Ferraris, C. F.** 1999. "Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report". Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 104(5), 461–478.
- Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., Valenza, A.** 2015. "A review on basalt fibre and its composites". Composites Part B: Engineering, 74, 74–94.
- Fukuda, M., Mizunuma, T., Izumi, T., Iizuka, M.** 1990. "Slump Control and Properties of Concrete with a New Superplasticizer. I: Laboratory studies and tests methods". İçinde *International RILEM Symposium* (ss. 10–19).
- Ganesh Babu, K., Sree Rama Kumar, V.** 2000. "Efficiency of GGBS in concrete". Cement and Concrete Research, 30(7), 1031–1036.

- Ghafoor, M. T., Khan, Q. S., Qazi, A. U., Sheikh, M. N., Hadi, M. N. S.** 2021. "Influence of alkaline activators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature". *Construction and Building Materials*, 273(xxxx).
- Ghazy, M.** 2017. "SETTING AND MECHANICAL PROPERTIES OF FLY ASH BASED GEOPOLYMERS". İçinde *International Conference on Advances in Structural and Geotechnical Engineering* (ss. 1–11).
- Gifford, P. M., Gillott, J. E.** 1997. "Behaviour of mortar and concrete made with activated blast furnace slag cement". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 24(2), 237–249.
- Gomes, K. C., Carvalho, M., Diniz, D. de P., Abrantes, R. de C. C., Branco, M. A., de Carvalho, P. R. O.** 2019. "Carbon emissions associated with two types of foundations: CP-II Portland cement-based composite vs. geopolymer concrete". *Revista Materia*, 24(4).
- Görür, E.** 2015. "Alkali Aktifleştirilmiş Uçucu Kül Geopolimer Betonun Dayanım Ve Durabilite Özelliklerinin Araştırılması".
- Group, S.-C. C. E. P.** 2005. "The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use". İçinde *International Bureau for Precast Concrete (BIBM)*.
- Guler, S., Akbulut, Z. F.** 2022. "Effect of high-temperature on the behavior of single and hybrid glass and basalt fiber added geopolymer cement mortars". *Journal of Building Engineering*, 57, 104809.
- Gupta, A.** 2021. "Investigation of the strength of ground granulated blast furnace slag based geopolymer composite with silica fume". *Materials Today: Proceedings*, 44, 23–28.
- Gupta, A., Gupta, N., Saxena, K. K.** 2021. "Mechanical And Durability Characteristics Assessment Of Geopolymer Composite (GPC) At Varying Silica Fume Content". *Journal of Composites Science*, 5(9).
- Habert, G., D’Espinose De Lacaillerie, J. B., Roussel, N.** 2011. "An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: Reviewing current research trends". *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238.
- Hadjsadok, A., Kenai, S., Courard, L., Michel, F., Khatib, J.** 2012. "Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity". *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 671–677.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V.** 2004. "Brief review of development of geopolymer concrete". *George Hoff Symposium on High Performance Concrete and Concrete for Marine Environment*, (May), 63–72. Tarihinde adresinden erişildi
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Brief+review+of+development+of+geopolymer+concrete&conference=Proceedings+of+the+8th+CANMET/ACI+International+Conference+on+Fly+Ash,+Silica+Fume,+Slag+and+Natural+Pozzolans+in+Concrete&author=Hardjito,+D.&au

- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V.** 2005. "Introducing Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Manufacture and Engineering Properties". 30 th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES, (March 2015), 23–24.
- Hardjito, Djwantoro, Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., Rangan, B. V.** 2004. "On the development of fly ash-based geopolymer concrete". *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.
- Hasanbeigi, A., Menke, C., Price, L.** 2010. "The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry". *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1509–1518.
- Holland, T. C.** 2005. "Silica Fume User's Manual". TC Holland//Technical Report No FHWA IF, 5, 9–10.
- Holmquist, T. J., Johnson, G. R.** 2011. "A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures". *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 78(5).
- Hong, G.-H., Shin, Y.-S.** 2003. "Structural Performance Evaluation of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded FRP Sheets". *Journal of the Korea Concrete Institute*, 15(1), 78–86.
- Hos, J. P., McCormick, P. G., Byrne, L. T.** 2002. "Investigation of a synthetic aluminosilicate inorganic polymer". *Journal of Materials Science*, 37(11), 2311–2316.
- Hrennikoff, A.** 1941. "Solution of Problems of Elasticity by the Framework Method". İçinde *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME* (C. 8, ss. A169–A175). American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Hussin, M. W., Arrifin, M. A. M., Hussein, A. A.** 2016. "The Effect of Sodium Hydroxide Molarity and Other Parameters on Water Absorption of Geopolymer Mortars". *Indian Journal of Science and Technology*, 9(48).
- İpek, S., Mermerdaş, K.** 2022. "Engineering properties and SEM analysis of eco-friendly geopolymer mortar produced with crumb rubber". *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(2), 95–107.
- IS 13311 (Part 1).** 1992. "Method of Non-destructive testing of concret, Part 1: Ultrasonic pulse velocity". Bureau of Indian Satandards, 1, 1–14.
- Ishwarya, G.** 2013. "Development of geopolymer concrete cured at ambient temperature". India: CSIR-Central Building Research Institute.
- Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Bashar, I. I.** 2014. "The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar". *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 833–841.

- Islam, A., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Bashar, I. I., Kabir, S. M. A.** 2015. "Engineering properties and carbon footprint of ground granulated blast-furnace slag-palm oil fuel ash-based structural geopolymer concrete". *Construction and Building Materials*, 101, 503–521.
- ISO 9812**, Fresh Concrete, Determination of the Consistency (Flow Test). 1979.
- J. Davidovits.** 1984. "Pyramids of Egypt Made of Man Made Stone, Myth or Fact?". İçinde *Symposium on Archaeometry*. Washington DC: Smithsonian Institution.
- Jain, M. K., Pal, S. C.** 1998. "Utilisation of industrial slag in making high performance concrete composites". *Indian Concrete Journal*, 72(6), 307–315. Tarihinde adresinden erişildi [https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Utilisation of industrial slag in making high performance concrete composites&publication_year=1998&author=M.K.Jain&author=S.Pal](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Utilisation+of+industrial+slag+in+making+high+performance+concrete+composites&publication_year=1998&author=M.K.Jain&author=S.Pal)
- Jang, J. G., Lee, N. K., Lee, H. K.** 2014. "Fresh and hardened properties of alkali-activated fly ash/slag pastes with superplasticizers". *Construction and Building Materials*, 50, 169–176.
- Javeed, M. A., Kumar, V., Narendra, H.** 2015. "Studies on Mix Design of Sustainable Geo-Polymer Concrete". *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 2(4).
- Johnston, C. D., Gamble, B. R., Malhotra, V. M., Collepardi, M., Corradi, M., Johnston, C. D., Corradi, M.** 1979. "Superplasticizers in Concrete". American Concrete Institute, ACI Special Publication. Tarihinde adresinden erişildi <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1979STIN...8021617J/abstract>
- Junaid, M. T., Elbana, A., Altoubat, S.** 2020. "Flexural response of geopolymer and fiber reinforced geopolymer concrete beams reinforced with GFRP bars and strengthened using CFRP sheets". *Structures*, 24(February), 666–677.
- Junaid, M. T., Karzad, A. S., Leblouba, M.** 2021. "Investigation on the properties of ambient cured alkali activated binder concrete". *International Journal of Applied Science and Engineering*, 18(5), 1–20.
- K, M. C., Dattatreya, J. K., Ambily, P. S.** 2014. "Investigation on behaviour of reinforced geopolymer concrete slab under repeated low velocity impact loading". İçinde *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO Certified Organization)* (C. 3, ss. 10775–10786). Tarihinde adresinden erişildi www.ijirset.com
- Kabay, N.** 2014. "Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber". *Construction and Building Materials*.
- Kamenny, V.** 2009. "Advanced basalt fiber". Tarihinde 16 Mayıs 2023, adresinden erişildi https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=Kamenny+Vek.+%282009%29.+Advanced+basalt+fiber.+Basfiber.+Retrieved+May+9%2C+2012%2C+from+http%3A%2F%2Fwww.basfiber.com%2F+Jón&btnG=

- Kayalı, E. S., Ensari, C., Dikeç, F., Callister, W. D., Rethwisch, D. G.** 2017. "Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği 4270310 Metalurji ve Malzeme Laboratuvarı II [Üç Nokta Eğme Testi Deneyi]".
- Keerthy, V., Kumar, Y. H.** 2017. "Experimental studies on properties of geopolymer concrete with GGBS and fly ash". *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(1), 602–609.
- Khan, Z. A., Patil, N. N., Swamy, H. M. R.** 2018. "Behavior of GFRC slabs wrapped with BFRP sheets under impact loads". *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(8), 842–852.
- Khater, H. M.** 2013. "Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials". *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5(1), 1–10.
- Kim, D. J., Wille, K., El-Tawil, S., Naaman, A. E.** 2011. "Testing of Cementitious Materials under High-Strain-Rate Tensile Loading Using Elastic Strain Energy". *Journal of Engineering Mechanics*, 137(4), 268–275.
- Kizilirmak, C., Aydin, S., Yardimci, M. Y.** 2019. "Effect of the steel fibre hook geometry on the flexural properties of high strength steel fibre reinforced concretes under static and impact loading". *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(3), 1609–1627.
- Kızılkant, AB; Kabay, N; Akyüncü, V; Erdoğan, G.** 2014. "Basalt Fibers and Mechanical Properties of Basalt Fiber". *Sigma: Journal of Engineering & Natural Sciences/Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4(32), 444–452.
- Kocabeyoğlu, E. T.** 2016. "*Bazalt Lif İçeren Yüksek Dayanımlı Harçların Yüksek Sıcaklık Dirençleri*". Bozok Üniversitesi.
- Komljenović, M., Bašćarević, Z., Bradić, V.** 2010. "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers". *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3), 35–42.
- Komnitsas, K. A.** 2011. "Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities". İçinde *Procedia Engineering* (C. 21, ss. 1023–1032). No longer published by Elsevier.
- Kong, D. L. Y., Sanjayan, J. G.** 2008. "Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures". *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 986–991.
- Krishna Rao, A., Rupesh Kumar, D.** 2020. "Comparative study on the behaviour of GPC using silica fume and fly ash with GGBS exposed to elevated temperature and ambient curing conditions". İçinde *Materials Today: Proceedings* (C. 27, ss. 1833–1837). Elsevier.
- Kumar, D. N., Ramujee, K., Tech, M.** 2017. "Durability Characteristics of Fiber Reinforced Geopolymer Concrete Incorporated with Fly-ash and GGBS". *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 958–969.

- Kusbiantoro, A., Nuruddin, M. F., Shafiq, N., Qazi, S. A.** 2012. "The effect of microwave incinerated rice husk ash on the compressive and bond strength of fly ash based geopolymer concrete". *Construction and Building Materials*, 36, 695–703.
- Langley, W. S., Carette, G. G., Malhotra, V. M.** 1989. "Structural concrete incorporating high volumes of ASTM Class F fly ash". *ACI Materials Journal*, 86(5), 507–514.
- Laskar, A. I., Bhattacharjee, R.** 2011. "Rheology of fly-ash-based geopolymer concrete". *ACI Materials Journal*, 108(5), 536–542.
- Lee, N. K., Lee, H. K.** 2013. "Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature". *Construction and Building Materials*, 47, 1201–1209.
- Li, C., Sun, H., Li, L.** 2010, Eylül 1. "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements". *Cement and Concrete Research*. Pergamon.
- Li, W., Xu, J.** 2009a. "Impact characterization of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete using a 100-mm-diameter split Hopkinson pressure bar". *Materials Science and Engineering A*, 513–514(C), 145–153.
- Li, W., Xu, J.** 2009b. "Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading". *Materials Science and Engineering A*, 505(1–2), 178–186.
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., Kamarudin, H.** 2016, Ekim 1. "Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review". *Progress in Materials Science*. Elsevier Ltd.
- Luhar, S., Khandelwal, U.** 2015. "A Study on Water Absorption and Sorptivity of Geopolymer Concrete". *International Journal of Civil Engineering*, 2(8), 1–9.
- M., Ç., Kaya S.** 2015. "Eğilme (Bükülme) Dayanımı.". *Ekp*, 13(3), 1576–1580.
- Ma, C. K., Awang, A. Z., Omar, W.** 2018a. "Structural and material performance of geopolymer concrete: A review". *Construction and Building Materials*, 186, 90–102.
- Ma, C. K., Awang, A. Z., Omar, W.** 2018b, Ekim 20. "Structural and material performance of geopolymer concrete: A review". *Construction and Building Materials*. Elsevier.
- Madheswaran, C. K., Philip, P. Merlin.** 2014. "Experimental and Analytical Investigations on Flexural Behaviour of Retrofitted Reinforced Concrete Beams with Geopolymer Concrete Composites". *International Journal of Material and Mechanical Engineering*, 3(3), 62.
- Malvar, L. J., Crawford, J. E., Wesevich, J. W., Simons, D.** 1997. "A plasticity concrete material model for DYNA3D". *International Journal of Impact Engineering*, 19(9–10), 847–873.

- Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., Bayqra, S. H., Ouedraogo, H. A.** 2018. "Farklı puzolanların tekli, ikili ve üçlü çimentolu sistemleri içeren harç karışımlarının dayanımı ve geçirgenlik performansı açısından kıyaslanması". Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20(1), 1–14.
- Matli, Penchal Reddy, Adel Mohamed, Amer Mohamed, R.- R.** 2015. "*Microwave Fast Sintering of Double Perovskite Ceramic Materials*". Advanced Ceramic Processing.
- Matsagar, V.** 2015. "Advances in structural engineering: Materials, volume three". Advances in Structural Engineering: Materials, Volume Three, (April), 1619–2647.
- Mazloom, M., Ramezaniapour, A. A., Brooks, J. J.** 2004. "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete". Cement and Concrete Composites, 26(4), 347–357.
- Meesala, C. R., Verma, N. K., Kumar, S.** 2020. "Critical review on fly-ash based geopolymer concrete". Structural Concrete, 21(3), 1013–1028.
- Mehta, A., Siddique, R.** 2017. "Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete". Construction and Building Materials, 146, 136–143.
- Midhun, M. S., Gunneswara Rao, T. D., Chaitanya Srikrishna, T.** 2018. "Mechanical and fracture properties of glass fiber reinforced geopolymer concrete". Advances in Concrete Construction, 6(1), 29–45.
- Militký, J., Kovačič, V., Rubnerová, J.** 2002. "Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers". Engineering Fracture Mechanics, 69(9), 1025–1033.
- Mishra, J., Das, S. K., Singh, S. K., Mustakim, S. M.** 2019. "Development of Geopolymer Concrete for the Protection of Environment: A Greener Alternative to Cement". International Journal of Civil Engineering, 6(3), 41–47.
- Mishra, J., Panigrahi, R.** 2020. "Mini-Review on Structural Performance of Fiber Reinforced Geopolymer Concrete", 3(2), 435–442.
- Moaveni, S.** 2011. "*Finite Element Analysis: Theory and ANSYS Applications*".
- Moghadam, A. S., Omidinasab, F., Dalvand, A.** 2020. "Experimental investigation of (FRSC) cementitious composite functionally graded slabs under projectile and drop weight impacts". Construction and Building Materials, 237, 117522.
- Montes, C., Allouche, E. N.** 2013. "Rheological behavior of fly-ash-based geopolymers". İçinde *ASTM Special Technical Publication* (C. 1566 STP, ss. 72–84). ASTM International.
- Moradikhrou, A. B., Esparham, A., Jamshidi Avanaki, M.** 2020. "Physical & mechanical properties of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer concrete". Construction and Building Materials, 251, 118965.

- Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Bnhussain, M., Rafiza, A. R., Zarina, Y.** 2012. "Effect of $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios and NaOH molarities on compressive strength of fly-ash-based geopolymer". *ACI Materials Journal*, 109(5), 503–508.
- Mustakim, S. M., Das, S. K., Mishra, J., Aftab, A., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., Kaze, C. R.** 2021. "Improvement in Fresh, Mechanical and Microstructural Properties of Fly Ash- Blast Furnace Slag Based Geopolymer Concrete By Addition of Nano and Micro Silica". *Silicon*, 13(8), 2415–2428.
- Nagalingam, G., Chokkalingam, R. B.** 2020. "Strength studies on geopolymer concrete with GGBS and Fly ash". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872(1).
- Nagan, S., Mohana, R.** 2014. "Behaviour of geopolymer ferrocement slabs subjected to impact". *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 38(C1+), 223–233.
- Nataraja, M. C., Dhang, N., Gupta, A. P.** 2000. "Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach". *Cement and Concrete Research*, 30(4), 593–597.
- Nath, P., Sarker, P. K.** 2017. "Fracture properties of GGBFS-blended fly ash geopolymer concrete cured in ambient temperature". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(1), 1–12.
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., Chai, J. X. H., Lu, T. M.** 2014. "Properties of fresh and hardened glass fiber reinforced fly ash based geopolymer concrete". *İçinde Key Engineering Materials* (C. 594–595, ss. 629–633).
- Neville, A.** 2013. "Properties of concrete". *Choice Reviews Online*, 50(10), 50-5613-50–5613.
- Nguyễn, V. H., Bùi, D. T., Đặng, D.** 2008. "Recent research geopolymer concrete". *The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA, Vietnam*, 18, 235–241.
- Niveditha, M., Srikanth, K.** 2020. "Effect of Durability properties on Geopolymer concrete – A Review". *E3S Web of Conferences*, 184, 1–4.
- Note, A.** 2001. "Non-Contact Ultrasound WOOD AND LUMBER ANALYSIS Application Note AN-305-3 SecondWave™ M510 Ultrasonic Analysis System", 3–8. Tarihinde adresinden erişildi %0Awww.ultrangroup.com
- Nuruddin, M. F., Demie, S., Shafiq, N.** 2011. "Effect of mix composition on workability and compressive strength of self-compacting geopolymer concrete". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(11), 1196–1203.
- Okoye, F. N., Durgaprasad, J., Singh, N. B.** 2015. "Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete". *Construction and Building Materials*, 98, 685–691.

- Okoye, Francis N., Prakash, S., Singh, N. B.** 2017. "Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume". *Journal of Cleaner Production*, 149, 1062–1067.
- Olivia, M., Nikraz, H.** 2012. "Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method". *Materials and Design*, 36, 191–198.
- Orhan, M. E.** 2021. "*Dolgu Duvarların Düzlem Dışı Davranışının Değerlendirilmesi*". Fırat University.
- Özbayrak, A., Kucukgoncu, H., Aslanbay, H. H., Aslanbay, Y. G., Atas, O.** 2023. "Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios". *Journal of Building Engineering*, 68(November 2022).
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J. A., Leonelli, C., Palomo, A., Chindaprasirt, P.** 2014. "*Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*". *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*.
- Palomo, A., Macias, A., Blanco, M.T., Puertas, F.** 1992. "Physical, chemical and mechanical characterisation of geopolymers". İçinde *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement* (s. 505511).
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T.** 1999a. "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future". *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., Blanco, M. T.** 1999b. "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future". *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.
- Pan, Z., Sanjayan, J. G., Rangan, B. V.** 2011. "Fracture properties of geopolymer paste and concrete". *Magazine of Concrete Research*, 63(10), 763–771.
- Papayianni, I., Tsohos, G., Oikonomou, N., Mavria, P.** 2005. "Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures". *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 217–222.
- Parashar, A. K., Sharma, P., Sharma, N.** 2022. "Effect on the strength of GGBS and fly ash based geopolymer concrete". *Materials Today: Proceedings*, 62, 4130–4133.
- Part, W. K., Ramli, M., Cheah, C. B.** 2015, Şubat 15. "An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products". *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd.
- Patil, S., Joshi, D., Mangla, D., Savvidis, I.** 2023. "*Recent Development in Geopolymer Concrete: A Review*". *Materials Today: Proceedings*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.04.046>
- Pavlovic, A., Fragassa, C., Disic, A.** 2017. "Comparative numerical and experimental study of projectile impact on reinforced concrete". *Composites Part B: Engineering*, 108, 122–130.

- Polat, B. Y.** 2019. "Geopolimer harcın mikro organizmalar yardımıyla kendiliğinden iyileşmesinin araştırılması".
- Prabu, B., Kumutha, R., Vijai, K.** 2017. "Effect of fibers on the mechanical properties of fly ash and GGBS based geopolymer concrete under different curing conditions". *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 24(1), 5–12.
- Premkumar, R., Hariharan, P., Rajesh, S.** 2022. "Effect of silica fume and recycled concrete aggregate on the mechanical properties of GGBS based geopolymer concrete". *Materials Today: Proceedings*, 60, 211–215.
- Provis, J. L., Van Deventer, J. S. J.** 2009. "Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications". *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*.
- Quagliarini, E., Monni, F., Bondioli, F., Lenci, S.** 2016. "Basalt fiber ropes and rods: Durability tests for their use in building engineering". *Journal of Building Engineering*, 5, 142–150.
- Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J., Wu, X.** 1996. "Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses: Part I. Low-temperature reaction stoichiometry and structure of a model compound". *Journal of Materials Science*, 31(1), 71–79.
- Raijiwala, D. B., Patil, H. S.** 2010. "Geopolymer Concrete : A Green Concrete". İçinde *2nd International Conference on Chemical, Biological and Environmental Engineering* (ss. 202–206).
- Ramachandran, V.** 1984. "CONCRETE ADMIXTURES HANDBOOK: PROPERTIES, SCIENCE, AND TECHNOLOGY.". *Concr Admixtures Handb, Prop, Sci, and Technol*. Tarihinde adresinden erişildi https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=aSjXbx9H9WAC&oi=fnd&pg=PR2&dq=Concrete+Admixtures+Handbook+-+Properties,+Science,+and+Technology&ots=FPHigC_5L-&sig=8zpMcd6Yhw05ydAYqpkS7Ae2y5k
- Ramakrishnan, V., Panchalan, R. K.** 2005. "A new construction material-Non-corrosive basalt bar reinforced concrete". İçinde *American Concrete Institute, ACI Special Publication* (C. SP-229, ss. 253–270). American Concrete Institute.
- Ramesh, G.** 2021. "Geopolymer Concrete: A Review". *Indian Journal of Structure Engineering*, 1(2), 5–8.
- Ramezaniapour, A. A., Moeini, M. A., Bagheri, M., Bayat, H.** 2016. "An overview on the properties of Geopolymer concrete fabricated with industrial by-products", (November).
- Ramujee, K., Potharaju, M.** 2017. "Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites". *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2937–2945.
- Rangan, B. V.** 2008. "Fly ash-based geopolymer concrete". Tarihinde adresinden erişildi <https://doi.org/10.14359%2F13485>

- Ranjbar, N., Mehrali, M., Maheri, M. R., Mehrali, M.** 2017. "Hot-pressed geopolymer". *Cement and Concrete Research*, 100, 14–22.
- Ranjbar, N., Talebian, S., Mehrali, M., Kuenzel, C., Cornelis Metselaar, H. S., Jumaat, M. Z.** 2016. "Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites". *Composites Science and Technology*, 122, 73–81.
- Ranjbar, N., Zhang, M.** 2020. "Fiber-reinforced geopolymer composites: A review". *Cement and Concrete Composites*, 107(November 2019), 103498.
- Rarnalaishnan, V., Tolmare, N. S.** 1998. "*PERFORMANCE EVALUATION OF 3D BASALT FIBER REINFORCED CONCRETE & BASALT ROD REINFORCED CONCRETE*". *Report*. Tarihinde adresinden erişildi <http://www.nationalacademies.org/trb/idea>
- Rashad, A. M.** 2013a. "A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag - A guide for Civil Engineer". *Construction and Building Materials*, 47(2013), 29–55.
- Rashad, A. M.** 2013b. "A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag - A guide for Civil Engineer". *Construction and Building Materials*, 47, 29–55.
- Rattan, S. S.** 2008. "*Strength of Materials*".
- Ravitheja, A., Kiran Kumar, N. L. N.** 2019. "A study on the effect of nano clay and GGBS on the strength properties of fly ash based geopolymers". İçinde *Materials Today: Proceedings* (C. 19, ss. 273–276). Elsevier.
- Richardson, R. L.** 1912. "Apparatus for Warning a Ship at Sea of its Nearness to Large Objects Wholly or Partly under Water.". Tarihinde adresinden erişildi https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=tr&as_sdt=0%2C5&q=Richardson%2C+R.L.+%281913%29+Apparatus+for+warning+a+ship+at+sea+of+its+nearness+to+large+objects+wholly+or+partially+under+water.+Brit.+Pat.+Specification+11%2C125%2C+March+27.&btnG=
- Riedel, W.** 2004. "Beton unter dynamischen Lasten–Meso-und makromechanische Modelle". Tarihinde 17 Mayıs 2023, adresinden erişildi https://scholar.google.com.tr/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=W.+Riedel%2C+Bet on+unter+dynamischen+Lasten%3A+Meso-+und+makromechanische+Modelle+und+ihre+Parameter%2C+Ed.%3A+Fraunhofer-Institut+für+Kurzzeitdynamik%2C+Ernst-Mach-Institut+EMI%2C+Freiburg%2FBrs
- Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S., Schmolinske, E.** 1999. "Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes". İçinde *Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures*.

- Riedel, Werner, Kawai, N., Kondo, K. ichi.** 2009. "Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials". *International Journal of Impact Engineering*, 36(2), 283–293.
- Ronad, A., Karikatti, V. B., Dyavanal, S. S.** 2016. "A Study On Mechanical Properties Of Geopolymer Concrete Reinforced With Basalt Fiber". *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 05(07), 474–478.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., Chung, Y. S.** 2013a. "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators". *Construction and Building Materials*, 47, 409–418.
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., Chung, Y. S.** 2013b. "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators". *Construction and Building Materials*.
- Sağlam, A. R., Parlak, N., Özkul, M. H.** 2017. "Polikarboksilikat esaslı kimyasal katkıların beton üretiminde kullanımı". *İçinde Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu* (ss. 108–120).
- Saha, S., Rajasekaran, C.** 2017. "Enhancement of the properties of fly ash based geopolymer paste by incorporating ground granulated blast furnace slag". *Construction and Building Materials*, 146, 615–620.
- Sajith, A., Pal, S.** 2023. "Finite Element Analysis and Parametric Study of Concrete Beams Under Impact Loading". *İçinde Lecture Notes in Civil Engineering* (C. 284, ss. 263–271). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- Sakulich, A. R.** 2011, Aralık 1. "Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability". *Sustainable Cities and Society*. Elsevier.
- Salih, M. A., Abang Ali, A. A., Farzadnia, N.** 2014. "Characterization of mechanical and microstructural properties of palm oil fuel ash geopolymer cement paste". *Construction and Building Materials*, 65, 592–603.
- Saloni, Parveen, Pham, T. M.** 2020. "Enhanced properties of high-silica rice husk ash-based geopolymer paste by incorporating basalt fibers". *Construction and Building Materials*, 245, 118422.
- Sarath, B., Kumar, C., Ramesh, K., Siddhartha, P. V. P.** 2018. "Analytical Study on Flexural Behaviour of Reinforced Geopolymer Concrete Beams by ANSYS". *İçinde Materials Science and Engineering*.
- Sarath Chandra Kumar, B., Ramesh, K.** 2018. "Analytical Study on Flexural Behaviour of Reinforced Geopolymer Concrete Beams by ANSYS". *İçinde IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (C. 455).
- Saraya, M. E. S. I.** 2014. "Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amount of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study". *Construction and Building Materials*, 72, 104–112.

- Sashidhar, C., Guru Jawahar, J., Neelima, C., Pavan Kumar, D.** 2016. "Preliminary Studies On Self Compacting Geopolymer Concrete Using Manufactured Sand". *Asian Journal Of Civil Engineering (Building And Housing)*, 17(3), 277–288.
- Savaş, S., Ulker, M., Turgut, S., Bakir, D.** 2021. "Determination of energy damping upon impact load in reinforced concrete sandwich plates with different core geometries". *Scientia Iranica*, 28(6A), 3082–3091.
- Şenol, A. F., Demiral, N. Ç.** 2023. "Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Harçların Özelliklerine Etkisi". *İçinde 1 st International Conference on Scientific and Innovative Studies* (ss. 273–278). Konya: All Sciences Proceedings.
- Shah, S., Swartz, S., Ouyang, C.** 1995. "*Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock and other quasi-brittle materials*". Tarihinde adresinden erişildi
<https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=v63v9KnKVHYC&oi=fnd&pg=PR17&ots=NlyRp14Iiv&sig=iVhvCcKMaXzCLi2hTTwG9zZdjtI>
- Shahmansouri, A. A., Yazdani, M., Ghanbari, S., Akbarzadeh Bengar, H., Jafari, A., Farrokh Ghatte, H.** 2021. "Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite". *Journal of Cleaner Production*, 279, 123697.
- Shaikh, F., Haque, S.** 2018. "Behaviour of Carbon and Basalt Fibres Reinforced Fly Ash Geopolymer at Elevated Temperatures". *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 1–12.
- Shannag, M. J.** 2000. "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume". *Cement and Concrete Composites*, 22(6), 399–406.
- Shaw, J.** 2003. "Who built the pyramids?". *Harvard Magazine*, Jul, 42-49,99. Tarihinde adresinden erişildi
[https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=voDCTESa04kC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Davidovits+J+\(2008\)+Geopolymer+chemistry+and+applications.+Institut+Géopolymère,+Saint-Quentin,+France.&ots=7-9UAhlOfc&sig=KyV4hGgdMwDmfOEGhk9tdZHuCT0&redir_esc=y#v=onepage&q=Dav](https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=voDCTESa04kC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Davidovits+J+(2008)+Geopolymer+chemistry+and+applications.+Institut+Géopolymère,+Saint-Quentin,+France.&ots=7-9UAhlOfc&sig=KyV4hGgdMwDmfOEGhk9tdZHuCT0&redir_esc=y#v=onepage&q=Dav)
- Shi, C., Jiménez, A. F., Palomo, A.** 2011, Temmuz 1. "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement". *Cement and Concrete Research*. Pergamon.
- Shukla, J. P., Mondal, D. P., Jain, P. K., Shukla, A.** 2009. "New Technologies for Rural Development Having Potential of Commercialisation". *Allied Publ.*
- Sim, J., Park, C., Moon, D. Y.** 2005. "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures". *Composites Part B: Engineering*, 36(6–7), 504–512.
- Şimşek, O., Dur, A., Yaprak, H.,**2004. "*Silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı katkılı harçların özellikleri*". *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt* (C. 7).

- Singh, A.** 2012. "Engineering properties of reinforced geopolymer concrete". [B. Tech project report]. Roorkee, India. CSIR-Central Building Research Insti. Tarihinde adresinden erişildi <https://scholar.google.com/scholar?q=Singh A. Engineering properties of reinforced geopolymer concrete B. Tech project report. Roorkee, India. CSIR-Central Building Research Institute; 2012.>
- Singh, A. K.** 2016. "Strength and Durability Test of Fly Ash and GGBS Based Geopolymer Concrete Compressive Strength in MPa Strength Mpa Alkaline / Binder Ratio". *Internatinal Journal of Engineering Research and Application*, 6(8), 139–142.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S. K.** 2015a, Haziran 15. "Geopolymer concrete: A review of some recent developments". *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., Bhattacharyya, S. K.** 2015b, Haziran 15. "Geopolymer concrete: A review of some recent developments". *Construction and Building Materials*. Elsevier.
- Singh, I., Dev, N., Pal, S., Visalakshi, T.** 2022. "Finite Element Analysis of Impact Load on Reinforced Concrete". *Lecture Notes in Civil Engineering*, 203, 265–274.
- Singh, N. B., Middendorf, B.** 2020. "Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview". *Construction and Building Materials*, 237, 117455.
- Singh, Nakshatra B.** 2018. "Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material". *Minerals*, 8(7).
- Singh, R. P., Vanapalli, K. R., Cheela, V. R. S., Peddireddy, S. R., Sharma, H. B., Mohanty, B.** 2023. "Fly ash, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts". *Construction and Building Materials*, 378, 131168.
- Şinik, O.** 2019. "*Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması*".
- Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., Rahier, H.** 2013. "Characterization of alkali activated kaolinitic clay". *Applied Clay Science*, 75–76, 120–125.
- Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., Lukey, G. C.** 2007. "Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs)". *Cement and Concrete Research*, 37(2), 251–257.
- Sofi, M., Van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., Lukey, G. C.** 2007. "Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC)". *Journal of Materials Science*, 42(9), 3107–3116.
- Sohel, K. M. A., Liew, J. Y. R.** 2014. "Behavior of steel-concrete-steel sandwich slabs subject to impact load". *Journal of Constructional Steel Research*, 100, 163–175.

- Soufeiani, L., Raman, S. N., Jumaat, M. Z. Bin, Alengaram, U. J., Ghadyani, G., Mendis, P.** 2016, Ekim 1. "Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading – A review". *Engineering Structures*. Elsevier Ltd.
- Sravanthi, D., Himath Kumar, Y., Sarath Chandra Kumar, B.** 2020a. "Comparative study on flow characteristics, strength and durability of GGBS based geopolymer concrete". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912(6).
- Sravanthi, D., Himath Kumar, Y., Sarath Chandra Kumar, B.** 2020b. "Comparative study on flow characteristics, strength and durability of GGBS based geopolymer concrete". İçinde *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (C. 912).
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., Rangan, B. V.** 2007. "Fly ash-based geopolymer concrete: Study of slender reinforced columns". *Journal of Materials Science*, 42(9), 3124–3130.
- Sun, X., Gao, Z., Cao, P., Zhou, C.** 2019. "Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete". *Construction and Building Materials*, 202, 58–72.
- Swanepoel, J. C., Strydom, C. A.** 2002. "Utilisation of fly ash in a geopolymeric material". İçinde *Applied Geochemistry* (C. 17, ss. 1143–1148). Pergamon.
- Tanaka M, S, M., A, O., M, V.** 1996. "A new admixture for high performance concrete". İçinde *Concrete in the service of mankind* (ss. 291–300). Tarihinde adresinden erişildi <https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=mSqIshBaIBMC&oi=fnd&pg=PA286&dq=A+New+Admixture+for+High+Performance+Concrete&ots=eQTmT8jddg&sig=o8-9d71jLCUv1eOUT6EjH1t33pQ>
- Tawfik, T. A., AlSaffar, D. M., Tayeh, B. A., Metwally, K. A., ElKattan, I. M.** 2021. "Role of expanded clay aggregate, metakaolin and silica fume on the of modified lightweight concrete properties". *Geosystem Engineering*, 24(3), 145–156.
- Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., Megat Johari, M. A., Zeyad, A. M.** 2013. "The role of silica fume in the adhesion of concrete restoration systems". İçinde *Advanced Materials Research* (C. 626, ss. 265–269). Trans Tech Publications Ltd.
- Taylor, H. F. W.** 1997. "*Cement chemistry 2nd edition*". Thomas Telford Ltd, London.
- Temuujin, J., Minjigmaa, A., Davaabal, B., Bayarzul, U., Ankhtuya, A., Jadambaa, T., Mackenzie, K. J. D.** 2014. "Utilization of radioactive high-calcium Mongolian flyash for the preparation of alkali-activated geopolymers for safe use as construction materials". *Ceramics International*, 40(PB), 16475–16483.
- Thokchom, S., Ghosh, P., Ghosh, S.** 2009. "Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars". *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(7), 28–32.
- Thorhallsson, E., Erlendsson, Jón Ólafur Erlendsson, Ö.** 2013. "Basalt fiber introduction". İçinde *Basalt fiber introduction*.

- Topark-Ngarm, P., Chindaprasirt, P., Sata, V.** 2015. "Setting Time, Strength, and Bond of High-Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7), 04014198.
- Tran, T. T., Pham, T. M., Hao, H.** 2020. "Effect of hybrid fibers on shear behaviour of geopolymer concrete beams reinforced by basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars without stirrups". *Composite Structures*, 243, 112236.
- TRT.** 2017. "Freni patlayan kamyonet Emniyet'in bariyerlerine çarptı". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.haberler.com/3-sayfa/emniyetin-beton-bariyerlerine-carpan-surucu-10127408-haberi/>
- TS EN 934-2** Kimyasal Katkılar-Beton, Harç ve Şerbet için Bölüm 2: Beton Katkıları-Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, TSE, Ankara (2002).
- TSE.** "TS EN 12390-5, Testing hardened concrete-Part 5: Flexural strength of test specimens" (2002). Ankara.
- Turner, L. K., Collins, F. G.** 2013. "Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete". *Construction and Building Materials*, 43, 125–130.
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C., Topp, L. J.** 1956. "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures". *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805–823.
- Tuyan, M.** 2019. "Atık Tuğla Tozunun Mineral Katkı Olarak Kullanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Hal, Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi". *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 264–272.
- Tuyan, M., Ramyar, K.** 2017. "Temperature Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer", (April).
- Uma.** 2012. "Experimental investigation and analytical modeling of reinforced Geopolymer concrete beam". *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(3).
- URL-1,**Fly Ash. 2018. Tarihinde adresinden erişildi https://en.wikipedia.org/wiki/Fly_ash
- URL-2,**non-contact ultrasound: Concrete, highway, bridges, and air strip analysis. Application Note AN-305-4. 2005. Tarihinde 28 Eylül 2022, adresinden erişildi <https://www.yumpu.com/en/document/read/7199566/non-contact-ultrasound-concrete-highway-ultran-group>
- URL-3,**SEM-EDS Analizi. y.y. Tarihinde 28 Eylül 2022, adresinden erişildi <https://www.labaratuvar.com/testler/malzeme/sem-analizi-sem-eds-analizi/>
- URL-4,**Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) - EDS Analizi - KBT Bilim Sitesi. y.y. Tarihinde 28 Eylül 2022, adresinden erişildi <https://www.kuark.org/2017/04/taramali-elektron-mikroskobu-sem-eds-analizi/>

- URL-5,**Taze Betonda İşlenebilmenin Ölçülmesi ve Deneyde Kullanılan Aletler | İnşaatım.com. y.y. Tarihinde 27 Eylül 2022, adresinden erişildi <https://www.inaatim.com/taze-betonda-islenebilmenin-olculmesi-ve-deneyde-kullanilan-aletler/>
- URL-6,**Ultrasonik Geçiş Hızı Deneyiyle Beton Dayanım Tayini. y.y. Tarihinde 28 Eylül 2022, adresinden erişildi <https://insapedia.com/ultrasonik-gecis-hizi-deneyiyle-beton-dayanim-tayini/>
- URL-7,**Wikipedia. y.y. "Basalt Fiber". Tarihinde adresinden erişildi https://en.wikipedia.org/wiki/Basalt_fiber
- URL-8,**www.sezacimento.com.tr. y.y. "CEM II / A-M (P-LL) 42.5 R (PORTLAND KOMPOZE ÇİMENTO) TS EN 197-1:2012 SİSTEM 1". Tarihinde adresinden erişildi <https://www.sezacimento.com.tr/portfoy/portland-kompoze-a-m/>
- Vacev, T., Zorić, A., Grdić, D., Ristić, N., Grdić, Z., Milić, M.** 2023. "Experimental and Numerical Analysis of Impact Strength of Concrete Slabs". Periodica Polytechnica Civil Engineering.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J.** 1999. "Effect of the alkali metal activator on the properties of fly ash-based geopolymers". Industrial and Engineering Chemistry Research, 38(10), 3932–3941.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Lorenzen, L.** 1998. "Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized flyash". Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science, 29(1), 283–291.
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., Schwartzman, A.** 1999. "The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part II. Material and leaching characteristics". Minerals Engineering, 12(1), 75–91.
- Van Lam, T., Bulgakov, B., Aleksandrova, O., Larsen, O., Ngoc Anh, P.** 2018. "Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete". E3S Web of Conferences, 33, 1–13.
- Verma, M., Dev, N.** 2021a. "Effect of ground granulated blast furnace slag and fly ash ratio and the curing conditions on the mechanical properties of geopolymer concrete". Structural Concrete, (August 2020), 1–15.
- Verma, M., Dev, N.** 2021b. "Sodium hydroxide effect on the mechanical properties of flyash-slag based geopolymer concrete". Structural Concrete, 22(S1), E368–E379.
- Vijai, K., Kumutha, R., Vishnuram, B. G.** 2012. "Experimental investigations on mechanical properties of geopolymer concrete composites". Asian Journal of Civil Engineering, 13(1), 89–96.
- Vinothkumar, A., Kalaivani, M., Easwaran, P.** 2019. "Development of Fly ash-GGBS based Self Compacting Geopolymer Concrete : a Review", (September), 1–5.

- Vossoughi, F., Ostertag, C. P., Monteiro, P. J. M., Johnson, G. C.** 2007. "Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact". *Cement and Concrete Research*, 37(1), 96–106.
- Vun, R. Y., Eischeid, T., Bhardwaj, M. C.** 2006. "Quantitative Non-Contact Ultrasound Testing and Analysis of Materials for Process and Quality Control". *Compare A Journal Of Comparative Education*, 1–10.
- W. Sai, D., K. Satya, E. S. R.** 2019. "Study On The Mechanical Properties Of GGBS Based Geopolymer Concrete Using Silica Fume As A Partial Replacement". *Journal on Structural Engineering*, 8(3), 29.
- Wallah, S. E., Rangan, B. V.** 2006. "Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties", 1–107. Tarihinde adresinden erişildi <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/34322>
- Wang, W., Huo, Q., Yang, J. chao, Wang, J. hui, Wang, X.** 2022. "Experimental investigation of ultra-early-strength cement-based self-compacting high strength concrete slabs (URCS) under contact explosions". *Defence Technology*, (xxxx).
- Wang, Y., Hu, S., He, Z.** 2021. "Mechanical and fracture properties of geopolymer concrete with basalt fiber using digital image correlation". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 112, 102909.
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. W., Setunge, S.** 2017. "Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes". *Construction and Building Materials*, 143, 272–279.
- Welter, M., Schmücker, M., MacKenzie, K. J. D.** 2015. "Evolution of the fibre-matrix interactions in basalt-fibre-reinforced geopolymer-matrix composites after heating". *Journal of Ceramic Science and Technology*, 6(1), 17–24.
- Xu, Hua, and J. S. J. V. D.** 1999. "The geopolymerisation of natural alumino-silicates". *Proceedings of Geopolymere*, 43–64.
- Xu, H., Van Deventer, J. S. J.** 2000. "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals". *International Journal of Mineral Processing*, 59(3), 247–266.
- Xu, H., Van Deventer, J. S. J.** 2002. "Geopolymerisation of multiple minerals". *Minerals Engineering*, 15(12), 1131–1139.
- Yalghuz, M. R.** 2020. "*Farklı tip malzemeler kullanılarak geopolimer harç üretimi ve dayanıklılığının incelenmesi*".

- Yamakawa, I., Kishtiani, K., Fukushi, I., Kuroha, K.** 1990. "Slump Control and Properties of Concrete with a New Superplasticizer - II. High strength in situ concrete work at Hicariga-Oka Housing project". İçinde *RILEM Symposium on "Admixtures for Concrete. Improvement of Properties"* (ss. 94–105). Tarihinde adresinden erişildi <https://www.google.com/books?hl=tr&lr=&id=pUNZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA94&dq=Yamakawa+I.,+Kishtiani+K.,+Fukushi+I.,+Kuroha+K.,+Slump+Control+and+Properties+of+Concrete+with+a+New+Superplasticizer.+II.+High+strength+in+situ+concrete+work+at+Hicariga-Oka+Housin>
- Yang, K.-H., Song, J.-K.** 2009. "Workability Loss and Compressive Strength Development of Cementless Mortars Activated by Combination of Sodium Silicate and Sodium Hydroxide". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(3), 119–127.
- Yang, K. H., Song, J. K., Lee, K. S., Ashour, A. F.** 2009. "Flow and compressive strength of alkali-activated mortars". *ACI Materials Journal*, 106(1), 50–58.
- Yankelevsky, D. Z.** 1997. "Local response of concrete slabs to low velocity missile impact". *International Journal of Impact Engineering*, 19(4), 331–343.
- Yap, S. P., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z.** 2013. "Enhancement of mechanical properties in polypropylene- and nylon-fibre reinforced oil palm shell concrete". *Materials and Design*, 49, 1034–1041.
- Yilmazer Polat, B.** 2022. "Self healing of alkali active mortars with expanded perlite aggregate". *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01225.
- Yilmazer Polat, B., Uysal, M.** 2021. "Bacterial crack healing in metakaolin based geopolymer mortars". *Journal of Building Engineering*, 39, 102291.
- Yilmazer Polat, B., Uysal, M., Korkmaz, V.** 2020. "A RESEARCH FOR BACTERIAL SELF-HEALING IN METAKAOLIN BASED GEOPOLYMER MORTARS". *Nat Sci (C.* 38).
- Yoo, D. Y., Banthia, N.** 2019. "Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review". *Cement and Concrete Composites*, 104(June).
- Yost, J. R., Radlińska, A., Ernst, S., Salera, M., Martignetti, N. J.** 2013. "Structural behavior of alkali activated fly ash concrete. Part .Structural testing and experimental findings". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 46(3), 449–462.
- Yousuf, A., Manzoor, S. O., Youssouf, M., Malik, Z. A., Sajjad Khawaja, K.** 2020. "Fly Ash: Production and Utilization in India-An Overview". *J. Mater. Environ. Sci (C.* 2020).
- Yuan, J., He, P., Jia, D., Yang, C., Zhang, Y., Yan, S., Zhou, Y.** 2016. "Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers". *Ceramics International*, 42(14), 16184–16190.

- Yuan, Y., Zhao, R., Li, R., Wang, Y., Cheng, Z., Li, F., John Ma, Z.** 2020. "Frost resistance of fiber-reinforced blended slag and Class F fly ash-based geopolymer concrete under the coupling effect of freeze-thaw cycling and axial compressive loading". *Construction and Building Materials*, 250, 118831.
- Yunsheng, Z., Wei, S., Zongjin, L.** 2006. "Impact behavior and microstructural characteristics of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer boards prepared by extrusion technique". *Journal of Materials Science*.
- Zhang, B., MacKenzie, K. J. D., Brown, I. W. M.** 2009. "Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate". *Journal of Materials Science*, 44(17), 4668–4676.
- Zhang, M., Deskins, N. A., Zhang, G., Cygan, R. T., Tao, M.** 2018. "Modeling the Polymerization Process for Geopolymer Synthesis through Reactive Molecular Dynamics Simulations". *Journal of Physical Chemistry C*, 122(12), 6760–6773.
- Zhang, M. H., Shim, V. P. W., Lu, G., Chew, C. W.** 2005. "Resistance of high-strength concrete to projectile impact". *International Journal of Impact Engineering*, 31(7), 825–841.
- Zhu, X. C., Zhu, H., Li, H. R.** 2015. "Drop-weight impact test on U-shape concrete specimens with statistical and regression analyses". *Materials*, 8(9), 5877–5890.
- Ziada, M., Tanyıldızı, H., Uysal, M.** 2023. "Bacterial healing of geopolymer concrete exposed to combined sulfate and freeze-thaw effects". *Construction and Building Materials*, 369, 130517.
- Živica, V., Palou, M. T., Križma, M.** 2015. "Geopolymer Cements and Their Properties: A Review". *Building Research Journal*, 61(2), 85–100.