

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BAZALT LİFİ VE KARBON LİFİ İLAVELİ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU
ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şeyma AYDIN

MAYIS 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BAZALT LİFİ VE KARBON LİFİ İLAVELİ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU
ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE
ÖZELLİKLERİ**

Şeyma AYDIN

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02/04/ 2024

Tezin Savunma Tarihi : 15/ 05/ 2024

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Bazalt Lifi ve Karbon Lifi İlaveli Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Harçların Bazı Mekanik ve Durabilite Özellikleri” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Çalışmada %0.5 ve %1 oranlarında bazalt lif ve karbon lif ilave edilen yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçların bazı mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır.

Saygıdeğer danışmanım, Sayın Doç. Dr. Şirin KURBETCİ, tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için gerekli cihaz ve malzemelerin temininde, çalışmanın yürütülmesinde ve karşılaşılan zorlukların aşılmasında yol gösterici olmuştur. Kıymetli vaktini ayıran danışman hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, Arş. Gör. Dr. Memduh NAS’a ilgi ve yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak her zaman yanımda olup beni her koşulda destekleyen, babam Mustafa AYDIN, annem Zehra AYDIN ve tüm aileme teşekkür ederim.

Şeyma AYDIN

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bazalt Lifi ve Karbon Lifi İlaveli Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Geopolimer Harçların Bazı Mekanik ve Dayanıklılık Özellikleri” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Şirin KURBETCİ’nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 15/05/2024

Şeyma AYDIN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Geopolimer Harç Tarihçesi	3
1.2. Geopolimer Harç Üretimi.....	4
1.3. Geopolimer Harçların Bileşenleri	6
1.3.1. Alkali Aktivatörler	6
1.3.2. Uçucu Kül	7
1.3.3. Silis Dumanı.....	7
1.3.4. Yüksek Fırın Cürufu	8
1.3.5. Metakaolin	9
1.3.6. Agrega	9
1.4. Lifli Malzemeler.....	9
1.5. Geopolimer Harç Özellikleri	12
1.5.1. Donma Çözünme Direnci.....	12
1.5.2. Aşınma Direnci	13
1.5.3. Yangına Dayanıklılık	14
1.5.4. Su Emme ve Geçirimsizlik Özellikleri.....	15
1.5.5. Korozyon Özellikleri.....	16
1.5.6. Karbonatlaşma Direnci	16
1.5.7. Çiçeklenme Direnci.....	17
1.5.8. Asit Direnci	17
1.5.9. Sülfat Direnci	18
1.5.10. Alkali-Silika Reaksiyon Direnci	18

1.5.11. Basınç Dayanımı	19
1.5.12. Yarmada Çekme Dayanımı	20
1.5.13. Eğilme Dayanımı	21
1.6. Literatür Taraması	21
1.7. Amaç ve Kapsam.....	26
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27
2.1. Deney Programı.....	27
2.2. Kullanılan Malzemeler	27
2.2.1. Yüksek Fırın Cürufu	27
2.2.2. Agregası	28
2.2.3. Alkali Aktivatörler	30
2.2.4. Karbon Lif.....	30
2.2.5. Bazalt Lif.....	31
2.2.6. Su	32
2.3. Karışım Oranları.....	32
2.4. Geopolimer Harç Üretimi ve Kullanılan Cihazlar	33
2.5. Yapılan Deneyler.....	36
2.5.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	36
2.5.2. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri	37
2.5.3. Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi	38
2.5.4. Kılcal Su Emme Deneyi.....	38
2.5.5. Aşınma (Böhme) Deneyi	40
2.5.6. Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi.....	41
2.5.7. Su Emme Deneyi	42
2.5.8. Darbe Dayanımı Deneyi.....	43
3. BULGULAR.....	45
3.1. Yayılma ve Birim Ağırlık Deneyleri.....	45
3.2. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri	45
3.3. Kılcallık Deneyi	46
3.4. Aşınma (Böhme) Deneyi.....	46
3.5. Su Emme Deneyi.....	47
3.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi	47
3.7. Ultrases Hızı	49
3.8. Darbe Dayanımı Deneyi.....	49

4. TARTIŞMA	50
4.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	50
4.2. Basınç Dayanımları	51
4.3. Eğilme Dayanımları	53
4.4. Kılcallık Katsayıları	55
4.5. Hacimsel Aşınma Kayıpları	56
4.6. Su Emme Oranları	57
4.7. Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi	58
4.7.1. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Basınç Dayanımlarının Değişimi	58
4.7.2. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Eğilme Dayanımlarının Değişimi.....	60
4.7.3. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Kütle Kayıplarının Değişimi	61
4.8. Ultrases Hızı Deneyi	62
4.9. Darbe Dayanımı Deneyi.....	64
5. SONUÇLAR.....	66
6. KAYNAKLAR	69
7. EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

BAZALT LİFİ VE KARBON LİFİ İLAVELİ YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI GEOPOLİMER HARÇLARIN BAZI MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

Şeyma AYDIN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Şirin KURBETÇİ
2024, 78 Sayfa, 4 Sayfa Ek

Dünyadaki yıllık CO₂ salınımının %8'ini oluşturan çimento üretimini azaltacak alternatif bir malzeme kullanımı sürdürülebilir bir çevre oluşturulması açısından önemlidir. Geopolimer batonlar, atık malzemelerin üretime dâhil edilmesini sağlar, daha az enerji tüketimine sebep olur ve düşük CO₂ emisyonunu sağlar. Bunun yanı sıra geopolimerlerin gevreklik, düşük eğilme dayanımı ve bazı dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek amacıyla lif kullanımı konusunda araştırmalar sürdürülmektedir. Bu çalışmada öncül olarak yüksek fırın cürufu kullanılan harçlara bazalt lifi ve karbon lif ilavesinin bazı dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Geopolimer harçlar iki farklı dozajda (300 kg/m³ ve 320 kg/m³) üretilmiş; %0, %0.5 ve %1 oranlarında bazalt lifi ve karbon lif ilave edilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Üretilen numunelerin 1, 28 ve 180 günlük basınç ve eğilme dayanımları, ultrases geçiş hızları, su emme oranları, kılcallık katsayıları, aşınma kayıpları, darbe dayanımları ve 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklık sonrası mekanik özellikleri ve kütle kayıpları belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer harçlara bazalt lifi ve karbon lifi ilavesi basınç ve eğilme dayanımlarında artış oluşturmuş, su emme ve kılcallık katsayılarını azaltmış, darbe dayanımını arttırmış, yüksek dozajlı harçların aşınma kaybını azaltmıştır. 200°C sıcaklıkta basınç dayanımları artmış, 600°C ve 800°C'de mekanik özelliklerde oluşan kayıplar lif içermeyen harçlarla aynı düzeyde olmuştur. Lif türünün etkisi özelliklere göre değişmiş, en olumlu iyileşmeler genellikle %1 lif ilaveli harçlarda gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer, yüksek fırın cürufu, bazalt lif, karbon lif, yüksek sıcaklık

SUMMARY

SOME MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF BASALT FİBER AND CARBON FİBER REİNFORCED BLAST FURNACE SLAG BASED GEOPOLYMER MORTARS

Şeyma AYDIN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Şirin KURBETCİ
2024, 78 Pages 4 Pages Appendix

The use of an alternative material to reduce cement production, which accounts for 8% of the world's annual CO₂ emissions, is important for creating a sustainable environment. Geopolymer concretes allow waste materials to be incorporated into production, resulting in less energy consumption and low CO₂ emissions. In addition, research is being conducted on the use of fibers to improve the brittleness, low flexural strength and some durability properties of geopolymers. In this study, the effect of basalt fiber and carbon fiber addition to mortars using blast furnace slag as precursor on some strength and durability properties was investigated. Geopolymer mortars were produced at two different dosages (300 kg/m³ and 320 kg/m³) and basalt fiber and carbon fiber were added at 0%, 0.5% and 1%. Sodium hydroxide and sodium silicate were used as alkali activators. Compressive and flexural strengths, ultrasonic pulse velocity, water absorption, capillarity coefficients, abrasion losses, impact strengths and mechanical properties and mass losses after exposure of 200°C, 400°C, 600°C and 800°C temperatures were determined. The addition of basalt fiber and carbon fiber to blast furnace slag based geopolymer mortars increased the compressive and flexural strengths, decreased the water absorption and capillarity coefficients, increased the impact strength, and reduced the abrasion loss of high dosage mortars. Compressive strength increased at 200°C, and losses in mechanical properties at 600°C and 800°C were at the same level as mortars without fibers. The effect of fiber type varied according to the properties and the most positive impact was generally observed in mortars with 1% fiber addition.

Keywords: Geopolymer, blast furnace slag, basalt fiber, carbon fiber, high temperature

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Geopolimer harç üretimi (Singh, 2020)	5
Şekil 2. GPH kompozitlerde kullanılan tipik takviye lifleri (Amran vd., 2022)	10
Şekil 3. Üretimlerde kullanılan yüksek fırın cürufu	28
Şekil 4. Elenerek sınıflara ayrılmış kum	29
Şekil 5. Kullanılan agreganın granülometri ve sınır eğrileri	29
Şekil 6. (a) Katı NaOH, (b) NaOH çözeltisi.....	30
Şekil 7. Geopolimer harç karışımlarında kullanılan karbon lifler	31
Şekil 8. Geopolimer harç karışımlarında kullanılan bazalt lifler.....	31
Şekil 9. İri agregaların çeneli kırıcılardan geçirilme işlemi	33
Şekil 10. Kullanılan elekler ve elek sarsma cihazı	33
Şekil 11. Arşimet terazisi	34
Şekil 12. Üretimde kullanılan betoniyer.....	34
Şekil 13. Taze harç karışımına lif ilave edilmesi.....	35
Şekil 14. Harcın kalıplara yerleştirilmesi	35
Şekil 15. Deneylerde kullanılan buhar kürü tankı	36
Şekil 16. Yayılma tablası deney seti.....	36
Şekil 17. Basınç dayanımı deneylerinde kullanılan çimento presi.....	37
Şekil 18. Eğilme deneylerinde kullanılan çimento presi	37
Şekil 19. Deneyde kullanılan UPV cihazı	38
Şekil 20. Numuneleri kurutmak için kullanılan Geniar markalı etüv.....	39
Şekil 21. Deneylerde kullanılan Radway marka hassas terazi	39
Şekil 22. (a) Deney düzeneği, (b) Deney sonrası numune görüntüleri.....	40
Şekil 23. Aşınma deney düzeneği.....	41
Şekil 24. Ref-San marka yüksek sıcaklık fırını	42
Şekil 25. Su emme deney düzeneği	43
Şekil 26. Darbe test cihazı	43
Şekil 27. 300 dozlu numunelere ait yayılma çapı değerleri	50
Şekil 28. 320 dozlu numunelere ait yayılma çapı değerleri	51
Şekil 29. 300 dozlu numunelere ait basınç dayanım değerleri	52
Şekil 30. 320 dozlu numunelere ait basınç dayanım değerleri	53

Şekil 31. 300 dozlu numunelere ait 1, 28 ve 180 günlük eğilme dayanımı değerleri	54
Şekil 32. Geopolimer harç içinde kümelenen lif topakları	54
Şekil 33. 320 dozlu numunelere ait 1, 28 ve 180 günlük eğilme dayanımı değerleri	55
Şekil 34. Lif türü ve oranlarına bağlı olarak kılcallık katsayılarının değişimi	56
Şekil 35. Lif türü ve oranlarına bağlı olarak hacimsel aşınma kayıplarının değişimi	57
Şekil 36. Lif türü ve oranlarına bağlı olarak su emme yüzdelerinin değişimi.....	58
Şekil 37. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 300 dozlu numunelerin basınç dayanımı değerleri	59
Şekil 38. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 320 dozlu numunelerin basınç dayanımı değerleri	60
Şekil 39. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 300 dozlu numunelerin eğilme dayanımı değerleri	61
Şekil 40. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 320 dozlu numunelerin eğilme dayanımı değerleri	61
Şekil 41. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 300 dozlu numunelerin kütle kaybı oranları	62
Şekil 42. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 320 dozlu numunelerin kütle kaybı oranları	62
Şekil 43. 300 dozlu numunelere ait ultrases hızları ve basınç dayanımları.....	64
Şekil 44. 320 dozlu numunelere ait ultrases hızları ve basınç dayanımları.....	64
Şekil 45. Darbe dayanımı değerleri	65

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. YFC'nin kimyasal bileşimi	27
Tablo 2. Kırma kuma ait fiziksel özellikler	28
Tablo 3. ASTM C33'e uygun ince agrega sınır değerleri	29
Tablo 4. Karbon lifine ait teknik özellikler	31
Tablo 5. Bazalt lifine ait teknik özellikler	32
Tablo 6. Beton bileşimleri	32
Tablo 7. Harçlara ait yayılma çapları ve birim ağırlık değerleri	45
Tablo 8. Basınç ve eğilme dayanımı değerleri	46
Tablo 9. Harçlara ait kılcallık katsayıları	46
Tablo 10. Harçlara ait hacimsel aşınma kaybı değerleri	47
Tablo 11. Harçlara ait su emme yüzdeleri	47
Tablo 12. Yüksek sıcaklığın harçlar üzerindeki etkisi	48
Tablo 13. Harçlara ait ultrases hızı değerleri	49
Tablo 14. Harçlara ait darbe dayanımı değerleri	49

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

GPH	: Geopolimer harç
GB	: Geleneksel beton
GP	: Geopolimer
UK	: Uçucu kül
YFC	: Yüksek fırın cürufu
SD	: Silis dumanı
MK	: Metakaolin
PL	: Polimer lif
KL	: Karbon lif
CL	: Cam lif
BL	: Bazalt lif
PE	: Polietilen lif
PP	: Polipropilen lif
PVA	: Polivinil alkol lif
ÇL	: Çelik lif
ASR	: Alkali-silika reaksiyonu
MS	: Mikro SiO ₂
SH	: NaOH
SS	: Na ₂ SiO ₂

1. GENEL BİLGİLER

Beton en yaygın kullanılan yapı malzemeleri arasında yer alır. Betonun ana bileşenlerinden olan çimento üretiminin sebep olduğu çevresel etkiler ile ilgili çözülmesi gereken bazı problemler vardır.

Portland çimentosunun üretimi, yüksek miktarda enerji gerektirir ve kullanılan enerjinin büyük bölümü fosil kaynaklıdır. Çimento üretimi dünyanın yıllık karbon gazı salınımının %8'i gibi önemli bir kısmından sorumludur, dolayısıyla küresel ısınmada payı yüksektir. Bunların yanı sıra toz salınımı, hava, su ve toprak kirliliği, gürültü gibi çevresel sorunların varlığı bilim adamlarını portland çimentosuna alternatif olarak kullanılabilecek bir malzeme arayışına sevk etmiştir (Kuleli, 2010). Konuyla ilgili yaklaşımların önemli bir bölümü beton içerisinde bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun kısmen veya tamamen kaldırılıp yerine daha çevreci bağlayıcıların kullanılabileceği yönündedir. Çimento kullanımının tamamen ortadan kaldırıldığı geopolimer harçların (GPH) üretimi ve yaygınlaşması bahsedilen problemlere çözüm getirebilecek önemli gelişmelerdendir.

Çimento sektörünün çatı birliği TÜRKÇİMENTO, 2022 yılının ilk 9 ayına ait çimento üretim ve satış rakamlarını 53 milyon 673 bin ton olarak açıklamıştır (URL-1). Rakamların bu denli yüksek oluşu çimento üretimi sırasında açığa çıkacak CO₂ miktarının da benzer oranda yüksek olduğunu göstermektedir. GPH üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ miktarı, geleneksel betonun (GB) üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ miktarına kıyasla %80 oranında azalmaktadır. Bu nedenle GPH'lerin GB'lere göre ekonomik ve daha çevreci olduğu söylenebilir (Davidovits, 1994).

Geopolimer (GP), kireç ve portland çimentosundan sonra üçüncü kuşak çimento olarak kabul edilmektedir. Joseph Davidovits geopolimeri alimünosilikatça zengin hammaddelerin uygun kür şartları altında Na₂SiO₃ gibi çözünür silikatlar ve NaOH veya KOH gibi alkali çözeltilerle reaksiyona girmesi sonucu SiO₄ ve AlO₄ bileşiklerinden oluşan "poli-silikat" (Si-O-Al-O) üç boyutlu polimerik zincir yapısına sahip çevreci malzeme olarak tanımlamıştır (Davidovits, 1994; Torgal vd., 2008).

GP'ler farklı şekillerde adlandırılmaktadırlar. Bu adlandırmalara "inorganik polimerler", "alkali ile aktive edilmiş çimentolar", "geocementler", "alkali-bağlı seramikler", "hidroseramikler" gibi örnekler verilebilir (Singh vd., 2015).

GP bağlayıcı üretiminde kullanılan alüminosilikat esaslı toz malzemeler; doğal puzolanlar (volkanik tuf, volkanik cam ve tras), kalsine edilmiş alüminosilikatlar (metakaolin, kalsine edilmiş kil) ve çeşitli endüstrilerin atığı olarak ortaya çıkan alüminosilikat malzemeler (yüksek fırın cürufu, uçucu kül) dir. Toz malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mineralojik özellikleri GP bağlayıcının beton içindeki davranışını direkt olarak etkilemektedir. Bu sebeple kullanılacak toz malzemenin özelliklerinin bilinmesi, ortaya çıkacak GP bağlayıcının etkisinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir (Tuyan, 2017).

GP bağlayıcı sistemler teknik açıdan birden fazla avantaja sahiptir. Bu avantajlardan bir tanesi sülfat etkisine karşı çimento esaslı bağlayıcı sistemlere kıyasla yüksek performans göstermeleridir. GP bağlayıcı üretimi için kullanılan toz malzemelerin kimyasal yapılarından dolayı, aktivasyon sonucu oluşan bağlayıcı üründe alçı ve etrenjit bulunmadığı için sülfat dirençleri oldukça yüksektir (Chindaprasirt vd., 2014). Bir diğer avantaj ise, GP bağlayıcı sistemlerde alkali-silika reaksiyonunun oluşmamasıdır (García-Lodeiro vd., 2007). Fakat bu sistemlerin avantajları yanı sıra çeşitli dezavantajları da vardır. En önemli dezavantajlarından bir tanesi, endüstriyel yan ürün olarak elde edilen toz alüminosilikat malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin sabit olmaması nedeniyle kalite kontrol açısından sorunlara sebep olmasıdır. Özelliklerdeki değişkenlikler ana ürünün üretiminde önemli etkilere sahiptir. Bu durum prosese girecek olan her ürünün ayrıca analiz ve araştırılmaya tabi tutulması anlamına gelir.

GP bağlayıcılı sistemlerin işlenebilirliği çimento bağlayıcılı sistemlere kıyasla daha düşüktür. Alkali aktivasyon için kullanılan aktivatörlerin yüksek viskoziteye sahip olmaları sebebiyle oluşan karışımın işlenebilirliği olumsuz etkilenmektedir (Pacheco-Torgal vd., 2015).

GP'lerin çeşitli uygulama alanları mevcuttur. Fransa'da bulunan GP Enstitüsü'nün belirttiği potansiyel uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

- Prefabrik taşıyıcı eleman olarak.
- Kimyasal ve zararlı etkilere maruz kalan elemanlarda.
- Yüksek sıcaklıkla sürekli temas halinde olan elemanlarda termal yalıtım malzemesi olarak (Kantarcı, 2018).

Uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC), silis dumanı (SD) gibi endüstriyel atıklar bir kullanım alanı bulunamadığında büyük depolama alanları gerektirdiklerinden önemli çevresel problemlere yol açarlar. Puzolonik özellik taşıyan bu endüstriyel atıklar, alkaliler

ile aktive edilerek GPH üretiminde kullanılabilirler ve harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlarlar (Şinik, 2019). Atıkların neden oldukları pek çok çevresel ve ekonomik sorunun etkilerini azaltmak için geopolimerizasyon güvenli bir geri dönüşüm yöntemi olarak tavsiye edilmektedir.

GPH'ler sahip oldukları pek çok özellik bakımından sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında kabul edilirler. Bu özellikler aşağıda verilen şekilde sıralanabilir.

- Enerji tasarrufu ve verimlilik.
- Düşük karbon emisyonu.
- Azaltılmış küresel ısınma potansiyeli.
- Uzun süreli dayanıklılık.
- Atık malzeme kullanımı (Amran vd., 2021).

1.1. Geopolimer Harç Tarihçesi

1930 yılında Kuhl, YFC ile KOH çözeltisini birleştirerek priz süresini tespit etmeyi amaçlayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. 1937 yılına gelindiğinde Chassevent KOH ve NaOH'ı beraber kullanarak YFC'yi aktive etmiş ve cürufun reaktivitesini araştırmıştır (Shi vd., 2011). Purdon (1940) ise Belçika'da gerçekleştirdiği çalışmada, NaOH çözeltisiyle YFC'yi aktive etmiş ve sonucunda 25 MPa dayanıma ulaşmayı başarmıştır. NaOH'ın cürufun priz süresinde önemli bir görev üstlendiği ve reaksiyonda katalizör olarak görev yaptığını belirtmiştir.

1950'li yıllarda 2. Dünya savaşı sonrasında Portland çimentosunun çevreye olan zararlı etkileri görülmüş ve Portland çimentosu yerine kullanılabilecek malzemeler ile ilgili araştırmalar yapılmaya başlanılmıştır. Glukhovsky vd. (1980) alüminyum ve silisyum içeren malzemelerin alkalilerle aktivasyonunun sonuçlarını incelemişlerdir. Beton üretiminde çimento yerine YFC kullanarak portland çimentosunun olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaya çalışmışlardır. Elde ettikleri malzemenin oldukça dayanıklı olduğunu tespit edip ileride yapılacak olan çalışmaların ilk adımlarını atmışlardır.

1970-1973 yılları arasında, Prof. Dr. Joseph Davidovits yanmayan plastikler üzerine araştırmalar yapmıştır. Yarı kristalize üç boyutlu siliko-alüminat amorf malzemeler üzerine çalışarak geopolimerleri geliştirmiştir (Davidovits, 2002). "Geopolimer" ifadesi ilk defa 1978 yılında Prof. Dr. Joseph Davidovits tarafından alüminosilikat esaslı inorganik polimerlerin tanımı için kullanılmıştır (Davidovits, 1991).

GP bağlayıcılar, kimya alanının yanı sıra çeşitli mühendislik bölümlerinin de dikkatini çekmiştir. Çevreci olmalarıyla birlikte erken yüksek dayanımları, asit ve sülfat direnci gibi avantajlarından dolayı GP'ler, geleneksel Portland çimentosuna alternatif olabilecek potansiyele sahiptirler. Asit dirençlerinin yüksek olması GPH'lerin kalsiyum silikat hidratlı bağlayıcılardan ziyade alüminosilikat esaslı olmaları nedeniyledir (Thokchom vd., 2009).

GPH'ler kısa sürede yüksek dayanım kazanabilmeleri sebebiyle köprüler, hava yolları, istinat duvarları, karayolları, restorasyon işleri gibi birden fazla alanda kullanılmaktadır. Dünya'nın en geniş GPH projesi Avustralya'da 2014 yılında açılan Brisbane West Wellcamp havalimanıdır. İnşaatında 40.000 m³ GPH kullanılmıştır (URL-2).

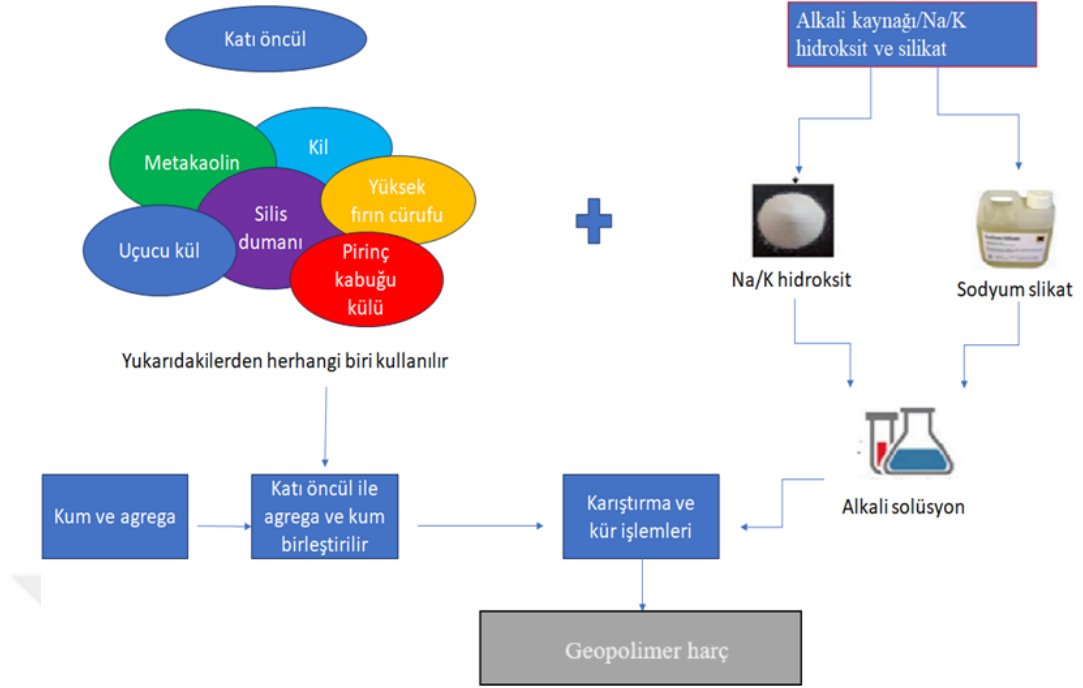
1.2. Geopolimer Harç Üretimi

GP serbest silis ve alüminli malzemelerin sodyum hidroksit, potasyum hidroksit ve sodyum silikat gibi alkaliler ile aktivasyonu sonucu oluşan bağlayıcı malzeme olarak tanımlanır. GP oluşumundaki reaksiyonlar aşağıdaki gibi şematize edilebilir (Topçu &Toprak, 2009).

(Si-Al içeren malzemeler) + (Alkaliler) = (Geopolimer ara bileşeni)

(Geopolimer ara bileşeni) + (Alkaliler) = (Geopolimer)

Alkaliler ile aktivatörler arasında oldukça hızlı gerçekleşen kimyasal tepkimeler “geopolimerizasyon” olarak tanımlanmaktadır. Çeşitli alüminyum, silisyum ve oksijen atomlarının, bazik bir ortamdaki reaksiyonu sonucu alimünosilikat polimeri olarak adlandırılan Si-O-Al-O yapısal zincirini oluşturduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda inorganik polimerler olan GP'ler, amorf bir yapıdan yarı kristal bir yapıya geçerler. Böylece dayanım ve dayanıklılık açısından güçlü bir malzeme elde edilir. Oluşan bu yapı GPH adını alır (Xu & Deventer 2000). GPH üretimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Geopolimer harç üretimi (Singh, 2020)

GPH üretiminde kullanılmak üzere YFC, SD, UK vb. puzolanik malzemelerden seçilen katı öncül ile ince agregâ birleştirilir. Bu karışıma sodyum hidroksit ve sodyum silikat bileşiminden oluşan alkali solüsyon ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırma işlemi sağlanır. Elde edilen homojen karışım kalıplara yerleştirilir ve ardından kür işlemine tabi tutulur.

En sade haliyle geopolimerizasyon, fırınlanmış kilin yapısındaki alüminat ve silikatların oksijen atomu elektronlarını ortak kullanarak kovalent bağlı bileşikler oluşturması şeklinde tanımlanabilir. GP malzemelerin yapısındaki genellikle ısı ile aktifleştirilmiş alüminyum ve silisyum oksitli bileşikler, alkaliler ile aktive edilerek moleküler arası bağları güçlendirilmekte ve polimeri oluşturmaktadır. GP'ler kristal ya da amorf yapıda olabilirler. Doğal kayalara benzer bir yapıları vardır (Polat, 2019).

GP malzemelerin üretimi üç ana teknik içerir:

- Dökme yöntemi: Bu, geleneksel harç hazırlama işlemi gibidir ve en yaygın kullanılan hazırlama yöntemidir. Bu hazırlama yönteminde, uygun bir akışkanlıkta hamur elde etmek için çimentomsu maddenin kütlelerinin ~%20-40'ı kadar ekstra su gereklidir.
- Sıkıştırma kalıplama: bu teknikte, her bir alüminyum silikat katı madde ve alkali aktivatör solüsyonu, yapışkan bir koloidal bulamaç halinde karışır. Karışım

hazırlandıktan sonra 5–10 MPa altında preslenir ve kalıplanır. Böylece yaklaşık 100 MPa'ya kadar yüksek dayanım sağlanır (Wang vd., 2005).

- Sıcak pres yöntemi: Yüksek mekanik mukavemet elde etmek için ısı ve basınç aynı anda uygulanır. Bu sayede GP matrisi neredeyse gözeneksiz bir yapıya sahip olur (Ranjbar, 2017).

Önceki yöntemlerin yanı sıra, birkaç araştırmacı, GP maddelerin oluşumunu iyileştirmek için mikrodalga destekli yöntem, ultrasonik destekli yöntem ve benzeri diğer teknikleri kullanmaktadır (Feng vd., 2004).

1.3. Geopolimer Harçların Bileşenleri

1.3.1. Alkali Aktivatörler

Alüminosilikatlı toz malzemeler harç üretiminde tek başlarına kullanıldıklarında bağlayıcılık özelliği göstermezler. Bu malzemeler çimento yerine kullanabilmek için alkali aktivatörler yardımıyla aktifleştirilmeleri gerekir (Ekmen & Mermertaş, 2018). Alkali aktivatörler, GPH'lerin temelini oluşturmaktadır. GPH üretimi için yaygın olarak kullanılan alkali aktivatörler sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum hidroksit (NaOH) veya sodyum hidroksit içeren bir potasyum hidroksit (KOH) karışımıdır (Özbey, 2021). Alkali aktivatörler, GP bağlayıcı üretiminde alüminosilikat malzemelerden sonra en önemli ikinci bileşen konumundadır.

Yapılan çalışmalarda kimyasal aktivatörler içerisinde yapının performansına en olumlu etkiyi Na_2SiO_3 ve NaOH çözeltilerinin sağladığı tespit edilmiştir. Alkali aktivasyon ile aktive edilecek olan hammaddelerin cinsine bağlı olarak farklı mikro yapıda reaksiyon ürünleri ortaya çıkabilmektedir (Mohammed vd., 2021).

Alkali katyon olarak Na, K veya ikisinin birlikte kullanılması özellikle metakaolin (MK) içerikli GP'lerin çeşitli özelliklerini etkilemektedir. Tek başına potasyum kullanılması durumunda geopolimerik jel oluşumu çok daha yavaş gerçekleşmektedir (Lloyd & Rangan, 2010). Rangan (2014) yaptığı çalışmada, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının yüksek olmasının yüksek basınç dayanımı sağladığını gözlemlemiştir. Hidroksit iyonunun konsantrasyonu arttıkça aktivatör solüsyonundaki silikat iyonlarının polimerizasyon dereceleri ile alüminosilikatların çözünürlüğü artmaktadır. Çözünebilir alüminyum ile tepkimeye giren

küçük monomerik silikatlar, yüksek pH değerinde aktif hale gelirler (Khale & Chaudhary 2007; Zaharaki vd., 2010).

1.3.2. Uçucu Kül

GPH'ler mukavemet kazanabilmek için bağlayıcı malzemelere ihtiyaç duyarlar. Bunlardan bir tanesi ise UK'dir. UK'ler TS EN 450-1 standardına göre "Pulverize kömürün yanmaya yardımcı malzemeler ile birlikte veya tek başına yakılmasından elde edilen, puzolanik özelliklere sahip olan ve esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 'ten meydana gelen malzeme" olarak tanımlanır (TSE, 2015). UK'ler ciddi atık potansiyeline sahip malzemeler olarak karşımıza çıkarlar. Atık malzemelerinin beton üretiminde kullanılması çevre açısından ve enerji maliyetlerini düşürmek açısından çok önemlidir. ASTM C 618 (2000) standardına göre UK'ler F ve C tipi olarak ikiye ayrılır. F tipi, bitümlü kömürden üretilen ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %70'den fazla olan UK'lerden oluşmaktadır. Bu küllerde CaO yüzdesi %10'un altında olduğu için düşük kireçli olarak da isimlendirilir. F-tipi UK'de malzeme içeriği genellikle silisli ve alüminli olduğu için beton katkı maddesi olarak kullanılmasında fayda vardır (Kalaycıklı, 2020).

C sınıfı UK'ler ise, linyit veya yarı-bitümlü kömürden üretir ve toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı % 50'den fazladır. C sınıfı UK'lerde $\text{CaO} > \%10$ olduğu için bu küller yüksek kireçli UK olarak da isimlendirilir.

Yakılan kömürün kaynağına bağlı olarak UK'nin bileşenleri önemli ölçüde değişir. Si/Al oranı elde edilen GP malzemelerin nihai yapısını önemli ölçüde belirlemektedir. Örneğin, UK reaktantındaki Si/Al oranının, GP ürünlerin mekanik dayanımını yöneten önemli parametrelerden biri olan amorf GP'nin gözenekliliği (boyutu ve miktarı) üzerinde dikkate değer bir etkisi olduğu tespit edilmiştir (Zhuang vd., 2016).

1.3.3. Silis Dumanı

SD elektronik endüstrisinde kullanılan saf silisyum ve alaşımlarının yüksek sıcaklıkta elektrik ark fırınlarında ısıtılmasıyla elde edilir. Yüksek sıcaklık etkisiyle SiO_2 ye dönüşen silis, baca külü olarak ortaya çıkar. SD yüksek silis içerdiğinden dolayı önemli puzolanlar arasında yer alır. SD son derece ince tanelidir. Yüksek silis içeriği ve ince taneli oluşu puzolanik aktivitesini olumlu yönde etkilemektedir.

Duan vd. (2017) SD kullanılarak GPH üretilebilirliğini ve üretilen numunelerin yüksek sıcaklıklara dayanımını test etmişlerdir. Araştırma sonucunda üretimde SD kullanımının harç matrisinin iyileştirilmesinde önemli katkı sağladığı ortaya koyulmuştur. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numunelerde, eklenen SD'den bağımsız olarak bir mukavemet kaybı ve fiziksel davranışta bir azalma gözlenmiştir.

Okoye vd. (2017) UK bazlı GPH'ye SD dahil edilmesinin etkilerini kapsayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Numunelerin klorür ve asit saldırılarına karşı direncini araştırmışlardır. Üretilen prefabrik GPH ile GB'nin mukavemet ve ağırlık kayıplarındaki değişim karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak SD ilavesinin asit saldırılarına karşı dayanım performansında önemli bir iyileşme gösterdiği kanıtlanmıştır.

GPH'ye SD gibi bir atık malzemenin dahil edilmesi GP sistemine ilave silikat ekleyebilir. Dolgu malzemesi olarak kullanıldığında ise, bağlayıcı malzemelere göre daha küçük parçacık boyutunu korurken daha mükemmel dayanıklılık ve daha iyi mukavemet sağlar (Premkumar vd., 2022)

1.3.4. Yüksek Fırın Cürufu

Demir-çelik tesislerinde yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında ortaya çıkan yan ürünlerden bir tanesi de YFC'dir. YFC aniden soğutularak irili ufaklı taneli granüle hale gelir ve daha sonrasında öğütülür. Öğütülen bu malzeme çimentoya katılabilir ya da betonda ayrı olarak da kullanılabilir. Cüruf yapısında yüksek miktarda CaO bulundurması sebebiyle bağlayıcı özelliğe sahiptir.

Bir ton çelik üretiminden yaklaşık olarak 250 kilo kadar YFC açığa çıkar. Bu atık olan malzemeyi değerlendirmek için YFC çimentolu bağlayıcı sistemlerde ya da GPH üretiminde kullanılabilir (Bilgen, 2010).

YFC içeriğinde SiO_2 yaklaşık olarak %28-%38, Al_2O_3 miktarı yaklaşık %8-%24, CaO miktarı %30-%50 ve MgO miktarı da yaklaşık %1-%18 civarındadır. YFC içeriğinde CaO bulunması bağlayıcılık özelliği kazanmasını sağlar. İçeriğinde kil ve silt bulunmadığı için harç içerisinde aderansı artırıcı yönde katkı sağladığı söylenebilir (Keklik, 2020).

YFC, GPH üretiminde güvenilir bir kaynak malzemedir ve üretimde yaygın olarak kullanılır. Hem UK, YFC' de SiO_2 ve Al_2O_3 ' ün bolluğu, geniş bulunabilirliği ve uygun fiziksel ve kimyasal özellikleri, GP bağlayıcıların geliştirilmesinde yüksek kullanım

oranlarının nedenleridir. YFC önemli miktarda CaO ve MgO içerdiğinden matrise daha iyi stabilite sağlar ve kürleme sıcaklığının düşürülmesine yardımcı olur.

1.3.5. Metakaolin

MK, kaolin killeri 700°C ila 800°C arasındaki sıcaklıklarda kalsine edilerek üretilir. Kalsinasyon işlemi sayesinde yüksek derecede reaktif bir puzolanik malzeme elde edilir. Kalsinasyon işlemi sayesinde su kaolinit kilinden ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dışarı atılır. Böylece amorf bir alümina-silikat ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) olan MK veya metakaolinit ayrışır. MK parçacıkları yassı yapıda, köşeli ve pürüzlü yüzeye sahiptir. Alüminyum açısından zengin olması ve alkali aktivasyonunun kolay olması nedeniyle çok kullanılan öncülerden biridir. Metakaolinin silika içeriğinin daha yüksek olması, GPH'deki bağı artırır ve bu da GPH'nin mekanik özelliklerini iyileştirir (Gómez-Casero vd., 2022).

1.3.6. Agregalar

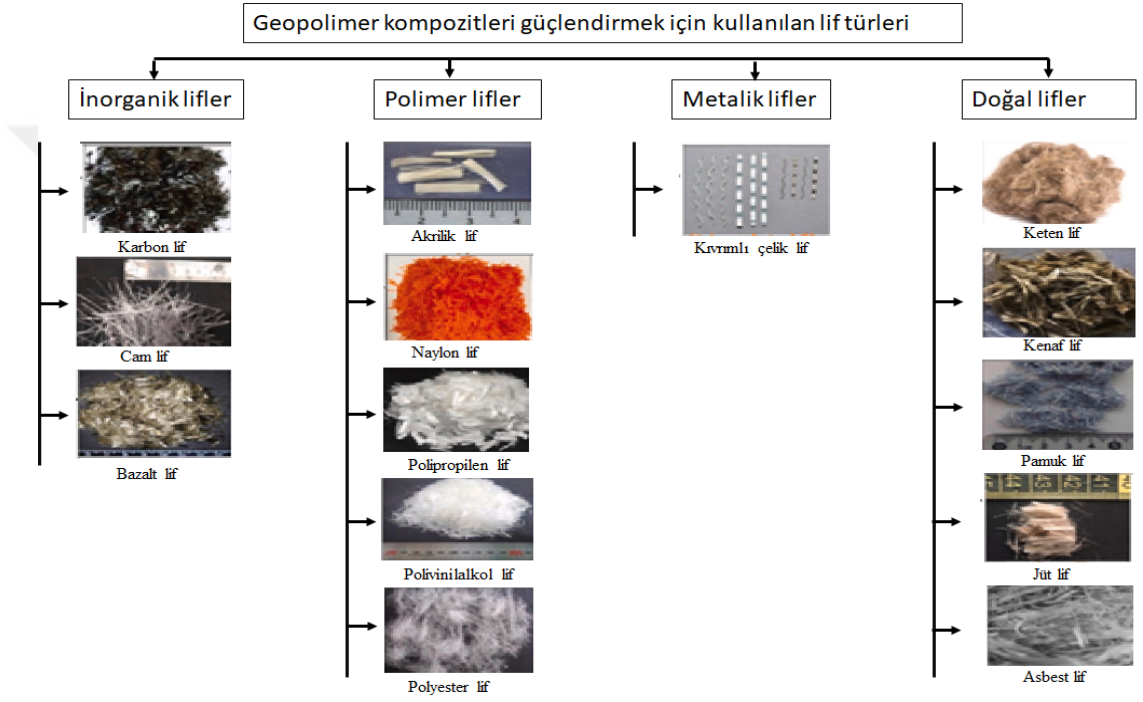
TS EN 206 standardına göre agregalar, “betonda kullanıma uygun taneli mineral malzeme” olarak ifade edilmektedir. Agregalar, doğal, yapay veya atık malzemelerin geri dönüştürülmesi elde edilmiş olabilir. Normal beton hacminin yaklaşık olarak %70–75 'i agregalar tarafından oluşmaktadır. Agregaların ekonomik ve dayanıklı olmaları beton üretiminde kullanılmalarının en önemli nedenlerindendir. Agregalar betonun hem dayanımını hem de davranışını etkilemektedir. Betonun kısa veya uzun süreli performansında agregalar çimento hamuru arasındaki aderansın etkisi büyüktür. Agregalar tane dağılımının iyi olması halinde daha ekonomik beton üretimi sağlanabileceği bilinmektedir (Erdoğan, 1995). GB'de olduğu gibi GP'de de agregalar kullanımı söz konusudur.

1.4. Lifli Malzemeler

GPH'lerin eğilme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini arttırmak için takviye olarak çeşitli lifler kullanılır. Lifler, harç içinde uygulanan yükün bir kısmını üzerinde taşıyarak yükün kontrollü şekilde dağılmasını sağlar ayrıca gerilmeyi numunenin kırılmamış bölgelerine aktararak da numunede birden fazla mikro çatlağın oluşmasına olanak tanır (Ganesan vd., 2015). Takviye olarak kullanılacak liflerin seçiminde aşağıda yer alan üç ana unsurun dikkate alınması gerekir.

- Malzeme özelliklerinin uygulama ile uyumluluğu.
- Gerilmeleri iletmek için yeterli lif-matris etkileşimi.
- Çatlama sonrası beklenen davranışı gösterebilmesi için optimum en boy oranı (Ranjbar & Zhang, 2020).

GPH'nin performansını iyileştirmek için kullanılan lif türleri inorganik lifler, metalik lifler, polimer lifler (PL) ve doğal lifler olarak gruplandırılabilir. Şekil 2'de GPH kompozitlerde kullanılan lifler görülmektedir.



Şekil 2. GPH kompozitlerde kullanılan tipik takviye lifleri (Amran vd., 2022)

İnorganik lifler minerallerden elde edilen bir çeşit kimyasal liftir. Yaygın kullanılan çeşitleri bazalt lif (BL), cam lif (CL) ve karbon (KL) liftir.

KL esasında karbon atomlarının bir araya getirilmesi ile oluşan inorganik bir lif çeşididir. KL yaygın olarak yüksek çekme mukavemeti, düşük yoğunluk, alkali direnci, termal stabilite, düşük termal genleşme ve iyi yorulma direnci özelliklerine sahip olması ile bilinir. Ayrıca, KL takviyeli uygun şekilde tasarlanmış GPH'ler elektriksel iletkenliğin ve manyetik duyarlılığın geliştirilmesinde kullanılabilirler (Vaidya & Allouche, 2011). GPH'ye KL ilave edilmesi eğilme ve çekme dayanımını önemli ölçüde arttırmakla birlikte aynı zamanda darbe direncini ve çatlak ilerleme direncini de arttırdığı kanıtlamıştır (Liu vd. 2020).

Dünya yüzeyinin yaklaşık %70'ini kaplayan bazalt (volkanik) kayaların bolluğu nedeniyle, BL en sürdürülebilir liflerden bir tanesi olarak kabul edilmektedir (Lopresto vd., 2011). BL, bazalt agregasının işlenmesi ile elde edilir. Üretimi CL üretimine benzerdir ancak herhangi bir kimyasal madde içermez. Ayrıca enerji tüketimi düşüktür. BL'ler üç boyutlu moleküler yapıya sahip olması bakımından tek boyutlu PL'lere kıyasla ilave edildiği GPH'nin yarmada çekme mukavemeti, eğilme dayanımı ve kırılma tokluğu gelişimine önemli miktarda katkı sağlar. Tüm bunların yanı sıra BL'ler hafiflik, yüksek mukavemet ve korozyon direnci avantajlarıyla GPH üretiminde tercih sebebidir (Li vd. 2020).

CL pirofilit, kuvars kumu, kireçtaşı, dolomit, borasit ve boehmitin yüksek sıcaklıkta eritilip küçük deliklerden geçirilerek katılaştırılmasıyla elde edilir. CL'ler üstün mühendislik özelliklere sahip inorganik liflerdir. Harca kazandırdıkları iyi yalıtım özellikleri, yüksek korozyon direnci, gelişmiş mekanik özellikler nedeniyle tercih edilebilir ancak kırılma ve zayıf aşınma direnci özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır (Rashedi vd. 2022). Yapılan bazı çalışmalar CL'lerin GPH içindeki mikro çatlakları ortadan kaldırılabildiği ve bu sayede çatlaksız yüksek tokluğa sahip GP üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymuştur (Kumar vd. 2021).

Polimer lifler (PL) makromoleküler bileşiklerden oluşurlar. PL yüksek korozyon direnci, düşük maliyet ve hafiflik özellikleri nedeniyle yol, köprü ve yeraltında sürdürülen mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. GPH'de çatlak oluşumunu engelleyerek malzeme dayanıklılığını artırabilir. GPH'nin dayanıklılığını arttırmak için yaygın olarak kullanılan polimer lif çeşitleri polietilen (PE) lif, polipropilen (PP) lif ve polivinil alkol (PVA) lifi kapsar (Al-Majidi vd. 2019). Fakat bazılarının yüksek maliyeti, bunların kullanımını sınırlamaktadır. PE ve PVA gibi nispeten yüksek mekanik özelliklere sahip elyaflara erişim daha sınırlı iken, PP gibi düşük mekanik özelliklere sahip daha az maliyetli elyaflara erişim ve bunların geliştirilmesi daha kolaydır (Ünal vd., 2023). Ünal vd. (2023) yaptıkları derleme çalışmasında birçok araştırmacının PP, PVA ve PE elyaflarının eklenmesinin GP'lerin basınç dayanımını azalttığını sonucuna vardığını belirtmişlerdir.

Çelik lifler (ÇL) temelinde soğuk çekilmiş çelik türlerinden elde edilir. Genellikle yuvarlak, kare veya dikdörtgen kesit şekline sahiptirler. Kancalı, düz, oluklu vb. şekilde geometrik yapıya sahip olabilirler. ÇL'lerin kullanımının çimentolu malzemelerin sünekliğini, tokluğunu ve eğilme mukavemetini geliştirdiği, enerjiyi yutma kapasitesini arttırdığı, çatlaklar arasında köprü bağlantısı yaparak, yük aktarımı yaptığı, rötre, sünme ve geçirimsizliği azalttığı, yorulma ve darbe dayanımını arttırdığı belirtilmektedir (Wang vd.,

2023). Birçok pratik avantajına rağmen ÇL ile ilgili temel sorun korozyondur. Korozyonu sınırlamak için ÇL sıklıkla paslanmaz çelik alaşımları veya galvanizli olarak kullanılmaları gerekir.

Çevre sorunları ve çevre dostu ve enerji verimli malzemelerin geliştirilmesi gerekliliği göz önüne alındığında, jüt , kenevir, kenaf, kûspe ve sisal gibi monofilament selülozik lifler , çimentolu kompozitlerde sentetik liflere alternatif olarak kabul edilmektedir. Bu lifler düşük fiyata, düşük yoğunluğa, düşük ısı iletkenliğe ve kabul edilebilir mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, bu liflerle ilgili bazı problemler vardır. Bunlar düşük dayanıklılık, değişken malzeme özellikleri ve matrisle zayıf etkileşimdir (Ardanuy vd., 2015). Bitkisel liflerin mekanik özellikleri hidrofobik veya hidrofilik özelliklerinin yanı sıra çap ve uzunluk gibi fiziksel özelliklerine de bağlıdır. Bitki liflerinin çekme mukavemeti, lif uzunluğunun artmasıyla azalır, çünkü daha uzun lifler daha fazla kusura sahip olabilir ve bu nedenle kısa liflere kıyasla erken bozulabilir (Yang vd. 2021).

1.5. Geopolimer Harç Özellikleri

Gelişmekte olan herhangi bir malzemenin küresel pazarda kabul görmesi için hem kısa vadeli hem de uzun vadeli özellikleri, yani dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin kanıtlanması gerekir. GPH'ler güvenilir kısa vadeli özelliklere sahip olsa dahi uzun vadeli özellikleri henüz tam anlamıyla kabul görmemiştir. Geçmiş araştırmacıların GPH'lerin dayanıklılık özellikleriyle ilgili yaptığı çalışmalar, dayanım özellikleriyle ilgili yaptıkları çalışmalardan daha azdır.

Yenilikçi bir harç olarak GPH, UK bazlı, MK bazlı, YFC bazlı veya bunların karışımı olarak üretilebilir. Üretilen GPH'deki sodyum hidroksit dozajı, sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı, alkali çözelti/bağlayıcı oranı, kürleme süresi ve kürleme şekli, su/katı oranı, öncül bağlayıcı malzemelerin türü ve elemental bileşimi, sistemindeki Si/Al oranı, karıştırma süresi ve dinlenme süresi, ince ve kaba içerik, süperakışkanlaştırıcı dozu ve ekstra su içeriği GPH'nin performansını ve özelliklerini etkiler (Almutairi vd., 2021).

1.5.1. Donma Çözünme Direnci

Donma-çözülme olayında su numunelerin boşluklarına girer. Sıcaklık düştükçe buza dönüşen su, boşlukları genişleterek çatlakların oluşmasına neden olur. Oluşan çatlaklar vasıtasıyla su numunenin derinliklerine kadar ulaşır. Donma çözünme işleminde harç

tekrarlanan genleşme basıncına ve sızıntı basıncına maruz kalarak parçalanır ve bu nedenle kütle ve dayanım kaybı oluşur. Özetle donma; genişleme, iç çatlakların oluşumu ve parçalanmayı içerir.

Aiken vd. (2021) UK bazlı GPH'nin donma çözünme direncini incelemiştir. Numuneler 150 donma çözünme döngüsüne tabi tutulmuştur ve buz çözme döngülerinden sonra kütsel bozulma gözlenmemesine rağmen basınç dayanımının %30 oranında azaldığını bildirmişlerdir.

Jin vd. (2020) yaptıkları araştırmada bağlayıcı olarak metakaolin ve tabakhane çamuru kullanılıp alkali aktivatör olarak da sodyum silikat ve sodyum hidroksiti seçmişlerdir. GP'nin bir yapı malzemesi olarak performansını değerlendirmek amacıyla numunelerin donma-çözülme direnci sülfat saldırısına karşı dayanıklılıklarını incelenmişlerdir. Sonuçlar karışım için kullanılan metakaolin, tabakhane çamuru, sodyum silikat ve sodyum hidroksit için ağırlıkça sırasıyla %50.34, %13.48, %28.95 ve %7.23 oranlarında karıştırıldığında GP'nin en ideal performansı sergilediğini göstermiştir. Bu karışım oranları için GP numunelerin basınç dayanımları ortalama 50.37 MPa olarak ölçülmüştür. 21 günlük deniz suyu korozyon testi ve 14 döngü sülfat atağı-donma-çözülme testinin ardından GP numunelerin basınç dayanımı sırasıyla 32.64 MPa ve 19.48 MPa olarak ölçülmüştür. Bu nedenle GPH'ler için soğuk kıyı ortamlarında yapı malzemesi olarak kullanılabileceği sonucu çıkarılabilir.

Rostami ve Brendley (2003), UK bazlı GPH'nin 300 donma-çözünme çevrimi altındaki davranışını gözlemlemişlerdir ve GPH'nin donma-çözünme altında iyi direnç göstererek ilk özelliklerini koruduğunu fark etmişlerdir. Ayrıca, hava sürükleyici katkıların GPH'nin donma-çözülme direnci üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır.

1.5.2. Aşınma Direnci

Aşınma, sert parçacıkların yüzeye sürtünmesi nedeniyle beton yüzeyinin fiziksel hasar görmesi olarak tanımlanır. Betonun karşılaştığı yaygın fiziksel hasar biçimlerinden biridir. Betonun aşınma direnci, agrega sertliği, hamur sertliği ve agrega ile hamur arasındaki bağ tarafından yönetilir (Papenfus, 2003).

Mohebi vd. (2015) bağlayıcı olarak YFC kullanılan GPH'nin aşınma direncini araştırmışlardır. Numunelerin aşınma direncini üzerinde araştırma yapmak için, kütle

sıcaklığı, sıvı/bağlayıcı oranı, aktivatörlerin konsantrasyonu ve sodyum hidroksit/sodyum silikat ağırlık oranı da dahil olmak üzere dört önemli etken üzerinde durmuşlardır. Sonuçlara göre aşınma direnci için optimum karışım şartları, 25 °C de su kürü, alkali çözelti/cüruf ağırlık oranı 0,4, aktivatör konsantrasyonu 6 M ve sodyum hidroksit/sodyum silikat ağırlık oranı 3 olarak belirlenmiştir. Yüzey kalitesinin iyileştirilmesi ve kür şeklinin değiştirilmesiyle GPH'nin aşınma direncinin önemli ölçüde arttığı kanıtlanmıştır. Ayrıca sonuçlar GPH'nin CO₂ ayak izinin GB'den yaklaşık %51 daha az olduğunu ve dolayısıyla ekolojik performansının üstün olduğunu göstermiştir.

Ramujee ve Potharaju (2017), UK bazlı GPH'nin aşınma direncini incelemişlerdir. GPH ve GB için aşınma etkisi nedeniyle kaybedilen numune hacmini karşılaştırmışlar ve kaybın geleneksel harçtan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Arslan vd. (2019) kolemanit, YFC, MK ve ayrıca BL ve PVA liflerini içeren GPH'lerin aşınma direncini araştırmışlardır. Bağlayıcı malzemeler sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörleri ile aktifleştirilmiştir. Aşınma testi, aşınma uzunluğunun ve kütle kaybının ölçülmesiyle belirlenmiştir. PVA liflerinin eklenmesiyle dirençli bir yüzey tabakası oluşturulup aşınma direncinin artırılması sağlanmıştır. Ayrıca BL ilavesinin harç yüzeyinin aşınmasını %2-%18 oranında azalttığı gözlenmiştir.

1.5.3. Yangına Dayanıklılık

Beton yapıların yangın tehlikelerine karşı güvenliği küresel bir endişe kaynağıdır. Binalarda çıkan yangınlar nedeniyle dünya, büyük bir ekonomik kayba uğramaktadır. Harcın yüksek sıcaklık dayanımını etkileyen önemli faktörlerden bir tanesi yüksek sıcaklıklarda GPH'nin mikro yapısının bozulmasıdır.

GPH'ler yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında ağırlık kaybederler. Ağırlık kaybının nedeni olarak harç içinde serbest, adsorbe edilmiş ve kimyasal maddelerin buharlaşması gösterilebilir. 400 °C'nin üzerinde hidratlı ve hidratsız ürünlerin parçalanması ağırlık kaybının başka bir olası nedenidir (Aygörmez, 2020).

Sarker vd. (2014), UK bazlı GPH'nin yangın direncini incelemişlerdir. Yapılan incelemelerde numuneler 1000 °C'ye kadar ısıtıldığında kütlelerinin %90'ını kaybeden GB'nin aksine, GPH'nin 1000 °C'ye ısıtıldığında yalnızca küçük çatlaklar ve daha az kütle kaybı yaşadığını göstermiştir.

Çelik (2019) yaptığı çalışmada dört farklı lif kullanılarak takviye edilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı GPH numunelerin bazı mekanik ve mikroyapısal özelliklerini ve yüksek sıcaklık davranışını incelemeyi amaçlamıştır. Sentetik lifler (poliolefin lifi, bazalt lifi, modifiye poliamid lifi ve polivinil alkol lifi), GP kompozitler üzerindeki davranış özelliklerini incelemek için kullanılmıştır. MK bazlı GP numunelerin özelliklerine ilave edilecek liflerin etkisini incelemek için basınç dayanımı, aşınma direnci, eğilme dayanımı ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. GP karışımları, sodyum hidroksit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilen MK ve bor atığının bir birleşimi ile hazırlanmış ve daha sonra ısı kürü uygulanmıştır. Deneysel test sonuçları, çeşitli lif ilavesinin, GP kompozitlerin mukavemet özelliklerini geliştirdiğini kanıtlar niteliktedir. Örneğin, PVA katkılı numuneler, kontrol numunesine göre %415.58'lik bir eğilme dayanımı artışı göstermiştir. Aşınma direnci sonuçlarına göre üretilen tüm numunelerde 2 mm'den daha az bir uzunluk değişimi ve 15 g'dan daha az bir ağırlık kaybı kaydedilmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, PVA ve özellikle BL takviyeli numuneler, poliamid ve poliolefin numunelerinden daha düşük bir mukavemet kaybı göstermiştir. GP kompozitlerini güçlendirmek için hacimce %1.2 PVA eklenmesi, kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında sırasıyla 3 günde %32.91, 7 günde %29.75 ve 28 günde %27.28 oranında eğilme dayanımını arttırmıştır.

1.5.4. Su Emme ve Geçirimsizlik Özellikleri

Su emme ve su geçirgenliği gibi özellikler, harcın dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek su geçirimsizliğine sahip beton, alkali-silika reaksiyonu, donma-çözülme hasarı ve çelik donatının korozyonu dahil olmak üzere çeşitli bozulma mekanizmalarına neden olmaktadır. GPH'lerin su geçirimsizlik özelliklerinin önemli bölümü hammaddelerin parçacık boyutu dağılımına, kürlenme şartlarına ve Si/ Al oranına bağlıdır (Nazari& Rohani, 2012). GPH'ler geleneksel harçlara kıyasla daha düşük su emme değerlerine sahiptirler (Lavanya & Jegan, 2015).

Zhang ve Zong (2014) yüksek sıcaklıklarda GP numunelerin uzun süre kürlenmesinin, başlangıç aşamasında numunede dehidrasyona ve ardından gözeneklerin büyümesine yol açtığını ifade etmişlerdir. Sonuç olarak GP numunelerin su geçirimsizlik özelliklerinde önemli miktarda artış gözlemlenmiştir.

Fkini (2022), bağlayıcı olarak SD ve doğal puzolan asidik pomza içeren polipropilen lif katkılı GPH'lerin mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri üzerinde bir araştırma gerçekleştirmiştir. Numunelerin boşluk oranının artması ile su emme yeteneğinin de arttığı gözlenmiştir. Lif konsantrasyonundaki artışla birlikte su emme yüzde değerlerinde ve görünen boşluk oranında bir artış olduğunu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ısı kürü uygulanan numunelerde, oda sıcaklığında kürlenene numunelere göre su emme ve görünen boşluk oranı değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

1.5.5. Korozyon Özellikleri

Dayanıklı yapı sadece ekonomi açısından değil, aynı zamanda kaynakların, enerjinin ve iklimin korunması açısından da gereklidir. Beton zamanla çeşitli şekillerde bozulabileceğinden, beton dayanıklılığı önemli bir endişe haline gelmektedir.

Škvára vd. (2005) 720 gün boyunca NaCl çözeltisine maruz bırakılan UK bazlı GPH'nin klorür direncini test etmişlerdir. NaCl çözeltisine maruz kalan GP malzemelerin basınç dayanımı, ölçüm süresi boyunca artmıştır. GP malzemelerin tuz çözeltilerine karşı direncinin, çimento esaslı betona kıyasla çok daha fazla olduğunu söylemişlerdir.

Morla vd. (2021) taban külü ve uçucu kül ile üretilen GPH'lerin korozyon özelliklerinin değerlendirilmesini içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. GPH ve GB numuneleri hazırlanmış ve hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulmuşlardır. GPH ve GB'deki korozyon oranını değerlendirmek için doğrusal polarizasyon direnci kullanmışlardır. Hızlandırılmış şartlar altında, GPH numunelerinin korozyon hızı 10 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ -20 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ arasında ölçülerek orta ile yüksek arasında bir korozyon değerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. GB numunelerinin korozyon hızı 40 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ -60 $\mu\text{m}/\text{yıl}$ arasında ölçülmüştür. GB için bu değer çok yüksek bir korozyon aktivitesine işaret ettiğini belirtmişlerdir. Deney sonuçlarında bu çalışma için GPH'lerin GB'ye kıyasla düşük korozyon oranına ve daha düşük kütle kaybı yüzdesine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

1.5.6. Karbonatlaşma Direnci

Karbonatlaşma, çözeltinin pH'ını düşürür yapısal bozulmaya yol açar. Karbonatlaşma aynı zamanda harcın kimyasal bileşimini ve mikro yapısını etkileyerek kimyasal ve mekanik özelliklerinde değişikliğe yol açar (Thomas, 2018).

Huang vd. (2015) UK bazlı GPH'nin karbonatlaşma direncini incelemişlerdir ve bunu GB ile karşılaştırmışlardır. Her iki harç için de basınç dayanımında önce bir azalma ve ardından bir artış gözlenmiştir. Ancak sonuçlar UK bazlı GPH'nin GB'den daha iyi karbonatlaşma direncine sahip olduğunu göstermiştir.

Pasupathy vd. (2021) %25 YFC +%75 UK bağlayıcıları içeren GPH ve %30 YFC+%70 UK bağlayıcıları içeren GPH numuneleri sekiz yıl boyunca dış saha şartlarına maruz bırakarak karbonatlaşma dirençlerini incelemişlerdir. GPH'nin karbonatlaşması, benzer koşullara maruz kalan GB numuneler ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen verilere göre GPH'nin karbonatlaşma miktarı önemli ölçüde GPH'nin aktivatör bileşenlerine bağlı olduğunu söylemişlerdir. Ayrıca su emme, toplam gözeneklilik ve gözenek boyutu dağılımı analizi sonuçları karbonatlaşma direnciyle paralellik göstermiştir. Bu çalışma, benzer karışım tasarımına ve basınç dayanımına sahip iki farklı GPH'nin farklı karbonatlaşma davranışına sahip olduğunu ortaya koymuştur.

1.5.7. Çiçeklenme Direnci

Harç da çiçeklenme, harcın içerisindeki kalsiyum hidroksit ve tuzların çözünmesi ile harcın yüzeyine çıkması sonucunda oluşur. Çiçeklenmenin GPH'nin bozulmasına neden olan önemli bir dayanıklılık sorunu olduğu bilinmektedir.

Zhang vd. (2014) GPH'nin bileşimi ile çiçeklenme arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Serbest alkali mevcudiyetinin GPH'de çiçeklenmeyi kontrol eden en önemli parametre olduğunu bildirmişlerdir daha fazla alkali kullanımı GPH'de daha iyi mekanik özellik sağlasa dahi reaksiyona girmemiş serbest alkali miktarını azaltmak için optimum alkali içeriğinin izlenmesi gerektiğini söylemişlerdir. Ayrıca sodyum silikat yerine aktivatör olarak NaOH kullanımının çiçeklenme oranını ve derecesini azalttığını bildirmişlerdir.

1.5.8. Asit Direnci

Asit etkisi beton ömrünü önemli ölçüde azaltan çevresel faktörlerden bir tanesidir. Asidik ortam doğal olarak oluşabileceği gibi tarım, endüstriyel ve kentsel faaliyetler sonucunda da meydana gelebilir. Asit saldırısı sonucunda oluşan tahribatın boyutu, etki eden asitin konsantrasyonu, tipi, maruziyet süresi ve beton özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Kwasny vd., 2018). Asit etkisine maruz kalan GPH'lerde bozulma süreci alüminosilikat yapının kırılması ile başlar (Bakharev, 2005). Asit etkisi sonucunda basınç

dayanımında ölçülen düşüş temel olarak bu yapının kırılması sonucunda oluşan çatlak ile alakalıdır (Djobo vd., 2016). GPH'lerin üç boyutlu alüminosilikat yapılarından dolayı asit etkilerine karşı üstün direnç gösterdiği çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir.

Okoye vd. (2017) UK bazlı GPH'ler %2 H₂SO₄'e maruz kaldığında, farklı SD ikame oranlarının etkisini incelemişlerdir. %20 SD içeren GPH'de, GB'den farklı olarak herhangi bir yüzey bozulması gözlemlenmemiştir. Tüm GPH karışımlarının ağırlık kaybı, GB'ye kıyasla daha azdır.

1.5.9. Sülfat Direnci

Sülfat parçacıkları geniş ölçüde toprakta, yeraltı sularında, deniz suyunda, çürüyen doğal maddelerde ve atık sularda bulunur. Bu iyonlar, beton içinde yayılır ve çimentonun hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girer. Başlıca reaksiyon ürünleri, genleşmeye yol açarak çatlaklara sebep olur.

Lavanya ve Jegan (2015) UK bazlı GPH'nin %5'lik bir magnezyum sülfat çözeltisine maruz kalmaya karşı direncini incelemişlerdir. 45 gün sonra GPH, yüzeyinde önemli bir hasar gözlenmezken, GB'nin kenarlarında ve yüzeylerinde bozulma gözlenmiştir. GPH'de basınç dayanımı, yalnızca %5-12 oranında azalırken, GB'de %5-25'lik bir kayıp kaydedilmiştir.

1.5.10. Alkali-Silika Reaksiyon Direnci

Alkali-silika reaksiyonu (ASR), beton agregalarında bulunan reaktif silis ile betonun boşluklarında eriyik halde bulunan hidroksil iyonları arasındaki reaksiyondur. Bu reaksiyon, betonda nem etkisiyle genleşen bir jelin oluşmasına sebep olur (Ramyar vd., 2002).

Pouhet ve Cyr (2015), alkali reaktif agregaların varlığında metakaolin bazlı GPH'lerin davranışını incelemişlerdir. GP numuneler, farklı seviyelerde reaktiviteye sahip olan altı farklı agrega, metakaolin ve sodyum silikat aktivatörü ile hazırlanmıştır. GP numunelerin bu tür reaktif agrega içeriğinde davranışı, %95 bağıl nemde, 60°C'de ve hızlandırılmış koşullarda 250 güne kadar boyut değişiklikleri ve dinamik modülü izlenerek araştırılmıştır. GP'lerin ASR'den hangi ölçüde etkilendiğini tespit edebilmek amacıyla tüm agregalar için sıradan Portland çimentosu ile kontrol numunesi hazırlanmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde GP'lerin yüksek konsantrasyonlarda alkali içermelerine rağmen ASR'ye kontrol

numunesinden daha fazla direnç gösterdiklerini ve GP numunelerde herhangi bir karakteristik şişme veya önemli bir sertlik kaybının gözlemlenmediği tespit edilmiştir.

1.5.11. Basınç Dayanımı

GPH'ler de dahil olmak üzere tüm harç bileşim türleri için en önemli mühendislik özelliği basınç dayanımıdır çünkü harcın diğer özellikleriyle paralellik gösterdiği söylenebilir. GPH'nin basınç dayanımı bağlayıcı malzemelerin kimyasal bileşimi, ekstra su içeriği, alkali sıvı/bağlayıcı oranı, kimyasal katkı maddesi dozajları, bağlayıcı içeriği, ince ve kaba agrega içeriği, sodyum hidroksit ve sodyum silikat içeriği, aktivatörlerin oranı, kürlleme sıcaklığı ve türü, kürlleme süreleri gibi pek çok farklı parametrelerden etkilenmektedir (Ahmed vd., 2021).

Esparham (2020), metakaolin bazlı GPH'lerin basınç dayanımlarını etkileyen faktörler ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında üretilen numuneler 80°C'de 24 saat ısı kürüne tabi tutulmuştur. 24 saatlik ısı kürü ardından numuneler ortam şartlarında 28 günlük sürelerini tamamlayıp basınç dayanımı testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar alkali aktivatör çözeltisi olarak potasyum hidroksit ve potasyum silikat aktivatörlerinin beraber kullanılması, sodyum bazlı alkali aktivatörlerin kullanılmasına göre GPH'lerin 28 günlük basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Bu durumun tam aksine 3 ve 7 günlük basınç dayanım sonuçları için sodyum bazlı alkali aktivatör kullanılan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek değerler almıştır ve taze harcın daha hızlı sertleştiği gözlenmiştir. Ayrıca, sıvı/bağlayıcı oranının arttırılması, GPH'nin basınç dayanımının önemli ölçüde azalmasına neden olmuştur. Aktivatör konsantrasyonları için GPH'nin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, sodyum hidroksit konsantrasyonunun 14 M'ye kadar artmasıyla arttığı ancak 16 M için basınç dayanımında önemli bir değişiklik olmadığı çıkarılan sonuçlar arasındadır. Kür sıcaklık değerleri için GPH basınç dayanımı, sıcaklığının 80 °C'ye kadar artmasıyla artmış ancak 90 °C den daha fazla kür sıcaklıklarında GPH basınç dayanımının azalmasıyla sonuçlanmıştır.

Kaya (2021), kaolin kullanılarak üretilen GPH'lerde SD ve mikro SiO₂ (MS) katkısı eklenmesinin basınç dayanım özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kaolin içeresine ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranında SD ve MS ayrı ayrı ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Bağlayıcılar, ağırlıkça %11, %13, %15 ve %17 sodyum içeren NaOH aktivatörü ile aktive edilmiştir. Bağlayıcı, kum, NaOH ve sudan oluşan karışım, homojen bir

şekilde karıştırılıp kalıplara yerleştirildikten sonra 24 saat süre ile 110 °C ısı kürüne tabi tutulmuştur. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 28 güne ortam şartlarında bekletilmiştir. Numuneler üzerinde boşluk oranı, su emme, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, %9 SD ve %11 Na ile %9 MS ve %17 Na içeren numunelerde sırasıyla 21.4 MPa ve 45.3 MPa basınç dayanımı ölçülmüştür. Ağırlıkça %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS katkısının dayanım üzerinde olumlu bir etkisi gözlenmezken %15 ve %17 Na ile üretilmiş numunelerde SD ve MS katkısının basınç dayanımını artırdığı tespit edilmiştir.

1.5.12. Yarmada Çekme Dayanımı

Tuyan vd. (2020) uçucu kül esaslı GPH'lerin mekanik özelliklerinin tespitini içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Farklı termik santrallerden elde edilen F ve C tipi UK'ler sodyum hidroksit ve sodyum silikat aktivatörleri ile aktive edilerek GPH üretiminde kullanmışlardır. Numuneler üzerinde yüksek sıcaklık kürü ve hava kürü uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, GPH'ler arasında yarmada çekme dayanımı en yüksek olan numuneler sırasıyla yüksek sıcaklıkta kürlenene %100 f tipi UK içeren numuneler (3 MPa) ve ortam sıcaklığında kürlenene %100 c tipi UK içeren (2.4 MPa) numuneler olduğu belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı yüksek olan bu numunelerin benzer şekilde basınç dayanımları da yüksek çıkmıştır. GPH numunelerin yarmada çekme dayanımının basınç dayanımına oranı %4.4-%7.4 aralığında ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıkta kürlenene C tipi UK esaslı GPH numunelerle ortam sıcaklığında kürlenene numunelerin yarmada çekme dayanımı karşılaştırıldığında yüksek sıcaklıkta kürlenene C tipi UK esaslı GPH'lerin daha düşük değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, yüksek sıcaklıkta kürlenene numunelerin yapısında mikro çatlakların oluştuğu ve agrega ile bağlayıcı arasındaki ara yüzeyin zayıflamasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Bernal vd. (2010) cüruf esaslı GPH numuneler için farklı oranlarda çelik lif kullanımının numuneler üzerinde yarmada çekme dayanımı açısından performansını araştırmışlardır. 28 günlük kür sonunda 40 kg/m³ ve 120 kg/m³ çelik lif ikame edilen numuneler ile hiç lif ilave edilmeyen GP numunelerinin yarmada çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. 40 kg/m³ çelik lif ilave edilen numunelerde kontrol numunesine kıyasla %6.4 dayanım artışı elde ederlerken, 120 kg/m³ çelik lif oranında ürettikleri numuneler kontrol numunelerine kıyasla %23.7 gibi önemli bir dayanım artışı gözlemlemişlerdir.

Sonuçların 7 ve 14 günlük ölçümler içinde benzer şekilde olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmada geleneksel Portland çimentolu harç numunelere çelik lif ilave edilmesi durumunda da yarmada çekme dayanımında belirli seviyelerde artış gözlenmiştir ancak bu artış GPH numunelerden elde edilen yarmada çekme dayanımlarının oldukça gerisinde kaldığı belirtilmiştir. Genel bir yargı olarak maksimum yük ile ilişkili olan eğilmenin çelik lif oranında belirli seviyelerde artışla beraber geliştirilebileceği sonucu araştırmacılar tarafından kabul edilmiştir.

1.5.13. Eğilme Dayanımı

Arie vd. (2017) UK ve YFC esaslı GPH'nin uzun vadede performanslarını inceleyip değerlendirmelerde bulunmuşlardır. İki farklı bağlayıcı türü ile üretilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımları için ölçümler yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre UK esaslı GP numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarının zamanla artış eğiliminde olduğunu ifade etmişlerdir. UK esaslı GP numunelerin eğilme dayanımının %53.2'sini 28-365 günlük süreç içinde kazandığını tespit etmişlerdir. YFC ve UK bağlayıcılı GPH'nin 90 günlük eğilme dayanımının aynı olduğunu ancak YFC ile üretilen numunelerin 540 gün sonunda eğilme dayanımında %13.3'lük bir düşüş yaşadığını tespit etmişlerdir.

Shaikh (2013) içeriğinde ağırlıkça %0 ila %40 arasında değişkenlik gösteren silis kumlu ve PVA lif ilaveli GPH'nin eğilme dayanımı üzerinde etkilerini incelemiştir. GPH'nin eğilme dayanımının, %20 silis kumu ilavesiyle yaklaşık %18 arttığını tespit etmiştir. %20'den fazla silika kumu ikame edilmesi durumunda eğilme dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Ekstra kum ilavesinin elyafların yönünü bozarak daha fazla gözenek gelişimine sebep olduğunu çıkarılan sonuçlar arasındadır.

1.6. Literatür Taraması

Bu bölümde BL ve KL içeren GPH'lerle ilgili gerçekleştirilen akademik çalışmaların bir kısmı özetlenmiştir.

Annadurai vd. (2023) YFC, UK ve pirinç kabuğu külü kullanarak GPH'ler hazırlamışlardır. Karışımlara hacimce %1, %2, %3 ve %4 oranlarında BL ilave ederek numunelerin, su emme, kılcallık, basınç ve çekme dayanımları hakkında bilgi edinmeyi amaçlamışlardır. Lif ilaveli numunelerde lifsiz numunelere kıyasla kılcallık ve su emme değerlerinde azalma gözlenmiştir. Genel olarak %2 oranında BL ikame edilen harçların

mukavemet değerlerinin lifsiz ve diğer ikame oranlarına kıyasla daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir. Lif içermeyen kontrol numunelerine kıyasla %2 oranında BL içeren numunelerin 3., 7. ve 28. Günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla %56,22, %27,62 ve %27,61 artmıştır. 7. ve 28 günlük çekme dayanımı değerleri ise kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %56,52, %23,98 artmıştır.

Frayyeh ve Swaif (2018) UK içerikli KL ile güçlendirilmiş GP levhalar üretebilmek amacıyla GPH'nin çeşitli karışımlarının mekanik özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. KL'ler karışımlara ağırlıkça %0,2, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında ilave edilmiştir. Alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit birlikte kullanılmıştır. KL'lerin GP hamur ile olan aderansı basınç ve eğilme dayanımının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. KL %1 oranında kullanıldığında basınç ve eğilme dayanımı sonuçları için en ideal sonuçlar elde edilmiştir. %1 ikame oranı için kontrol numunesine kıyasla 28 günlük basınç dayanımı %30 artarken, eğilme dayanımı %44.4 artış göstermiştir. Ayrıca lif dozajındaki artışın işlenebilirlik üzerinde olumsuz etkisinin olabileceği vurgulanmıştır.

Shoei vd. (2021) YFC bazlı GPH'lere hacimce %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında BL ilave ederek yüksek sıcaklık karşısında dayanımlarını incelemişlerdir. Üretilen numuneler yangın performansının değerlendirilmesi için elektrikli fırında 6 °C/dk ısıtma hızında 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklıklara ulaşana kadar ısıtılmışlardır. 28 günlükken yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanım değerleri lifsiz kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında tüm karışımlar için 200 °C'de basınç dayanımında bir iyileşme gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak ilk aktivasyondan itibaren reaksiyona girmemiş olan cüruf parçacıklarının gecikmiş aktivasyonundan kaynaklandığı ileri sürülmüştür. 400–600 °C'de serbest suyun ve kimyasal olarak bağlı suyun buharlaşmasının yanı sıra, kimyasal bağların kırılması ve CASH jelinin ayrışması mikro yapıyı bozarak basınç dayanımının azalmasına yol açmıştır. 600-800 °C aralığında ise ciddi bir basınç dayanımı kaybı ölçülmüştür. Eğilme dayanımı sonuçları için ise basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, 200 °C'deki eğilme dayanımı hariç tüm karışımlar, sıcaklık artışıyla birlikte ciddi bir dayanım kaybı sergilemiştir.

Vilaplana vd. (2016) yaptıkları çalışmada alkali ile aktifleştirilmiş YFC içerikli GPH'lere KL takviye edilmesinin numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda ölçülen basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızı ve numune yoğunlukları arasında doğrusal bir ilişki gözlemlenmiştir. KL dozajı artışıyla beraber eğilme dayanımında sistematik bir artış tespit edilmiştir. Bu artış lif ilavesiz kontrol

numunelerine kıyasla 28 günde %410 ve 7 günde %522 olarak hesaplanmıştır. Lif dozajlarına bağlı olarak 18 MPa'ya varan eğilme dayanımı elde edilmiştir. 3 mm boyunda KL kullanıldığında basınç mukavemetleri önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bununla birlikte, daha uzun lif kullanılması durumunda, lif kümesi oluşumu veya tercihli yönelim gibi işlenebilirlik sorunları nedeniyle dayanım korunmuş veya %18'e ulaşan bir düşüşle sonuçlanmıştır. KL'nin YFC bazlı GP numunelerin kuruma büzülmesini kontrol etmek için uygun bir katkı olduğu yapılan araştırma sonucunda ulaşılmıştır.

Shaikh ve Haque (2018) UK içerikli GPH'lere BL ve KL ilave ederek numunelerin yüksek sıcaklık karşısındaki davranışlarını incelemişlerdir. Numunelere ağırlıkça %0.5, %1 ve %1,5 oranlarında lif ilave etmişlerdir. Lifsiz kontrol numuneleri ve değişen oranlarda lif içeren numuneler ortam sıcaklığında, 200, 400, 600 ve 800 C sıcaklıklarda test edilmişlerdir. Sonuçlar %1 ikame oranlarında her iki çeşit lif içeren numuneler içinde en yüksek basınç dayanımı, daha düşük hacimsel büzülme ve kütle kaybına sahip olduğunu göstermiştir. KL ilaveli numuneler ile BL içeren numuneler karşılaştırıldığında ise KL içeren numunelerin daha kompakt bir mikro yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca KL içeren numunelerin GP hamur içinde daha iyi aderans sergilediği ve yüksek sıcaklık karşısında daha yüksek performansa sahip olduğu yapılan deneyler sonucunda gözlenmiştir.

Raut vd. (2019) YFC ve UK kullanılarak ürettikleri GPH'lere hacimce %0.1, %0.2, %0.3, %0.4 ve %0.5 oranlarında BL ilave ederek taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini araştırmayı amaçlamışlardır. Karışımda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanmışlardır. Karışımlarda kullanılan YFC miktarındaki artış dolayısıyla SiO₂ ve CaO artışına neden olmuş bu sayede tek başına UK kullanılan karışımlara göre daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir. Lifsiz kontrol numunelerine kıyasla tüm BL içerikli numunelerin dayanım değerleri KL içerikli numunelerden daha yüksek ölçülmüştür. En yüksek mukavemet değerleri %60-110 artışla %0.2 BL kullanılması durumunda elde edilmiştir. %0.2 lif kullanım dozajı aşıldığında GPH içerisinde lif topaklanmaları gözlenmiş ve mukavemet değerlerinde azalışa sebep olmuştur.

Ali vd. (2020) üç farklı agrega türü ile üretilen metakaolin (MK) bazlı GPH'lere üç farklı BL oranının etkisini araştırmışlardır. Her grup karışıma %0, %0.4, %0.8 ve %1.2 oranında BL ilave etmişlerdir. Karışımlarda ana bağlayıcı olarak Na₂SiO₃ ve NaOH ile aktive edilmiş metakaolin kullanılmıştır. Tüm numunelerin 7, 28 ve 56 günlük mekanik dayanımları ölçülmüştür. Üretilen harçlara ultrasonik darbe hızı (UPV), aşınma, yüksek sıcaklık, donma-çözülme testleri uygulanmıştır. Sonuçlara göre GP numuneler özellikle BL

%0.8-1.2 oranında kullanıldığında olumlu etkiler göstermiştir. Sonuçlar incelendiğinde basınç dayanımı sonuçları %25'e, eğilme dayanımı sonuçlarında ise %50'ye varan artış gözlenmiştir. Ayrıca geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen GP'lerin özellikleri diğerlerinden daha düşük olmasına rağmen elde edilen sonuçlar uygulama için oldukça kabul edilebilir olduğunu göstermiştir.

Zhang vd. (2014), Alkali ile aktifleştirilen YFC ve UK bazlı GPH'lere farklı uzunluklarda (6 mm ve 12 mm) ve hacim oranlarına (%0, %0.2, %0.4, %0.6, %0.8 ve %1.0) sahip KL ilave ederek su emme, gözeneklilik, basınç dayanımı, kuruma büzülmesi, tek eksenli çekme özellikleri, İşlenebilirlik de dahil olmak üzere birçok özelliğini test etmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. KL kullanımı GP karışımının işlenebilirliğini azaltıp priz süresini hızlandırmıştır. Araştırmacılar KL ilavesinin erken yaşlarda kuruma büzülmesi üzerine olumlu etkileri olduğunu ileri sürmüşlerdir. Liflerin köprüleme etkisi özellikleri sayesinde tek eksenli gerilmeyi artırarak kırılma azaltılmıştır. Numuneler %0.6 lif ikame oranlarında ve 6 mm lif uzunluğunda en iyi çatlak ilerleme direncini ve tokluğunu göstermiştir.

Şahin vd. (2021) BL'nin MK bazlı GPH içerisinde kullanımını incelemişlerdir. Lif ilavesiz MK bazlı GPH'den oluşan numunelerle karşılaştırıldığında, BL içeren tüm numunelerin mukavemet özelliklerini artırdıkları ve liflerin kompozit içerisinde homojen bir dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Lif katkılı numunenin mekanik ve fiziksel özelliklerinde önemli miktarda bir iyileşme tespit edilmiştir.

Payakanitia vd. (2018), UK içerikli GPH'ye KL ilave ederek numunelerin işlenebilirliği, mekanik ve elektriksel özellikleri hakkında bilgi edinmeyi amaçlamışlardır. KL içeriği %0 ila %1 arasında değiştirilip sıvı/bağlayıcı oranı 0,5 seçilerek numuneler hazırlanmıştır. GP numunelere bağlayıcı miktarının ağırlıkça %0.5 ve daha yüksek dozajlarda KL eklenmesiyle birlikte çatlama sonrası numune parçaları birbirinden ayrılmamış ve sünek bir davranış sergilendiği ifade edilmiştir. Artan KL içeriğiyle birlikte işlenebilirlik olumsuz etkilenmiş ve basınç dayanımında hafif bir azalış gözlenmiştir. %0.5 ve üzeri KL konsantrasyonu için elektriksel direnç ile ilgili hem kütleme sıcaklığının hem de KL içeriğinin GP numunelerin direnci üzerinde etkili olduğunu göstermiştir.

Timakul vd. (2016) UK bazlı GPH'lere ağırlıkça %10-%30 oranlarında BL ilave ederek basınç dayanımı üzerinde etkisini araştırmayı amaçlamışlardır. Lifsiz kontrol numunelerine kıyasla %10 BL ilavesi GP numunelerin dayanımını %37 oranında artırmıştır. Ağırlıkça %15 den fazla BL ilavesinin numunelerin basınç dayanımı üzerinde çok fazla

etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Optimum BL ilavesinin basınç dayanımı üzerindeki olumlu etkisinin sebebi olarak yüksek Ca/Si oranı, geopolimer matrisindeki kalsiyum-silikat-hidrat (CSH) fazlarının oluşumuna sebep olduğu gösterilmiştir.

Rill vd. (2010) GPH'lere değişen oranlarda BL ilave ederek eğilme dayanımı üzerindeki etkilerinin incelenmesini içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri karışımlara ağırlıkça %0, %2, %4, %6, %8 ve %10 oranında BL ilave etmişlerdir. 3 noktalı eğilme testi sonucunda lif dozajı artmasıyla birlikte eğilme dayanımı sonuçlarının da arttığı gözlenmiştir. Ağırlıkça %10 BL içeren numuneler 19.5 MPa ile en yüksek eğilme dayanımı değerine sahip olurken en düşük eğilme dayanımı 1.7 MPa ile lif içermeyen numunelerde ölçülmüştür.

Zhang vd. (2023) KL katkılı GPH'lerin bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ürettikleri harçlara hacimce %0, %0,2, %0,4, %0,6, %0,8 ve %1,0 oranlarında KL ilave etmişlerdir. Yapılan deneyler bu çalışma için optimum KL miktarının %0.6 olduğunu göstermiştir. KL dozajı arttıkça işlenebilirlik azalıp priz süresi kısalmıştır. KL ilavesinin mikro çatlakların oluşumunu azaltıp çatlak ilerleme direncini artırdığı ifade edilmiştir. Optimum KL miktarı için GP numunelerin 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları kontrol numunelerine göre sırasıyla %19,8 ve %21,3 artmıştır. Ayrıca KL dozajındaki artışla birlikte su emme miktarında da azalış gözlenmiştir.

Lakshmi vd. (2018) YFC bazlı GPH'lere %0, %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında BL ilave ederek su emme, kılcallık, basınç ve eğilme mukavemeti üzerindeki etkilerinin incelenmesini içeren bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda optimum BL dozajı %1.5 olarak belirlenmiştir. %1.5 BL ikamesi için lifsiz kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sırasıyla %10 ve %8.7 artarken su emme ve kılcallık katsayısında azalma gözlenmiştir.

Xu vd. (2022) YFC bazlı geopolimer harçlara BL ilave edilmesinin etkilerini araştırdıkları bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. BL, karışımlara hacimce %0, %0.1, %0.2, %0.3 ve %0.4 oranlarında ilave edilmiştir. 28 günlük basınç dayanım sonuçlarına göre en yüksek dayanım değeri %0.2 lif dozajında, kontrol numunesine göre %11.7 artarak gözlenmiştir. BL içeriğinin %0.3 olması durumunda, 28 günlük numunelerin eğilme dayanımı maksimum 7,4 MPa'ya ulaşmış ve kontrol numunesine göre %17.4 oranında artış göstermiştir. Optimum lif dozajı aşıldığında harcın mekanik özellikleri olumsuz yönde gelişim göstermiştir. Araştırmacılar bu durumu uygun bir lif içeriği eklemenin enerji

emilimi ve güç gelişimi açısından faydalı olduğunu ancak çok fazla lifin harçlarda karıştırma sorunu ortaya çıkardığını ve aşırı gözeneklilik kusurlarına sahip düzensiz bir yapıya neden olduğu şeklinde açıklamışlardır.

1.7. Amaç ve Kapsam

GP bağlayıcılar çimentoya alternatif olma potansiyelinin yanı sıra sürdürülebilir malzemelerdir ancak uygulamaları ile ilgili geniş kapsamlı ve güvenilir bir veri tabanına ihtiyaç vardır. GPH'ler yapıları gereği seramik benzeri bir özellik göstererek kırılgan yapıya sahiptir bu durumda gevrek kırılma riskini artırır. GPH içinde oluşabilecek mikro çatlaklar ve ardından oluşan makro çatlaklar GPH ömrünü kısaltır ve harcın işleyişini bozar. Bu çalışmanın amacı bağlayıcı olarak YFC kullanılarak üretilen GPH'lerde BL ve KL kullanımının harcın çeşitli özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Çalışma kapsamında iki farklı dozajda ve iki farklı oranda lif kullanılarak YFC esaslı GPH'ler üretilmiştir. Lif kullanımının GPH'lerin basınç ve eğilme dayanımları, ultrases geçiş hızları, su emme, aşınma, kılcal geçirimsizlik, yüksek sıcaklığa dayanım üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deney Programı

GP üretiminde bağlayıcı olarak YFC ve alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Dozajlar 300 ve 320 kg/m³ olacak şekilde 2 farklı dayanım düzeyinde üretilen harçlara %0, %0.5 ve %1 oranlarında BL ve KL ilave edilerek ve toplamda 10 üretim yapılmıştır. Her üretimde 8.5 litre harç üretilmiştir. Üretilen harç numuneleri üzerinde basınç ve eğilme dayanımı, aşınma, yüksek sıcaklık etkisi, kılcal su geçirimsizliği, su emme, ultra ses geçirimsizliği ve darbe dayanımı deneyleri yapılmıştır. Basınç ve eğilme dayanımları 1 gün, 28 gün ve 180 günde belirlenmiştir. Diğer deneyler 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Su emme, kılcallık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ölçümleri için 40x40x160 mm prizma, aşınma ve ultra ses geçirgenliği deneyleri için 71x71x71 mm küp ve darbe dayanımı deneyi için 25x25x285 mm prizma numuneleri üretilmiştir.

2.2. Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışma da kullanılan YFC İskenderun Demir Çelik fabrikasından temin edilmiştir. YFC'nin görüntüsü Şekil 3'de, kimyasal bileşimi Tablo 1'de yer almaktadır. YFC özgül ağırlığı 2.81 g/cm³ dür.

Tablo 1. YFC'nin kimyasal bileşimi

Bileşen	%
SiO ₂	36.70
Al ₂ O ₃	14.21
Fe ₂ O ₃	0.98
CaO	32.61
MgO	10.12
SO ₃	0.99
Na ₂ O	0.42
K ₂ O	0.76
KK	-



Şekil 3. Üretimlerde kullanılan yüksek fırın cürufu

2.2.2. Agrega

Üretimlerde 0-4.76 mm elek aralığında kalan kalker kökenli kırma kum kullanılmıştır. Kumun fiziksel özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kırma kuma ait fiziksel özellikler

Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2.65
Su emme (%)	1.57
Doğal nem (%)	0.3

Agregalar elenerek 0.15-0.3, 0.3-0.6, 0.6-1.19, 1.19-2.38, 2.38-4.76 mm aralıklarında sınıflara ayrılmış ve ASTM C33’de ince agregalar için verilen granülometri sınır eğrileri arasında kalacak şekilde karıştırılmıştır. Şekil 4’de sınıflara ayrılan kum örnekleri görülmektedir.

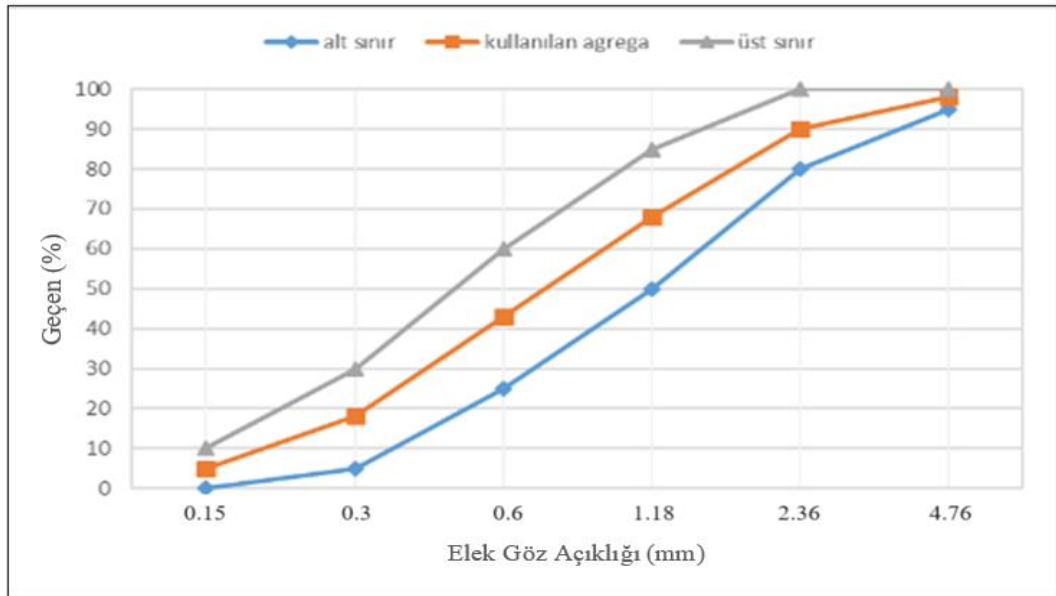


Şekil 4. Elenerek sınıflara ayrılmış kum

Tablo 3’de ASTM C33’e uygun ince agrega sınır değerleri ve belirlenen karışım granülometrisi verilmiştir. Kum granülometrisi Şekil 5’de görülmektedir.

Tablo 3. ASTM C33’e uygun ince agrega sınır değerleri

Elek boyutları (mm)		0.15	0.3	0.6	1.19	2.38	4.76
Elekten geçen (%)	Alt sınır	0	5	25	50	80	95
	Karışım	5	18	43	68	90	8
	Üst sınır	10	30	60	85	100	100



Şekil 5. Kullanılan agreganın granülometri ve sınır eğrileri

2.2.3. Alkali Aktivatörler

GPH üretimlerinde alkali aktivatör olarak NaOH (SH) ve Na₂SiO₃ (SS) çözeltileri kullanılmıştır. Seçilen konsantrasyonda (12 mol) SH çözeltisi elde edebilmek için, saf su ile katı haldeki SH karıştırılarak çözelti hazırlanmıştır. Kullanılan SS yoğunluğu 1.39 g/cm³ ve katı oranı %33 dür. Alkali çözeltisinin bağlayıcıya oranı 0.5 ve SS/SH oranı 1 olarak seçilmiştir. Şekil 6a’da katı haldeki SH ve Şekil 6b’de hazırlanan çözelti görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 6. (a) Katı NaOH, (b) NaOH çözeltisi

2.2.4. Karbon Lif

KL’ye ait teknik özellikler Tablo 4’de verilmiştir ve kullanılan KL Şekil 7.’de verilmiştir.



Şekil 7. Geopolimer harç karışımlarında kullanılan karbon lifler

Tablo 4. Karbon lifine ait teknik özellikler

Karbon lif teknik özellikleri	
Yoğunluk	1.80 g/cm ³
Çekme dayanımı	3.43 GPa
Kopma uzaması	% 1.7
Elastisite modülü	230 GPa
Lif çapı	5-8 µm
Lif uzunluğu	12 mm

2.2.5. Bazalt Lif

BL'ye ait özellikler Tablo 5'de verilmiştir ve kullanılan BL Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Geopolimer harç karışımlarında kullanılan bazalt lifler

Tablo 5. Bazalt lifine ait teknik özellikler

Bazalt lif teknik özellikleri	
Çekme Dayanımı	4840 MPa
Elastisite Modülü	80 GPa
Uygulama Sıcaklık limitleri	-250°C- +600°C
Erime Sıcaklığı	1450°C
Özgül Ağırlık	2.60-2.80 g/cc
Lif Çapı	9-23 µm
Lif Uzunluğu	12 mm

2.2.6. Su

Bu çalışma kapsamında üretilen harçlarda Trabzon ili şebeke suyu kullanılmıştır.

2.3. Karışım Oranları

Tablo 6'da harç üretiminde kullanılan malzeme miktarları ve numune kodları görülmektedir.

Tablo 6. Harç bileşimleri

Numune kodu	Lif türü	Lif oranı %	YFC (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	Alkali aktivatör (l)	İlave Su (l)
300REF	-	0	300	1888.5	150	150
300B0.5	Bazalt	0.5	300	1888.5	150	150
300B1.0	Bazalt	1.0	300	1888.5	150	150
300K0.5	Karbon	0.5	300	1888.5	150	150
300K1.0	Karbon	01	300	1888.5	150	150
320REF	-	0	320	1963.8	160	110
320B0.5	Bazalt	0.5	320	1963.8	160	110
320B1.0	Bazalt	1.0	320	1963.8	160	110
320K0.5	Karbon	0.5	320	1963.8	160	110
320K1.0	Karbon	1.0	320	1963.8	160	110

2.4. Geopolimer Harç Üretimi ve Kullanılan Cihazlar

İstenilen boyutta agrega elde edebilmek için iri boyuttaki agregalar çeneli kırıcıdan geçirilerek daha küçük taneli hale getirilmiştir. İri Agregaların çeneli kırıcılardan geçirilme işlemi Şekil 9.'da gösterilmektedir. Daha sonra bu agregalar 0-4.76 mm göz açıklıklı elekler kullanılarak boyutlarına göre ayrılmıştır. Kullanılan elekler Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9. İri agregaların çeneli kırıcılardan geçirilme işlemi



Şekil 10. Kullanılan elekler ve elek sarsma cihazı

Üretimlerde kullanılan malzemeler Şekil 11'deki arşimet terazisi kullanılarak tartılmışlardır. Karma işlemi Şekil 12'de görülmekte olan 60 lt kapasiteli pan tipi betoniye ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 11. Arşimet terazisi



Şekil 12. Üretimde kullanılan betoniye

Harç üretiminde, önceden ıslatılmış betoniye YFC ve aktivatör dökülüp 1-2 dakika karıştırılmış ve ardından agregalar, doyma suyu ve kıvamın istenilen düzeyde olmasını sağlayacak ilave su betoniye ilave edilmiştir. Referans harç üretimi sırasında belirlenen bu ilave su miktarı diğer üretimlerde de kullanılmıştır. Malzemeler homojen bir hale gelene

kadar karıştırılmış ve lifli üretimlerde karıştırma işlemi devam ederken belirli oranlarda lif elle ayrıştırılarak ilave edilmiştir. Lif ekleme işlemi Şekil 13’de hazırlanan harcın kalıplara yerleştirilmesi Şekil 14’de görülmektedir.



Şekil 13. Taze harç karışımına lif ilave edilmesi



Şekil 14. Harcın kalıplara yerleştirilmesi

Kalıplara yerleştirilen numuneler 80°C sıcaklıktaki buhar tankında 24 saat süreyle bekletilmiştir daha sonra kalıplardan çıkarılarak 28. gün dolana kadar oda şartlarında muhafaza edilmiştir. Ünal Mühendislik ve Mak. Sanayi tarafından üretilmiş olan buhar kür tankı Şekil 15’de görülmektedir.



Şekil 15. Deneylerde kullanılan buhar kürü tankı

2.5. Yapılan Deneyler

2.5.1. Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma tablası deneyi TS EN 1015-3 standardı gereğince gerçekleştirilmiştir. Deneyde yayılma konisi yağlanarak tablanın üzerine yerleştirilmiş ve taze harç 2 aşamada 10 kez tokmaklanıp sıkıştırılarak koni içerisine doldurulmuştur. Yüzeyi düzeltildikten sonra koni çıkarılmış ve yayılma tablası saniyede bir kez olacak şekilde 15 düşüm yapılmış ve yayılan harcın çapı ölçülmüştür. Yayılma tablası deney seti Şekil 16’da görülmektedir.



Şekil 16. Yayılma tablası deney seti

2.5.2. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri

4x4x16 cm'lik prizma numunelere 1 gün ve 28. günde üç nokta eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır. Deneylerde Besmak Marka 20 ton kapasiteli çimento presi kullanılmıştır. Eğilme deneyinden sonra elde edilen ikiye ayrılmış numuneler üzerine basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Şekil 17' de basınç ve Şekil 18'de eğilme deneylerinde kullanılan çimento presi görülmektedir.



Şekil 17. Basınç dayanımı deneylerinde kullanılan çimento presi



Şekil 18. Eğilme deneylerinde kullanılan çimento presi

2.5.3. Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi

Ultrases geçiş hızı ölçüm cihazı ses alıcı ve verici sensörler vasıtasıyla dalganın ortam içinde yayılma hızını ölçmektedir. Cihazı alıcı ve verici uçları üzerlerine jel sürüldükten sonra numunelerin karşılıklı iki yüzeyi üzerine yerleştirilir. Sesin numune içinden geçiş süresi ölçülür ve hız aşağıda verilen denklem 1 yardımı ile hesaplanır. Deneylerde Şekil 19’da görülen Proceq markalı UPV cihazı kullanılmıştır.

$$\text{Ultrases geçiş hızı} = \frac{\text{problar arası uzaklık}}{\text{ses geçiş süresi}} \quad (1)$$



Şekil 19. Deneyde kullanılan UPV cihazı

2.5.4. Kılcal Su Emme Deneyi

Kılcal su emme deneyi ASTM C1585 (2013) standardı uyarınca gerçekleştirilmiştir. 28 günlük kür süresini tamamlayan 40x40x160 mm’lik küp numuneler üzerinde su emme deneyi yapılmadan önce 70 °C sıcaklıktaki etüvde 48 saat ön kurutma uygulanmıştır. Şekil 20’de kurutma işlemi yapılan Geniar marka etüv görülmektedir.



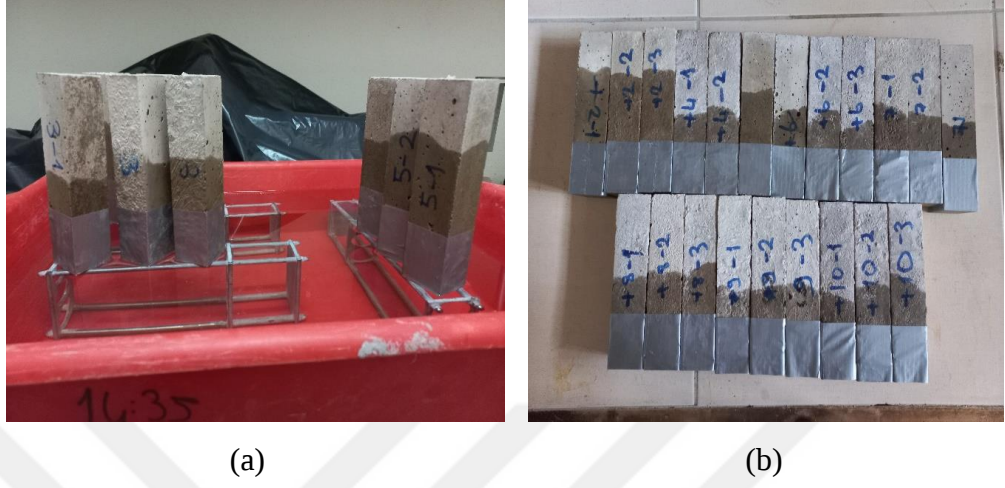
Şekil 20. Numuneleri kurutmak için kullanılan Geniar markalı etüv

Kuruma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler oda sıcaklığına geldiğinde hassas terazide tartılarak kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Deney sırasında sadece alt yüzeyden su emiliminin sağlanması amacıyla yan yüzeyler su geçirimsiz bant ile sarılmış ve plastik küvet içerisine numunelerin tabanı su ile temas edecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra numuneler 0, 5, 10, 20, 30, 45, 60, 120 ve 1440. dakikalarda alt yüzeyleri hızlıca kurularak hassas terazide tartılmışlardır. Kullanılan hassas terazi Şekil 21’de görülen 0.1 gr hassasiyetinde 10 kg kapasiteli Radway marka terazidir.



Şekil 21. Deneylerde kullanılan Radway marka hassas terazi

Kılcal su emme için oluşturulan deney düzeneği Şekil 21. (a)'da verilmiştir. Deney sonrası numune görüntüleri Şekil 22. (b) deki gibi olmuştur.



Şekil 22. (a) Deney düzeneği, (b) Deney sonrası numune görüntüleri

Yapılan ölçümler sonrasında denklem 2.2 de verilen bağıntı uyarınca düşey eksende Q/A değerleri, yatay eksene $\sqrt{t}$ değerleri işaretlenerek grafik çizilmiş ve oluşan eğrinin eğimi kılcallık katsayısı olarak belirlenmiştir. Bu denklemde Q emilen su miktarını, A suya değen yüzey alanını, k kılcal su emme katsayısını, t ise zamanı göstermektedir.

$$Q = A\sqrt{kt} \quad (2)$$

2.5.5. Aşınma (Böhme) Deneyi

Sürtünme ile aşınma kaybı deneyleri TS 2824'e uygun olarak kenar uzunlukları $71 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$ olan küp biçiminde ve her üretim içim ikişer adet numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu numuneler suya doygun hale getirilip havada ve suda tartılarak birim hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Daha sonra 70° C 'de 48 saat kurutulmuşlardır. Oda şartlarında soğuyan numuneler aşındırıcı diskin üzerine yerleştirilmiş aşındırıcı disk üzerine her turda 20g zımpara tozu serpilerek disk 22 tur çevrilmiştir ve her tur sonrasında disk yüzeyi temizlenmiştir. Aynı numune 90° döndürülerek aşındırma işlemi aynı yüzey üzerinde toplam 16 kere tekrarlanmıştır. Deneylerde kullanılan Böhme test cihazı Şekil 23.'de görülmektedir. Aşındırma işlemleri tamamlandıktan sonra, hacimsel aşınma kaybı aşağıda yer alan denklem 3'e göre hesaplanmıştır.

$$DV = Dm / \delta R \quad (3)$$

DV= Hacimsel kayıp ($\text{cm}^3/50\text{cm}^2$)

Dm= 16 periyot sonrası kütle kaybı (gr)

δR = Örnek Birim hacim ağırlığı (gr/cm^3)



Şekil 23. Aşınma deney düzeneği

2.5.6. Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

GPH numunelerin yüksek sıcaklık dayanımlarını belirlemek üzere ilk olarak numuneler 70 °C'deki etüvlerde 24 saat bekletilerek ön kurutma yapılmıştır. Kurutma işleminin sona ermesi ortam şartlarında soğutulan numuneler tartılarak Isıtma hızı 6-10 °C/dk olan fırınlara yerleştirilip sırasıyla 200, 400, 600, 800 °C'lik yüksek sıcaklıklara 1 saat süreyle maruz bırakılmıştır. Fırından çıkarılıp soğumuş numunelerin ağırlıkları ölçülerek ağırlık değişimleri belirlenmiştir. Her bir sıcaklık için her üretimden üçer adet numune kullanılmıştır. Soğuyan numunelerin eğilme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık uygulaması Şekil 24'de görülen Ref-San marka fırında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 24. Ref-San marka yüksek sıcaklık fırını

2.5.7. Su Emme Deneyi

Numuneler üzerinde yapılan su emme deneyi ASTM C642-06 standardına göre yapılmıştır. Bu standarda göre, numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra etüvde 105°C’de 24 saat kurutularak kuru ağırlığı ölçülmüştür. Kurutulan numuneler 48 saat süreyle su içinde bekletildikten sonra doymuş yüzey (DKY) haline getirilerek ağırlıkları tartılmıştır. Ağırlıkça su emme yüzdeleri aşağıda yer alan denklem 4’e göre hesaplanmıştır. Su emme deney düzeneği Şekil 25’de gösterilmiştir.

$$\text{Ağırlıkça Su Emme (\%)} = [(DKYH - EKH) / EKH] * 100 \quad (4)$$

DKY = Doymuş kuru yüzey harç ağırlığı (gr)

EK = Etüv kurusu harç ağırlığı (gr)



Şekil 25. Su emme deney düzeneği

2.5.8. Darbe Dayanımı Deneyi

Darbe deneyinde, numunenin dinamik bir etki altında kırılması için gereken enerji miktarı tespit edilir. Vuruş yapıldığında okunan değer malzemenin kırılma enerjisini verir. Bu değer numune kesitine oranlanırsa darbe dayanımı olarak ifade edilir. Bu deneyde, Şekil 26' da gösterilen Charpy darbe cihazından faydalanılmıştır.



Şekil 26. Darbe test cihazı

Deneyde 25x25x285 mm ebatlı prizmatik numuneler kullanılmıştır. Sarkacın, numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta kalan potansiyel enerjinin farkı, o numunenin kırılması için gereken enerjiyi

vermektedir. Numune cihaza ortalanarak yerleştirildikten sonra, okumaların yapıldığı kadranın göstergesi sıfır duruma getirilir ve sarkaç düzgün bir şekilde serbest bırakılır. Sonuç, deneyden sonra kadrandan okunarak darbe direnci elde edilir. Darbe dayanımı aşağıda yer alan denklem 5'e göre hesaplanmıştır. Burada F kırılma enerjisi, A yüzey alanıdır.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5)$$



3. BULGULAR

3.1. Yayılma ve Birim Ağırlık Deneyleri

Hazırlanan numunelere henüz taze haldeyken yayılma tablası deneyi uygulanmıştır. Elde edilen yayılma çapları ve birim ağırlık değerleri Tablo 7’ de verilmiştir.

Tablo 7. Harçlara ait yayılma çapları ve birim ağırlık değerleri

Numune kodu	Yayılma çapı (cm)	Birim ağırlık (g/cm ³)
300REF	14.0	2.29
300B0.5	14.5	2.29
300B1.0	14.0	2.31
300K0.5	14.0	2.30
300K1.0	13.5	2.29
320REF	13.5	2.33
320B0.5	13.0	2.32
320B1.0	12.5	2.35
320K0.5	12.5	2.34
320K1.0	12.0	2.33

3.2. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri

Üretilen numuneler üzerinde belirlenen 1 gün ve 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı sonuçları Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Basınç ve eğilme dayanımı değerleri

Numune kodu	Eğilme dayanımı (MPa)			Basınç dayanımı (MPa)		
	1 gün	28 gün	180 günlük	1 gün	28 gün	180 günlük
300REF	4.25	4.75	5.5	34.25	36.36	42
300B0.5	4.50	5.17	5.2	37.57	42.43	47.8
300B1.0	4.92	5.33	4.25	39.16	48.85	54
300K0.5	6.08	7.13	7	38.37	43.74	38
300K1.0	4.08	6.17	4.5	38.50	44.92	48
320REF	5.42	5.83	5.72	46.65	52.78	61
320B0.5	5.75	6.67	7.7	47.76	53.11	62
320B1.0	4.75	7.08	6.5	49.04	56.19	64
320K0.5	4.83	6.13	6.4	50.77	53.92	63.5
320K1.0	5.50	6.08	5.87	50.77	54.48	64

3.3. Kılcallık Deneyi

Numuneler üzerinde yapılan kılcal su emme deneyi sonrası hesaplamalar yapılmış ve bulunan katsayılar Tablo 9’da verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan grafikler Ek 1’ de verilmiştir.

Tablo 9. Harçlara ait kılcallık katsayıları

Numune kodu	Kılcallık Katsayısı (cm /dk ^{0.5})
300REF	0.0432
300B0.5	0.0318
300B1.0	0.0124
300K0.5	0.0347
300K1.0	0.0137
320REF	0.0236
320B0.5	0.0146
320B1.0	0.0139
320K0.5	0.0111
320K1.0	0.0110

3.4. Aşınma (Böhme) Deneyi

Numunelere 28 gün sonunda uygulanan aşınma deneyi sonuçları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Harçlara ait hacimsel aşınma kaybı değerleri

Numune kodu	Aşınma kaybı (cm ³ /50cm ²)
300REF	2.56
300B0.5	2.52
300B1.0	2.32
300K0.5	2.69
300K1.0	2.61
320REF	2.50
320B0.5	2.12
320B1.0	2.21
320K0.5	2.29
320K1.0	2.28

3.5. Su Emme Deneyi

Üretilen numuneler üzerinde 28 gün sonunda su emme deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Harçlara ait su emme yüzdeleri

Numune kodu	Su emme (%)
300REF	8.70
300B0.5	8.53
300B1.0	8.13
300K0.5	8.40
300K1.0	8.27
320REF	8.05
320B0.5	7.64
320B1.0	7.32
320K0.5	7.43
320K1.0	7.56

3.6. Yüksek Sıcaklık Etkisi

200°C, 400°C, 600°C ve 800 °C sıcaklıklara maruz kalan harçlara ait eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve ağırlık kayıpları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Yüksek sıcaklığın harçlar üzerindeki etkisi

Numune kodu	Uygulanan sıcaklık (°C)	Eğilme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)	Ortalama ağırlık kaybı (gr)
300 REF	200	3.25	44.84	18.83
300 REF	400	2.17	36.75	30.11
300 REF	600	1.00	15.39	59.66
300 REF	800	0.75	9.34	65.63
300B0.5	200	3.58	46.25	23.50
300B0.5	400	2.92	40.90	36.69
300B0.5	600	1.33	16.41	56.71
300B0.5	800	1.08	10.78	61.06
300B1.0	200	3.25	52.82	29.77
300B1.0	400	3.17	42.82	32.33
300B1.0	600	2.25	21.05	53.87
300B1.0	800	1.13	12.39	68.48
300K0.5	200	4.17	45.20	27.00
300K0.5	400	2.67	39.17	30.39
300K0.5	600	1.42	17.05	56.84
300K0.5	800	0.875	10.62	72.55
300K1.0	200	3.75	50.11	28.52
300K1.0	400	3.54	40.76	31.41
300K1.0	600	2.00	19.59	52.62
300K1.0	800	0.75	10.30	72.95
320 REF	200	3.67	53.74	21.23
320 REF	400	2.42	37.98	32.60
320 REF	600	1.58	23.55	51.03
320 REF	800	1.00	14.01	65.71
320B0.5	200	3.67	56.03	26.35
320B0.5	400	3.5	47.73	29.32
320B0.5	600	2.00	25.15	54.29
320B0.5	800	1.08	14.84	74.09
320B1.0	200	4.00	60.12	26.96
320B1.0	400	2.83	43.22	30.63
320B1.0	600	1.92	26.55	52.71
320B1.0	800	1.17	15.09	71.26
320K0.5	200	3.67	58.79	30.67
320K0.5	400	2.83	49.04	31.90
320K0.5	600	2.08	26.18	54.24
320K0.5	800	1.17	14.53	80.53
320K1.0	200	5.08	58.17	34.90
320K1.0	400	3.25	43.15	44.11
320K1.0	600	1.50	18.03	65.03
320K1.0	800	0.92	12.84	84.31

3.7. Ultrases Hızı

Hazırlanan numuneler 28 günlük olduğunda ultrases hızları belirlenmiştir. Elde edilen değerler Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. Harçlara ait ultrases hızı değerleri

Numune kodu	Ultrases hızı (m/sn)
300REF	3885
300B0.5	3941
300B1.0	4128
300K0.5	3906
300K1.0	4104
320REF	4290
320B0.5	4252
320B1.0	4290
320K0.5	4264
320K1.0	4277

3.8. Darbe Dayanımı Deneyi

Numunelere ait hesaplanan darbe dayanım değerleri Tablo 14’de verilmiştir.

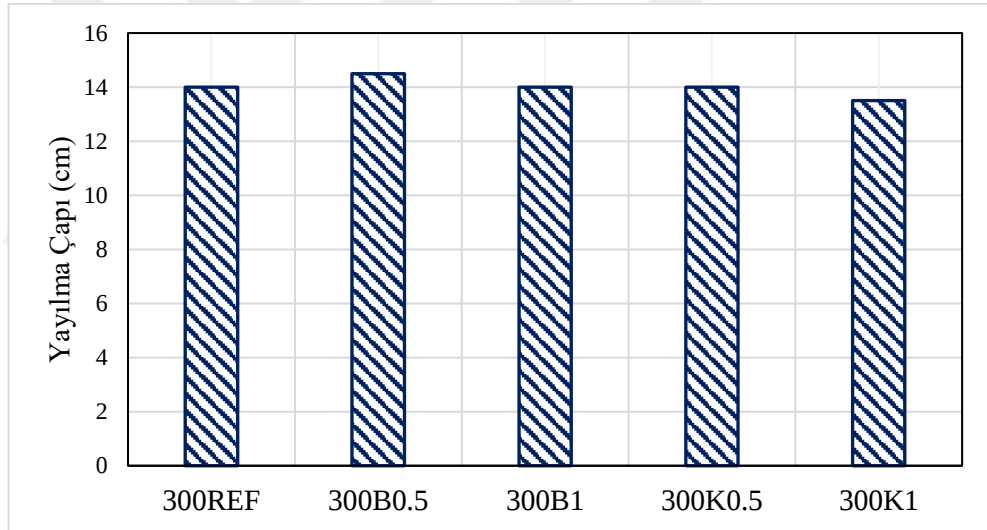
Tablo 14. Harçlara ait darbe dayanımı değerleri

Numune kodu	Darbe dayanımı (kgf.cm/cm ²)
300REF	23.36
300B0.5	24.16
300B1.0	25.12
300K0.5	24.96
300K1.0	25.92
320REF	23.68
320B0.5	24.32
320B1.0	24.96
320K0.5	25.28
320K1.0	26.24

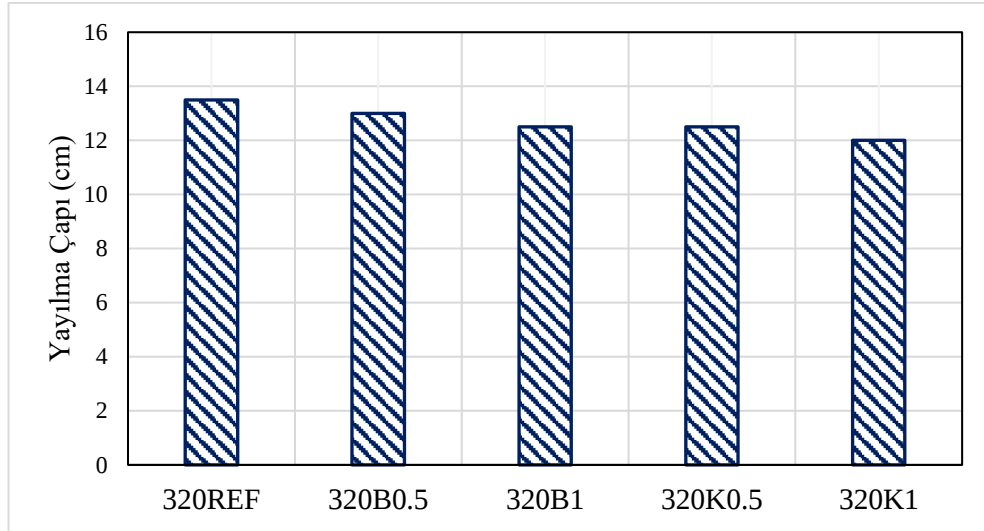
4. TARTIŞMA

4.1. Yayılma Tablası Deneyi

Tüm karışımlar için yayılma çapları 12-15 cm aralığında gerçekleşmiştir. Yayılma çaplarının bileşimlere bağlı olarak değişimleri 300 dozlu harçlar için Şekil 27’de, 320 dozlu harçlar için ise Şekil 28’de görülmektedir. Genel olarak birbirine yakın yayılma çapları ölçülmüşse de artan lif ve bağlayıcı dozajına bağlı olarak işlenebilirliğin azaldığı gözlenmiştir. Bu azalma KL ilaveli harçlarda biraz daha belirgindir. Lif içeriğinin artmasıyla birlikte liflerin birim hacimdeki dağılım yoğunluğu ve özgül yüzey alanı artmış, bu durum hamurun serbest akışını etkilemiştir.



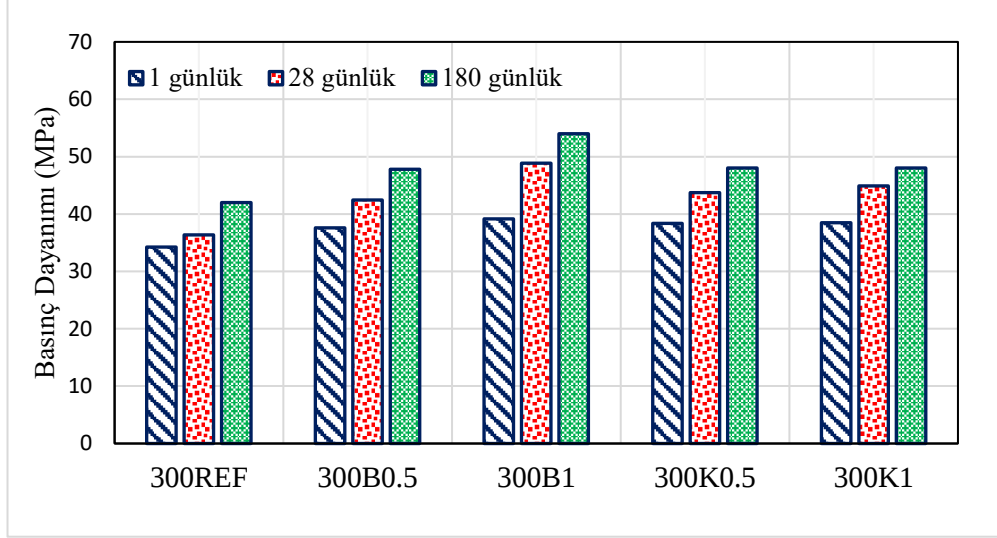
Şekil 27. 300 dozlu numunelere ait yayılma çapı değerleri



Şekil 28. 320 dozlu numunelere ait yayılma çapı değerleri

4.2. Basınç Dayanımları

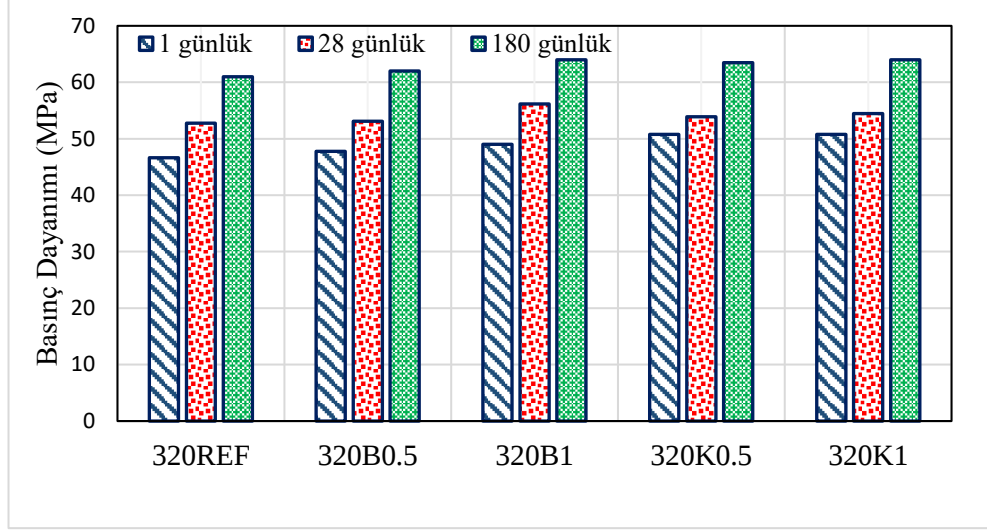
Şekil 29’da 300 dozlu harçların 1, 28 ve 180 günlük basınç dayanımlarının lif türü ve oranına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Tüm lif oranlarında lif ilavesinin basınç dayanımları üzerinde olumlu etki yaptığı görülmektedir. Bu olumlu etki BL ilaveli harçlarda daha belirgindir. 1 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde, 300REF numunelerine kıyasla 300B0.5, 300B1, 300K0.5, 300K1 nolu numunelerin dayanım artışlarının sırasıyla %9.7, %14.3, %12 ve %12 olduğu görülmektedir. 28 günlük sonuçlardaki dayanım artışları sırasıyla %16, %34, %20 ve %23 olmuştur. Görüldüğü gibi referans dayanımı 36.36 MPa iken, %1 oranında BL kullanımı en yüksek artışı sağlayarak 48.85 MPa dayanım sağlamıştır. 180 günde referans harca göre sağlanan artışlar ise sırasıyla %13, %28, %14 ve %14 olmuştur. KL ilaveli harçlarda lif oranının %0.5’den %1’e çıkması hiçbir yaşta dayanımlarda değişime sebep olmamıştır.



Şekil 29. 300 dozlu numunelere ait basınç dayanım değerleri

Şekil 30'da 320 dozlu harçların 1, 28 ve 180 günlük basınç dayanımlarının lif türü ve oranına bağlı olarak değişimi görülmektedir. 1 günlük dayanımlarda 320B0.5, 320B1, 320K0.5, 320K1 numunelerin dayanım artışı sırayla %2.3, %5.1, %8.8 ve %8.8 dir. 28 günde ise REF320 numunesine kıyasla dayanım artışları sırasıyla %0.6, %6.4, %2 ve %3 olmuştur. Aynı şekilde 180 günlük basınç dayanımlarındaki artış oranları da %1.6, %5, %4 ve %5'dir. Burada da en yüksek dayanım artışı %1 oranında BL kullanımında gerçekleşmiştir. Görüldüğü gibi daha düşük dayanım düzeyinde BL ve KL ilavesi basınç dayanımı üzerinde belirgin bir artışa neden olurken, harcın dayanım düzeyi arttığında liflerin sağladığı dayanım artışı yüksek düzeyde olmamıştır.

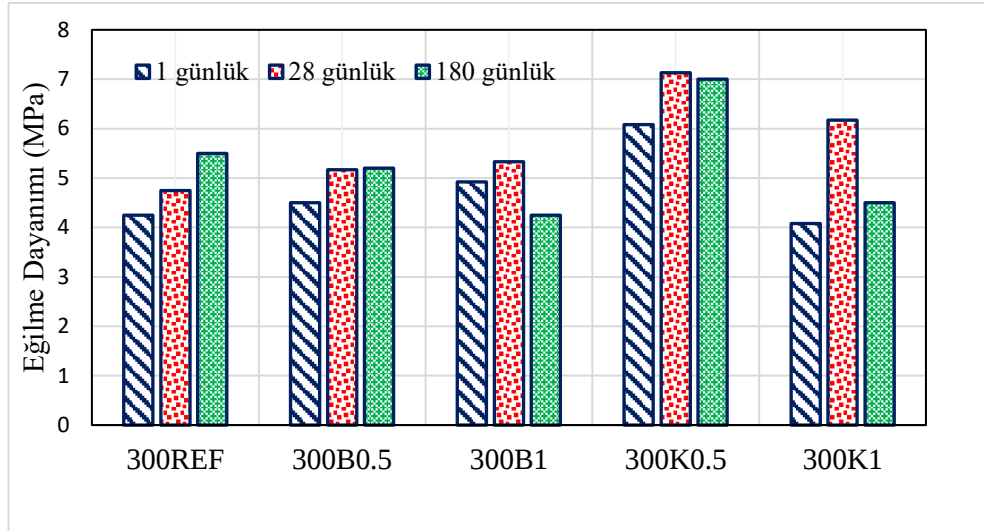
Lif ilavesinden kaynaklanan bu basınç dayanımı artışları, lif ile matris arasındaki artan bağ dayanımına ve çatlak köprüleme etkisine bağlanabilir. Çatlak oluşumu ve çatlakların gelişimi, liflerin köprüleme etkisi ve bağ dayanımı nedeniyle kontrol edilebilir, böylece eksenel yön boyunca kısılma oluşturmak için daha fazla eksenel yük gerekir, bu da basınç mukavemetlerinin artmasına neden olur (Nuaklong vd., 2021; Şahin vd., 2021; Vilaplana vd., 2016; Nazir vd., 2023).



Şekil 30. 320 dozlu numunelere ait basınç dayanım değerleri

4.3. Eğilme Dayanımları

Şekil 31’de 300 dozlu harçların lif türü ve oranına bağlı olarak 1, 28 ve 180 günlük eğilme dayanımları görülmektedir. 1 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde, 300REF numunelerine kıyasla 300B0.5, 300B1, 300K0.5 kodlu numunelerin eğilme dayanımları sırasıyla %5.9, %15.8, ve %43 oranında artmış, 300K1 numunelerinin eğilme dayanımı ise %4 oranında azalmıştır. 28 günde ise referans numunesine kıyasla sağlanan artışlar sırasıyla %8.8, %12.2, %50.1 ve 300K1 numunelerinde %29.9 olmuştur. 180 günde referans numuneleri 28 güne kıyasla %15.8 dayanım artışı sağlarken lifli numunelerde eğilme dayanımları artmamış, aksine %1 oranında lif katkılılarda 28 günlük dayanımlardan daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Bu numunelerde kırılma yüzeylerine bakıldığında Şekil 32’de görüldüğü gibi lif topakları gözlenmiştir. Bu durum dayanımlardaki olağan dışı bu azalmanın sebebi olarak düşünülebilir.

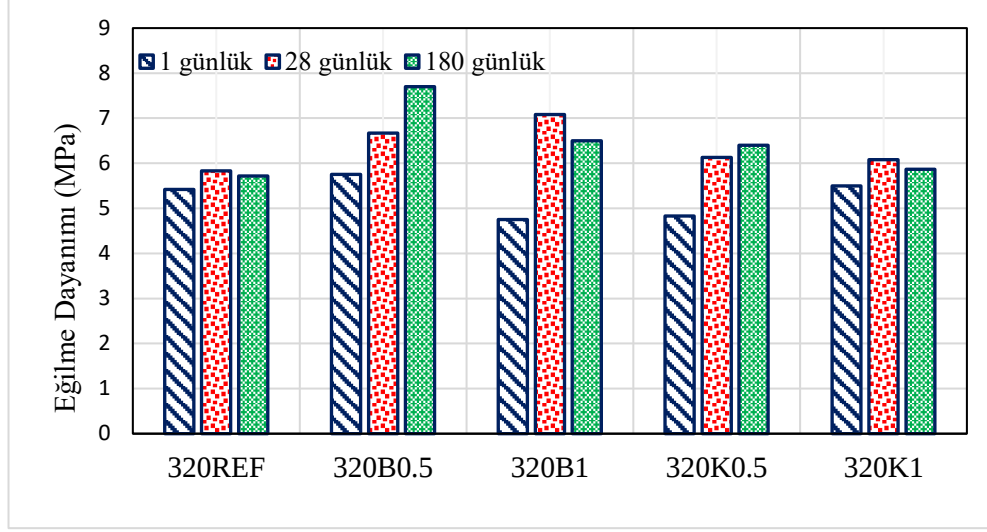


Şekil 31. 300 dozlu numunelere ait 1, 28 ve 180 günlük eğilme dayanımı değerleri



Şekil 32. Geopolimer harç içinde kümelenen lif topakları

Şekil 33’de 320 dozlu numunelerin lif türü ve oranına bağlı olarak 1, 28 ve 180 günlük eğilme dayanımları görülmektedir. 1 günlük dayanım değerlerinde bakıldığında lif oranındaki artış düzenli olmayan sonuçlara yol açsa da 28 günlük dayanımlarda 320REF numunelerine kıyasla 320B0.5, 320B1, 320K0.5 ve 320K1 numunelerinin sağladığı dayanım artışları sırasıyla %14.4, %21.4, %5.1 ve %4.3 olmuştur. 180 günlük eğilme dayanımlarında ise %0.5 BL ilaveli numuneler en yüksek dayanım artışını göstermiştir. KL ilaveli numunelerde ise 28 günlük dayanımlara yakın değerler oluşmuştur.

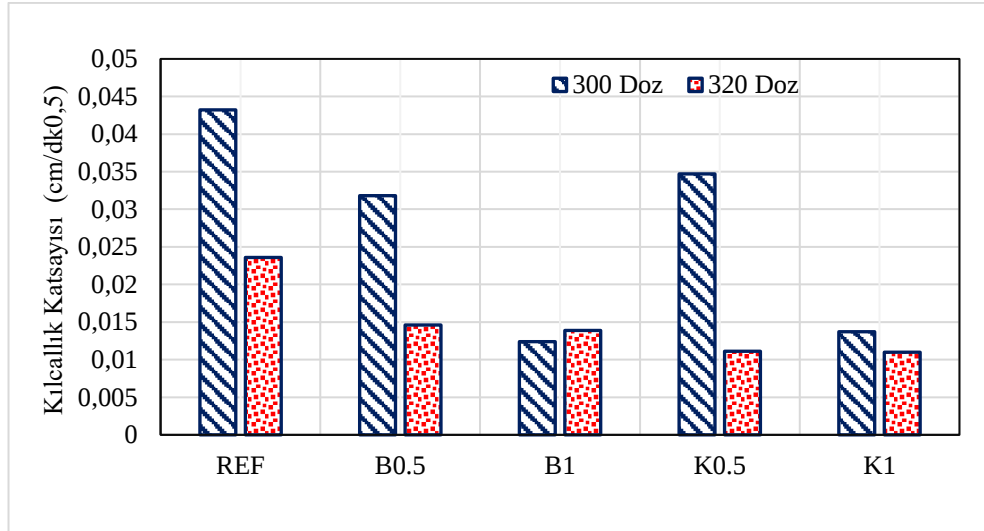


Şekil 33. 320 dozlu numunelere ait 1, 28 ve 180 günlük eğilme dayanımı değerleri

4.4. Kılcallık Katsayıları

Şekil 34’de kılcallık katsayılarının lif türü ve oranına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Hem BL hem de KL ilaveli harçlarda lif ilavesi kılcallık katsayılarını azaltmıştır. 300 dozlu harçlarda referans numunelerine kıyasla 300B0.5, 300B1, 300K0.5 ve 300K1 numunelerinin kılcallık katsayısındaki azalış sırasıyla %27, %71, %20 ve %69 olmuştur. Lif oranındaki artışın kılcallık katsayısının azalmasında belirgin şekilde etkili olduğu görülmektedir. Aralarında çok önemli bir fark olmasa da BL kılcallık katsayısında daha fazla azalmaya sebep olmuştur.

320 dozlu GPH’lerin kılcallık katsayıları 300 dozlu harçlara göre önemli oranda azalmıştır. Örneğin 300 dozlu referans numunesinin kılcallık katsayısı $0.0432 \text{ cm/dk}^{0.5}$ olurken 320 dozlu referans numunesindeki %46 azalarak $0.0236 \text{ cm/dk}^{0.5}$ olmuştur. 320 dozlu harçlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde lif ilavesi ile kılcallık katsayılarının referans numunelerine oranla azalışı 320B0.5, 320B1, 320K0.5, 320K1 numuneleri için sırasıyla %38, %41, %53 ve %53 olmuştur. Görüldüğü gibi yüksek dozajlı harçlarda her iki lif için de lif oranının %0.5 ten %1 e çıkması kılcallık katsayılarında daha fazla azalmaya yol açmamıştır.

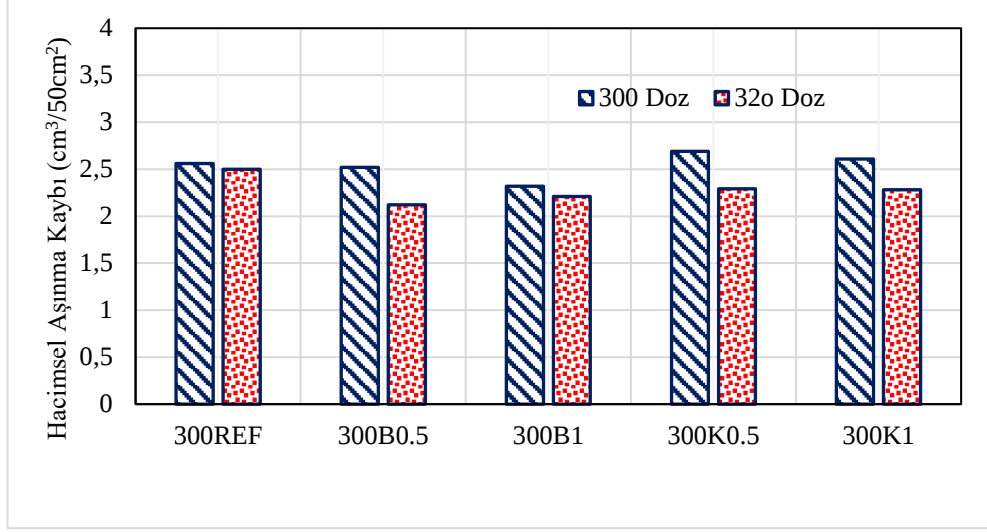


Şekil 34. Lif türü ve oranlarına bağlı olarak kılcallık katsayılarının değişimi

4.5. Hacimsel Aşınma Kayıpları

Böhme deneyinden elde edilen hacimsel aşınma kayıplarının lif türü ve oranlarına bağlı olarak değişimi Şekil 35’de görülmektedir. Aşınma kayıpları düşük dozajlı numunelerde yüksek değerler alırken yüksek dozajlı numunelerde azalmıştır. 300 dozlu numunelerde %1 BL ilavesi aşınma kaybında %7 oranında azalma sağlarken KL ilaveli numunelerde az da olsa artış gerçekleşmiştir. Bu artış 300K0.5 ve 300K1 harçları için %5 ve %2 düzeyindedir. Yüksek dozajlı harçlarda ise 320B0.5, 320B1, 320K0.5, 320K1 harçlarının aşınma kayıpları referans harcına göre sırasıyla %15.2, %11.6, %8.4 ve %8.8 oranında daha az olmuştur. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki karışımlarda BL ilavesi aşınma değerlerinin azaltılması açısından KL ilavesine kıyasla biraz daha etkilidir.

Çeşitli araştırmacılar artan lif içeriğinin aşınma direncinin geliştirilmesinde önemli bir faktör olduğunu, bu durumun nedeninin liflerin daha fazla aşınma direnci sağlayan bir katman oluşturma yeteneği olabileceğini belirtmişlerdir (Sathish Kumar vd., 2021 ; Çelik vd., 2018). Bizim çalışmamızda ise bu yönde belirgin bir eğilim oluşmamıştır.

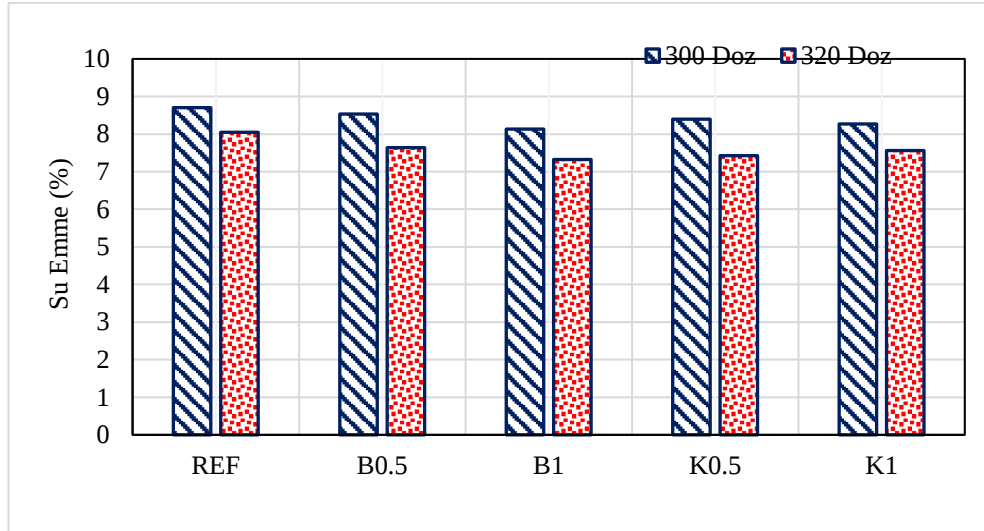


Şekil 35. Lif türü ve oranlarına bağlı olarak hacimsel aşınma kayıplarının değişimi

4.6. Su Emme Oranları

Şekil 36'da lif türü ve oranlarına bağlı olarak su emme yüzdelilerindeki değişim görülmektedir. Referans numunelerine göre 300B0.5, 300B1, 300K0.5, 300K1 harçlarında su emme yüzdelilerinde sırasıyla %2, %7, %3 ve %5 azalmıştır. 320 dozlu harçlarda ise referans numunelerine göre su emmelerdeki azalma yine aynı sırayla %5, %9, %8 ve %6 olmuştur. Her iki farklı lif ikameli harçlar için de referans numunelere kıyasla yüksek bağlayıcı dozajlı numunelerde su emme yüzdelilerindeki azalış düşük dozajlı olanlara kıyasla daha yüksek değerler almıştır. Her iki dozaj için de en az su emme sağlayan %1 oranında BL ilaveli harçlar olmuştur.

Genel olarak lif ikame miktarlarındaki artış su emme değerlerinde azalışa neden olurken 320 dozlu %1 KL ilaveli harçların su emmesi %0.5 lifli olanlardan çok az da olsa yüksek olmuştur. Bu harcın taze haldeki işlenebilirliği ve KL'nin homojen bir şekilde dağılımının zorluğuyla ilgili problemler gözlenmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak daha gözenekli bir iç yapının varlığı su emme yüzdesindeki artışa sebep olmuş olabilir.



Şekil 36. Lif türü ve oranlarına bağlı olarak su emme yüzdelerinin değişimi

Literatürde lifli GPH'lerin su emme performansı ile ilgili pek çok farklı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bir bölümü lifli GPH'ler için yüksek su emme direncine sahip olduğunu ifade ederken önemli bir bölümü düşük su emme direnci gösterdiklerini savunmuşlardır (Lavanya & Jegan, 2015; Fkini, 2022). Bu farklılıkların temel nedeni GPH'lerin su emme özelliklerinin hammaddelerin parçacık boyutu dağılımına, kütleme şartlarına, Si/ Al oranına, lif türü vs. gibi pek çok farklı değişkenden etkilenmesidir (Nazari& Rohani, 2012).

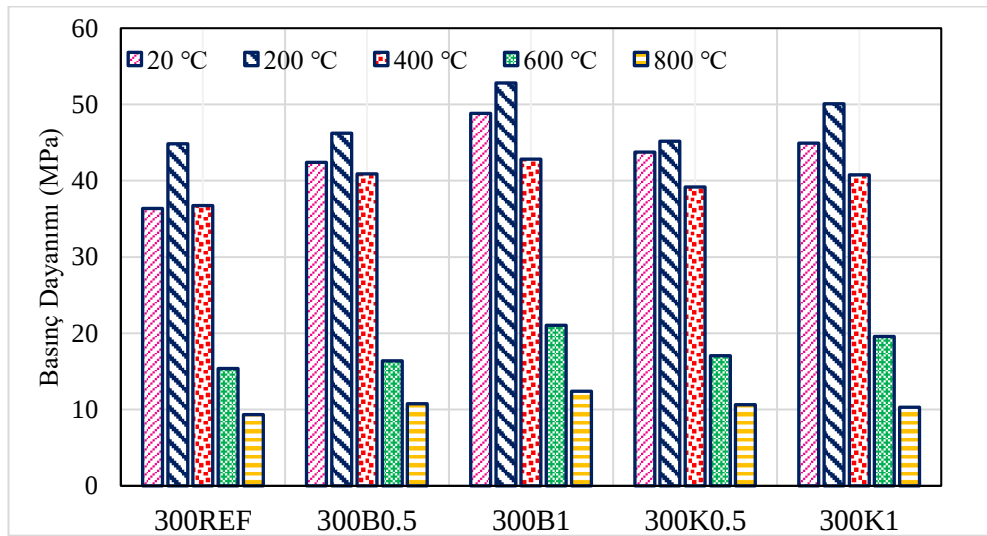
4.7. Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

4.7.1. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Basınç Dayanımlarının Değişimi

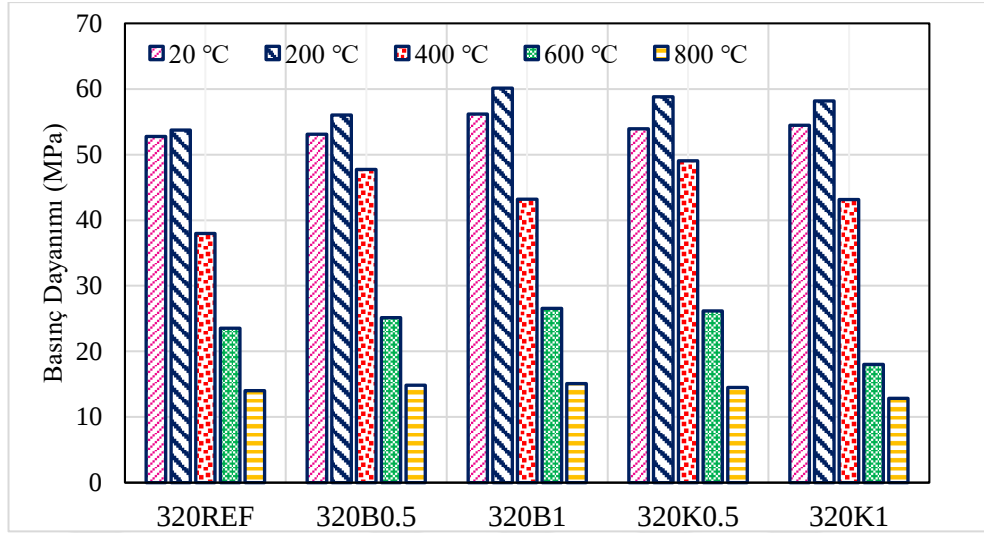
Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerin sıcaklık uygulaması sonrası 300 dozlu numuneler için elde edilen basınç dayanımı sonuçları Şekil 37'de görülmektedir. Sıcaklığa maruz kalmayan numunelere kıyasla 200°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin dayanımlarında artış oluşmuştur. Artış oranları 300REF, 300B0.5, 300B1, 300K0.5, 300K1 harçları için sırasıyla %23, %9, %8, %3 ve %12 olmuştur. Belirli sıcaklık değerlerine kadar numunelerin basınç dayanımlarında iyileşme literatürde de görülen bir sonuçtur (Pan & Sanjayan, 2012.; Ranjbar vd. 2014.; Behera vd., 2018). Pan ve Sanjayan (2012) 200-290 °C arası sıcaklıkta GPH'lerin dayanımında %61 artış olduğunu tespit etmiş ve bunun henüz gerçekleşmemiş geopolimerizasyon reaksiyonlarının ısı etkisiyle tamamlanması nedeniyle

oluşturduğunu belirtmiştir. 400°C sıcaklıkta referans numunesinin dayanımı değişmemiş, 300B0.5, 300B1, 300K0.5, 300K1 harçlarının dayanımında sırasıyla %4, %12, %10 ve %9 oranında azalma oluşmuştur. Harçların 600 °C ve üzeri sıcaklıklara maruz kalması mekanik özelliklerde belirgin bozulmalara neden olmuş, basınç dayanımlarındaki kayıplar 800°C de %74-%76 aralığında gerçekleşmiştir. Benzer eğilim Şekil 38’de verilen 320 dozajlı harçlar için de gerçekleşmiştir. Fakat bu harçlarda 200°C sıcaklık uygulamasının sağladığı dayanım artışı daha düşük düzeylerde olmuştur. Dayanım artış oranları 320REF, 320B0.5, 320B1, 320K0.5, 320K1 için sırasıyla %2, %6, %7, %9 ve %7 düzeyindedir. 400°C’de dayanımlar ısıtıl işlem görmemiş numunelere göre %28, %10, %23, %9 ve %21 oranında azalmıştır. Görüldüğü gibi düşük dozajlı harçlarla kıyaslandığında 200 °C’de daha az dayanım artışı ve 400°C’de daha fazla dayanım kaybı gerçekleşmiştir. 800 °C’de ise kayıplar benzer şekilde %72-%76 arasında oluşmuştur. Pan ve Sanjayan (2012) 200 °C’nin üzerindeki sıcaklıklardan sonra, malzeme yapısının giderek tahrip olmasına yol açan süreçler hakim olmaya başladığını ve bunun temel nedeninin termal uyumsuzluk olduğunu belirtmiştir. Aynı görüş Kong ve Sayan (2008) tarafından da vurgulanmıştır. Albidah (2023) 300 °C’de GP mikroyapısında yer alan üç boyutlu jellerin ayrışmaya başladığını, bu jellerin dehidrasyonunun 450 °C sıcaklık etkisinin ardından önemli mukavemet kayıplarına neden olduğunu belirtmiştir.

Her iki dozajda ve tüm sıcaklıklarda en yüksek dayanımları %1 BL ilaveli harçlar sağlamıştır.



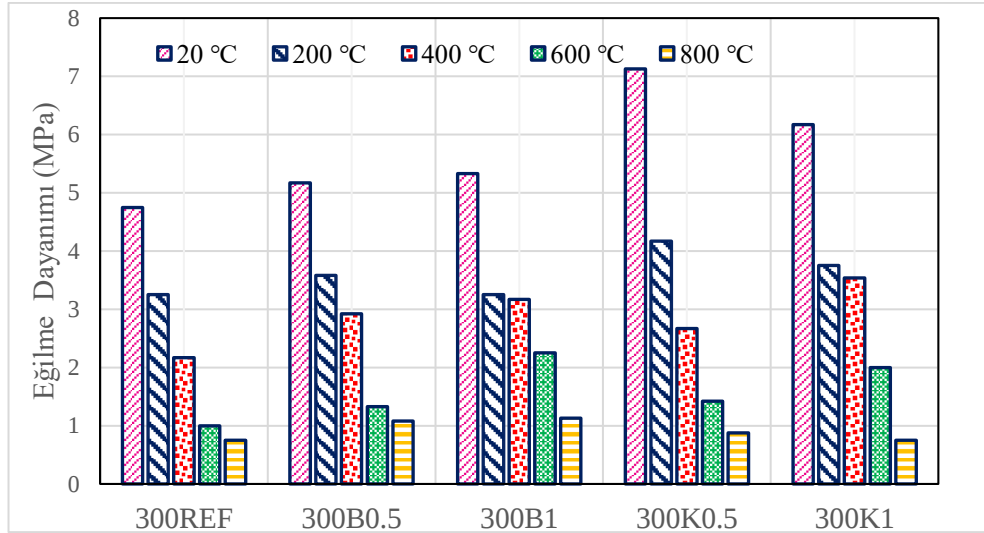
Şekil 37. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 300 dozlu numunelerin basınç dayanımı değerleri



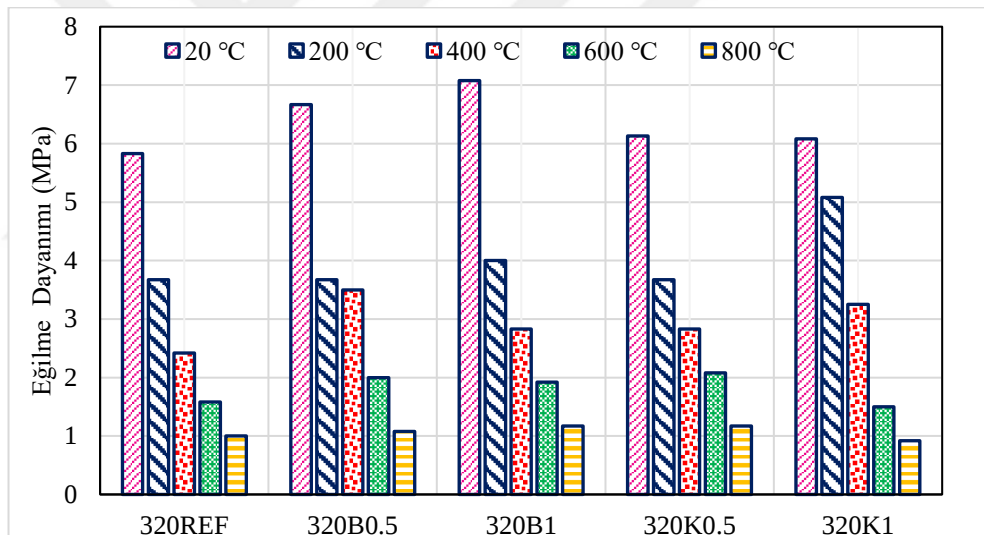
Şekil 38. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 320 dozlu numunelerin basınç dayanımı değerleri

4.7.2. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Eğilme Dayanımlarının Değişimi

Şekil 39’da 300 dozlu harçların, Şekil 40’da 320 dozlu harçların eğilme dayanımlarında sıcaklığa bağlı oluşan değişimler görülmektedir. Tüm sıcaklıklarda dayanım kaybı oluşmuş, kullanılan liflerin dayanım kaybı açısından belirgin bir etkisi ortaya çıkmamıştır. Eğilme dayanımlarındaki kayıp 300 dozlu ve 320 dozlu harçlarda benzer oranlarda gerçekleşmiş, lif türü ve oranından bağımsız olarak 200°C’de ortalama %37, 400°C’de %50, 600°C’de %70 ve 800°C’de %83 düzeyinde gerçekleşmiştir. Örneğin 800°C’de 300 dozlu harçların dayanım kayıpları 300REF, 300B0.5, 300B1, 300K0.5, 300K1 harçlarında sırasıyla %84, %79, %79, %88 ve %88 olurken 320 dozlu harçlarda 320REF, 320B0.5, 320B1, 320K0.5, 320K1 için kayıplar sırasıyla %83, %84, %83, %81 ve %85 olmuştur. Zhao vd. (2021), 300°C’nin üzerinde aşırı nem kaybı nedeniyle matris mikro yapısında büzülme çatlakları meydana geldiğinden, eğilme ve basınç dayanımlarının hızla düştüğünü, 600°C’nin üzerinde ise GP yapısının bozulması, gözenekliliğin artması, liflerin özelliklerinde bozulma, liflerin matristen ayrılması durumlarının oluştuğunu vurgulamıştır.



Şekil 39. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 300 dozlu numunelerin eğilme dayanımı değerleri

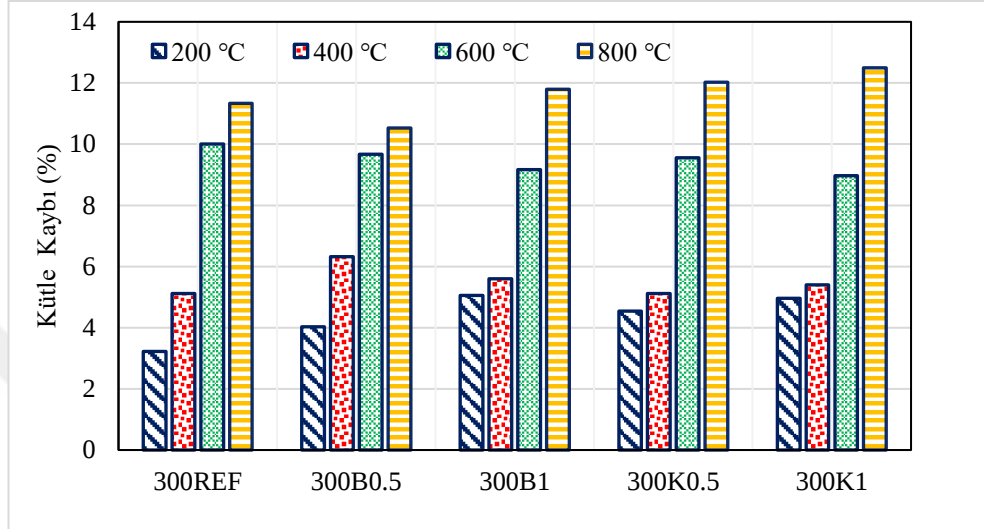


Şekil 40. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 320 dozlu numunelerin eğilme dayanımı değerleri

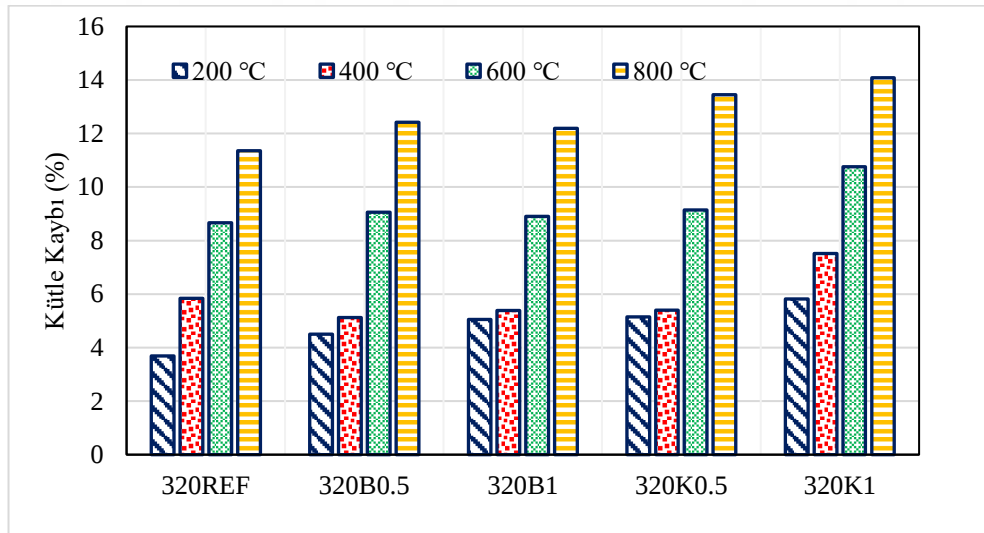
4.7.3. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Kütle Kayıplarının Değişimi

Şekil 41’de 300 dozlu harçların, Şekil 42’de 320 dozlu harçların yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle kayıplarındaki değişim görülmektedir. Her iki dozajda da uygulanan sıcaklık değerleri arttıkça kütle kayıpları da artmış, 200°C’de en az kayıp referans numunelerinde yani lif içermeyen numunelerde oluşmuştur. 400°C ve 600°C sıcaklıklardaki kütle kayıplarında belirgin bir eğilim gözlenmemiştir. 800°C sıcaklık etkisinde her iki dozajda ve her iki lif için lif oranı arttıkça kütle kaybı artmıştır. En yüksek kayıp %1 KL’li harçlarda

300 doz için %12.5, 320 doz için %14 düzeyindedir. Zhao vd. (2021) düşük sıcaklıklarda (yani 100 ve 200 °C) GP numunelerinin kütle kayıplarını esas olarak suyun buharlaşmasına bağlamışlardır. Daha yüksek sıcaklıklarda (300 °C'nin üzerinde), GPH'nin kütle kaybının ayrıca iç bileşenlerin ayrışmasını da içerdiğini; cürufun reaksiyon ürünlerinin, yüksek sıcaklıkta daha kolay ayrıştığını söylemişlerdir.



Şekil 41. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 300 dozlu numunelerin kütle kaybı oranları



Şekil 42. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan 320 dozlu numunelerin kütle kaybı oranları

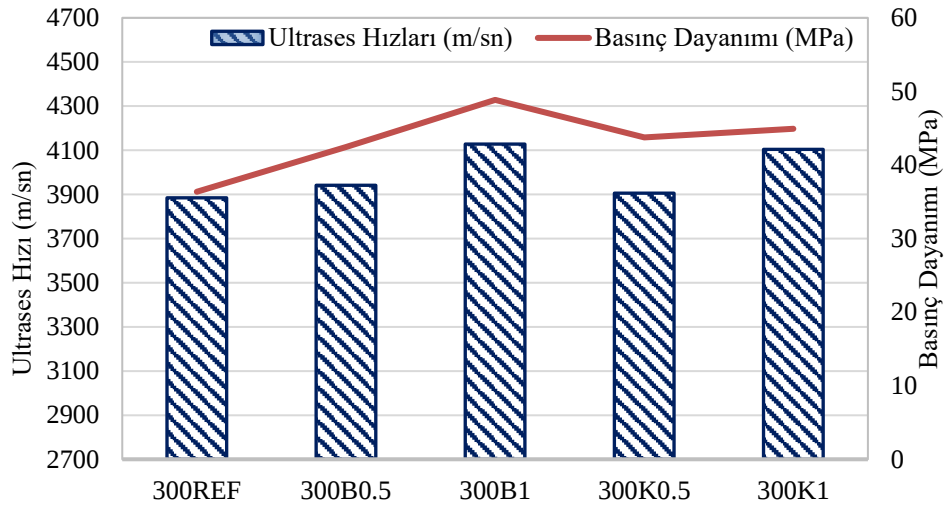
4.8. Ultrases Hızı Deneyi

Şekil 43'de 300 dozlu harçlara ait ve Şekil 44'de 320 dozlu harçlara ait ultra ses hızı ölçümü sonuçları verilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca basınç dayanımı değerleri de

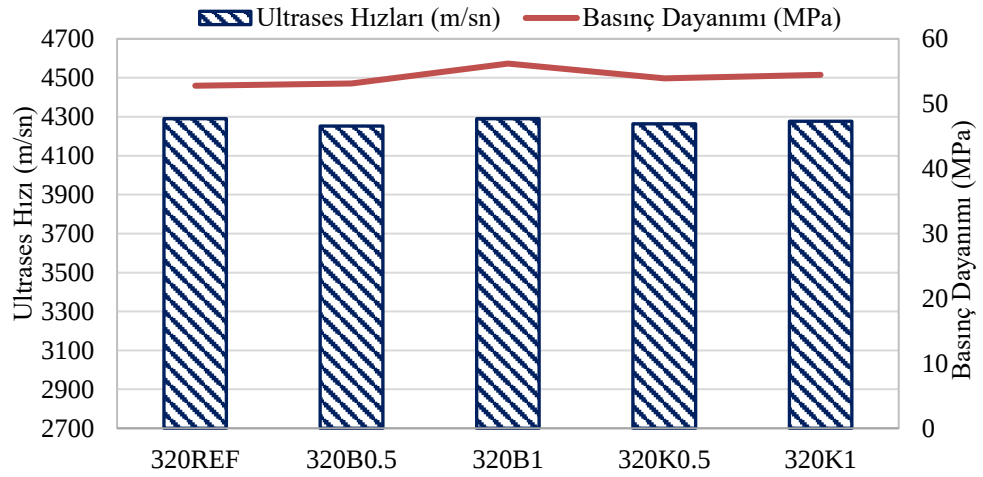
görülmektedir. Malzemelerin yapısındaki boşluk miktarı ile ultrases hızı arasında bir ilişki vardır. Boşluk oranının azalmasıyla ultrases dalgalarının hızı artar. Her iki grafikte de ultrases hızlarına bakıldığında, basınç dayanımı değerleriyle paralel bir ilişkiye olduğu görülmektedir.

Şekil 43’de lif ilave oranı arttıkça ultrases hızlarının da arttığı görülmektedir. Bu durum basınç dayanımındaki artışla da paraleldir. Genel olarak lif katkılı numunelerden düşük dozajlı olanların ultrases hızları, yüksek dozajlı olanlara kıyasla daha düşük ölçülmüştür. Bu durumun yoğun mikro yapı sebebiyle ultrases dalgalarının yayılmasındaki hızlanmayla ilişkili olduğu söylenebilir (Al-Tayyib vd., 1989; Maslehuddin vd., 2003). Şekil 44’de yüksek dozajlı numunelerin ultrases hızlarının genellikle aynı düzeyde olduğu görülmektedir. Zira bu harçların basınç dayanımları da 52 MPa-56 MPa gibi dar bir aralıkta değişmiştir. Üretilen tüm GP numuneler ultrases hızı sınıflandırmasına göre iyi sınıfında yer almıştır (IS., 1992).

Bu sonuçların aksine literatürde lif oranının artmasının ultrases hızında azalmaya yol açtığına dair çalışmalar da mevcuttur. Gaddafi vd. (2023) UK ve granüle YFC kullanarak ürettikleri GPH’lere çeşitli oranlarda çelik ve polipropilen lif katmışlar ve %1.5 oranında lif kullanımının ultrases hızlarını %3-4 oranında azalttığını belirtmişler, bunu lif nedeniyle matriste oluşan düzensizliklere ve boşlukların artmasına bağlamışlardır. Hedjazi ve Castillo (2020) ise çelik ve cam lif kullanımının ultrases hızını düşürdüğünü, naylon lif kullanımının arttırdığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni olarak da çelik ve cam liflerinin işlenebilirliği azalttığını ve bundan kaynaklı olarak elyaf köprülemesinin de zayıf olduğunu, naylon liflerin harcın işlenebilirliğini fazla azaltmadığını ve dolayısıyla iyi bir lif köprüleme etkisinin olduğunu ileri sürmüşlerdir.



Şekil 43. 300 dozlu numunelere ait ultrases hızları ve basınç dayanımları



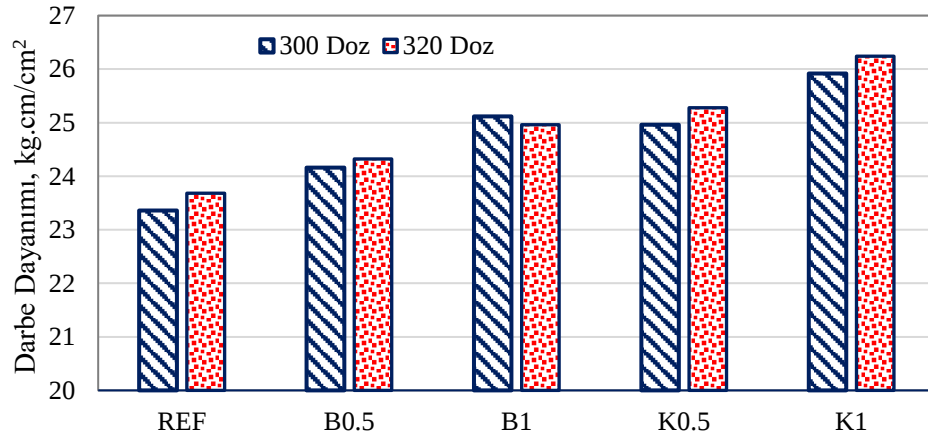
Şekil 44. 320 dozlu numunelere ait ultrases hızları ve basınç dayanımları

4.9. Darbe Dayanımı Deneyi

Şekil 45’de 300 ve 320 dozlu harçların darbe dayanımları görülmektedir. Referans numunelerin darbe dayanımları 300 dozlu harçlar için 23.36 kg.cm/cm², 320 dozlu harçlar için 23.68 kg.cm/cm² dir. Genel olarak her iki lif türü için de lif oranındaki artışın darbe dayanımını artırıcı yönde rol oynadığı görülmektedir. 300 dozlu harçlarda %0.5 BL ilavesi darbe dayanımında %3.4, %1 BL ilavesi %7.5 artış oluşturmuştur. Bu dozajda %0.5 ve %1 KL ilavelerinin oluşturduğu artışlar ise sırasıyla %6.8 ve %11 olmuştur. 320 dozlu harçlarda

ise %0.5 ve %1 BL ilavesi darbe dayanımını %2.7 ve %5.4 oranında, %0.5 ve %1 KL ilaveleri ise %6.8 ve %11 oranlarında arttırmıştır. Görüldüğü gibi her iki dozajdaki harçlarda da en yüksek darbe dayanımını %1 KL katkısı sağlamıştır.

Literatürde lif takviyelerinin GPH'lerin darbe dayanımlarını nasıl etkilediğine yönelik fazla araştırma yoktur. Mevcut araştırmalarda da birbirinden farklı deney yöntemleri kullanılmıştır. Ziada vd. (2021) UK bazlı GPH'lere yüksek oranlarda BL ilave ettikleri çalışmalarında Charpy deneyi yaparak %4 BL ilavesinin darbe dayanımını %76 oranında arttığını belirtmişlerdir. Ziada vd. (2023) başka bir çalışmada cüruf ve metakaolin bazlı harçlara çeşitli lifler ilave ederek darbe dayanımlarını belirlemişler, %0.5 ve %1 BL ilavesinin darbe dayanımını yaklaşık %30 ve %60 oranlarında iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.



Şekil 45. Darbe dayanımı değerleri

5. SONUÇLAR

YFC esaslı GPH'lere BL ve KL ilavesinin bazı mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. YFC iki farklı dozajda kullanılmış, lifler karışımlara %0.5 ve %1 oranlarında ilave edilmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ve öneriler şu şekilde sıralanmıştır;

1. Tüm karışımlarda hedeflenen 10-15 cm aralığında yayılma çapı elde edilmiştir. 300 dozlu harçlarda lif ilavesi yayılma açısından belirgin bir etki oluşturmazken 320 dozlu harçlarda lif ilavesi işlenebilirliğin azalmasına yol açmıştır. KL kullanılan harçlarda bu azalma daha belirgindir.

2. Lif oranının artması basınç dayanımları üzerinde olumlu etki yapmıştır. Bu etki 300 dozajlı harçlarda daha belirgindir. %0.5 lif ilavesi KL ve BL katkılı harçlarda yaklaşık eşit düzeyde dayanım artışı sağlamıştır. En yüksek dayanım artışı %1 oranında BL ilavesi ile 1 günlük basınç dayanımında %14, 28 günde %34 ve 180 günde %28 artış şeklinde gerçekleşmiştir.

3. Dayanım düzeyi yüksek olan harçlarda lif ilavesinin basınç dayanımında oluşturduğu iyileşme düşük dayanım düzeyindeki harçlara oranla oldukça azdır ve lif türleri arasında önemli bir fark oluşmamıştır. 180 günlük dayanımlara bakıldığında %1 oranında BL ve KL ilaveleri basınç dayanımında eşit olarak %5 artış sağlamışlardır.

4. Lif ilavesi eğilme dayanımlarını iyileştirmiştir. 300 dozlu harçlarda en yüksek değerleri KL ilaveli harçlar sağlamıştır. %0.5 KL ilavesinin basınç dayanımında oluşturduğu artışlar 1 günde %43, 28 günde %50 olmuştur. 320 dozlu harçlarda ise %1 BL 28 günde en iyi artışı sağlamıştır. Genel olarak eğilme dayanımı sonuçlarında, özellikle de 28 ve 180 günlük sonuçlar karşılaştırıldığında bir düzensizlik olduğu görülmektedir. Bunun bazı numuneler içindeki lif topaklanmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

5. Hem BL hem de KL ilaveli harçlarda her iki dayanım düzeyinde de lif ilavesi kılcallık katsayısında önemli oranda iyileşme sağlamıştır. 300 dozlu harçlarda %0.5 ve %1 BL ilaveli numunelerin referans numunelere göre kılcallık katsayısındaki azalış %27-%71 aralığında değişirken KL ilaveli numunelerde %20-%69 aralığında yer almıştır. Yüksek bağlayıcı dozajlı numuneler için hem BL hem de KL ilave oranlarının %0.5'den %1'e çıkması kılcallık katsayısını önemli miktarda değiştirmemiştir.

6. Böhme deneyinden elde edilen aşınma kayıpları 300 dozajlı harçlarda yüksek değerler alırken yüksek dozajlı harçlarda daha düşük düzeyde olmuştur. Lif ilavesi de yüksek dozajlı harçlarda aşınma kaybının azalmasını sağlamıştır. BL ilavesi aşınma kayıplarının azaltılması açısından KL'ye kıyasla daha etkili olmuştur.

7. Lif ilavesi su emme oranlarında azalma sağlamıştır. Bu azalma yüksek dayanım düzeyindeki harçlarda daha belirgindir. Su emme oranı en düşük olan harçlar her iki dayanım düzeyi için de %1 oranında BL ilaveli harçlar olmuştur

8. Her iki dozajdaki harçlarda da 200°C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında artış gerçekleşmiştir. Bu artış lifli harçlarda %3-%12 aralığında olmuştur. 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklık etkisindeki harçların basınç dayanımlarında ise azalma gözlenmiştir. 600°C ve 800°C'deki dayanım kayıpları lif türünden bağımsız olarak 300 dozajlı harçlarda ortalama %58 ve %56, 320 dozajlı harçlarda ise %75 ve %73 olmuştur. Yani yüksek sıcaklığın basınç dayanımında oluşturduğu kayıp açısından lif türleri arasında bir fark gözlenmemiştir. Her iki dozajda ve tüm sıcaklıklarda en yüksek basınç dayanımlarını %1 BL ilaveli harçlar sağlamıştır.

9. Yüksek sıcaklık etkisi altında eğilme dayanımlarında kayıp oluşmuş, kullanılan liflerin dayanım kaybı açısından belirgin bir etkisi ortaya çıkmamıştır. Eğilme dayanımlarındaki kayıp 300 dozlu ve 320 dozlu harçlarda benzer oranlarda gerçekleşmiş, lif türü ve oranından bağımsız olarak 200°C'de ortalama %37, 400°C'de %50, 600°C'de %70 ve 800°C'de %83 düzeyinde gerçekleşmiştir.

10. Uygulanan sıcaklığa bağlı olarak her bir grup karışım için sıcaklık değerleri arttıkça kütle kayıpları da artmıştır. 200°C'de en az kayıp referans numunelerinde yani lif içermeyen numunelerde oluşmuştur. 800°C sıcaklık etkisindeki harçlarda her iki dozaj ve her iki lif için lif oranı arttıkça kütle kaybı artmıştır. En yüksek kayıp %1 KL ilaveli harçlarda 300 doz için %12,5, 320 doz için %14 düzeyindedir.

11. Düşük dozajlı harçlarda lif ilave oranı arttıkça ultrases hızları da artmış, yüksek dozajda belirgin bir değişim olmamıştır. Ultrases hızlarındaki değişim harçların basınç dayanımlarıyla paralellik göstermiştir.

12. Her iki lif türü için de lif oranındaki artış darbe dayanımını arttırıcı yönde etki etmiştir. En yüksek darbe dayanımını %1 KL ilavesi sağlamıştır.

13. Sonuç olarak bu çalışma koşullarında üretilen GPH'lere BL ve KL ilavesi hem dayanım hem de dayanıklılık özelliklerinde iyileşme sağlamıştır. Lif türünün etkisi

özelliklere göre değişmiş, en olumlu iyileşmeler genellikle %1 lif ilaveli harçlarda gözlenmiştir.

14. Daha sonraki çalışmalar için farklı öncül malzemeler kullanılması ve daha geniş bir lif katkısı aralığının taranması önerilebilir.



6. KAYNAKLAR

- Ahmed, H. U., Mohammed, A. A., Rafiq, S., Mohammed, A. S., Mosavi, A., Sor, N. H., & Qaidi, S. M. (2021). Compressive strength of sustainable geopolymer concrete composites: a state-of-the-art review. *Sustainability*, 13(24), 13502.
- Aiken, T. A., Kwasny, J., Sha, W., & Tong, K. T. (2021). Mechanical and durability properties of alkali-activated fly ash concrete with increasing slag content. *Construction and Building Materials*, 301, 124330.
- Albidah, A. S. (2023). Influence of reclaimed asphalt pavement aggregate on the performance of metakaolin-based geopolymer concrete at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 402, 132945.
- Ali, N., Canpolat, O., Aygörmez, Y., & Al-Mashhadani, M. M. (2020). Evaluation of the 12–24 mm basalt fibers and boron waste on reinforced metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 251, 118976.
- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A. P., Cundy, A. B., Tsioulou, O. T., & Alrekabi, S. (2019). Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced geopolymer concrete under accelerated corrosion. In *Structures* (Vol. 19, pp. 394-410).
- 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, e00733.
- Al-Tayyib, A. J., Baluch, M. H., Sharif, A. F. M., & Mahamud, M. M. (1989). The effect of thermal cycling on the durability of concrete made from local materials in the Arabian Gulf countries. *Cement and Concrete Research*, 19(1), 131-142.
- Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270, 121857.
- Amran, M., Fediuk, R., Abdelgader, H. S., Murali, G., Ozbakkaloglu, T., Lee, Y. H., & Lee, Y. Y. (2022). Fiber-reinforced alkali-activated concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 45, 103638.
- Annadurai, S., Baskar, P., & Elango, K. S. (2023). Geopolymer concrete reinforced with basalt fibres: An experimental investigation. *Materials Today: Proceedings*.
- Ardanuy, M., Claramunt, J., & Toledo Filho, R. D. (2015). Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and building materials*, 79, 115-128.

- Arslan, A. A., Uysal, M., Yılmaz, A., Al-mashhadani, M. M., Canpolat, O., Şahin, F., & Aygörmmez, Y. (2019). Influence of wetting-drying curing system on the performance of fiber reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 225, 909-926.
- ASTM C 618, (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02.
- Aygörmmez, Y., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M. M., & Uysal, M. (2020). Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 235, 117502.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and concrete research*, 35(4), 658-670.
- Behera, P. Baheti V., Militky, J., & Louda, P. (2018). Elevated temperature properties of basalt microfibril filled geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, Volume 163, Pages 850-860.
- Bernal, S., Gutierrez, R. D., Delvesto, S. & Rodriguez, E. (2010). Performance of an alkaliactivated slag concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, Cilt 24, pp. 208-214.
- Bilgen, G., Kavak, A., Yıldırım, S., & Çapar, Ö. (2010). Yüksek Fırın Cürufunun İnşaat Sektöründeki Yeri ve Önemi. 2. Ulusal Katı Atık Yönetimi Kongresi , 1 , 506- 513.
- Celik, A., Yılmaz, K., Canpolat, O., Al-Mashhadani, M. M., Aygörmmez, Y., & Uysal, M. (2018). High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 187, 1190-1203.
- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., & Rattanasak, U. (2014) Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash–silica fumealkali-activated composite, *Advanced Powder Technology*, 25(3):1087-1093pp.
- Çelik, A. (2019). Sentetik liflerle güçlendirilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışı ve mekanik özellikleri (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi).
- Davidovits, D. (2002) 30 Years of Successes and Failuresin Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs, *Geopolymer 2002 Conference*, 28-29 October Melbourne.
- Davidovits, J. (1991). Geopolimerler: inorganik polimerik yeni malzemeler. *Termal Analiz ve Kalorimetri Dergisi* , 37 (8), 1633-1656.

- Davidovits, J., (1994), Properties of geopolymer cements. In First international conference on alkaline cements and concretes. Vol. 1, s. pp. 131-149. Kiev: Kiev State Technical University, Ukraine: Scientific Research Institute on Binders and Materials.
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 606-614.
- Duan, P., Yan, C., & Zhou, W. (2017). A novel water permeable geopolymer with high strength and high permeability coefficient derived from fly ash, slag and metakaolin. *Advanced Powder Technology*, 28(5), 1430-1434.
- Ekmen Ş., & Mermerdaş K. (2018) Alkali Aktivatör Parametrelerinin ve Test Koşullarının Geopolimer Betonların Büzülme ve Sünme Davranışı Üzerine Etkisi, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3(3): 93-101.
- Erdoğan, Y.T. (1995). *Betonu Olusturan Malzemeler Agregalar*, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.
- Esparham, A. (2020). Factors influencing compressive strength of metakaolin-based geopolymer concrete. *Modares Civil Engineering journal*, 20(1), 77-90.
- Feng, D., Tan, H., & Van Deventer, J. S. J. (2004). Ultrasound enhanced geopolymerisation. *Journal of materials science*, 39, 571-580.
- Fkini, A. R. A. (2022). Öğütülmüş asidik pomza silis dumanı bazlı geopolimer harçların özellikleri.
- Frayyeh, Q., & Swaif, A. (2018). Mechanical properties of fly ash geopolymer mortar reinforced with carbon fibers. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 162, p. 02028). EDP Sciences.
- Gaddafi, A. K. F., Alengaram, U. J., Bunnori, N. M., Muhammad, S. I., Ibrahim, S., & Sumesh, M. (2023). Mechanical properties, flexural behaviour, and ductility characteristics of fibre-reinforced geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 403, 133109.
- Ganesan, N., Abraham, R., & Deepa Raj, S. (2015). Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete, *Constr. Build. Mater.* 93 471–476.
- García-Lodeiro, I., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2007) Alkali– aggregate reaction in activated fly ash systems, *Cement and Concrete Research*, 37(2):175-183pp.
- Glukhovskiy, V.D., Rostovskaja, G.S., & Rumyna, G.V. (1980). High Strength SlagAlkaline Cements. 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 164-168.
- Gómez-Casero, M. A., De Dios-Arana, C., Bueno-Rodríguez, J. S., Pérez-Villarejo, L., & Eliche-Quesada, D. (2022). Physical, mechanical and thermal properties of metakaolin-fly ash geopolymers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 26, 100620.

- Hedjazi, S., & Castillo, D. (2020). Relationships among compressive strength and UPV of concrete reinforced with different types of fibers. *Heliyon*, 6(3).
- Huang, Q., Shi, X.S., Wang, Q.Y., & Tang, L. (2015) The influence of carbonization on the performances of fly ash geopolymeric concrete, *Appl. Mech. Mater.* 744–746.
- IS. (1992). Non-destructive testing of concrete methods of test, part1, IS, 13311.by, bureau of indian standards, manak bhavan,9 bahadur shah zafar maro new delhi 110002
- Jin, M., Wang, Z., Lian, F., & Zhao, P. (2020). Freeze-thaw resistance and seawater corrosion resistance of optimized tannery sludge/metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 265, 120730.
- Kalaycıklı, İ. E. (2020) Farklı Geopolimer Betonların Dayanımlarının Zamanla Değişimi ve Durabilitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Kantarci, F. (2018) Nano Silis, Mikro Silis ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tuf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya.
- Kaya, M. (2021). Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(2), 640-647.
- Keklik, U. (2020). Silis dumanı içeren geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde durabilite performanslarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Gelişim Üniversitesi. İstanbul.
- Khale, D. & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review, *Journal of materials science* 42(3), 729-746.
- Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. (2008). Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30(10), 986-991.
- Kuleli, Ö. (2010) “Çimento Mühendisliği El Kitabı”, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, 2, 11-1.
- Kumar, Y. N., Kumar, B. D., & Swami, B. L. P. (2022). Mechanical properties of geopolymer concrete reinforced with steel and glass fibers with various mineral admixtures. *Materials Today: Proceedings*, 52, 632-641.
- Kwasny, J., Aiken, T. A., Soutsos, M. N., McIntosh, J. A., & Cleland, D. J. (2018). Sulfate and acid resistance of lithomarge-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 166, 537-553.

- Lakshmi, P. A., Nandhini, K. M., Priyadarshini, K., Shivani, M., Subhashini, R., & Swetha, B. (2018). Performance of ggbs blended geopolymer concrete with basalt fibre. *IJTRT*, 2, 5.
- Lavanya, G., & Jegan, J., (2015). Durability study on high calcium fly ash based geopolymer concrete, *Adv. Mater. Sci. Eng.*
- Li, Z., Shen, A., Zeng, G., Chen, Z., & Guo, Y. (2022). Research progress on properties of basalt fiber-reinforced cement concrete. *Materials Today Communications*, 33, 104824.
- Liu, B., Guo, J., Wen, X., Zhou, J., & Deng, Z. (2020). Study on flexural behavior of carbon fibers reinforced coral concrete using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 242, 117968.
- Lloyd, N., & Rangan, V. (2010). Geopolymer concrete with fly ash. In *Proceedings of the Second International Conference on sustainable construction Materials and Technologies* (pp. 1493-1504). UWM Center for By-Products Utilization.
- Lopresto, V., Leone, C., & De Iorio, I. (2011). Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic, *Compos. Part B Eng.* 42, 717–723.
- Maslehuddin, M., Sharif, A. M., Shameem, M., Ibrahim, M., & Barry, M. S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and building materials*, 17(2), 105-112.
- Mohammed, A. A., Ahmed, H. U., & Mosavi, A. (2021). Survey of mechanical properties of geopolymer concrete: a comprehensive review and data analysis. *Materials*, 14(16), 4690.
- Mohebi, R., Behfarnia, K., & Shojaei, M. (2015). Abrasion resistance of alkali-activated slag concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials*, 98, 792-798.
- Morla, P., Gupta, R., Azarsa, P., & Sharma, A. (2021). Corrosion evaluation of geopolymer concrete made with fly ash and bottom ash. *Sustainability*, 13(1), 398.
- Nazari A., & Rohani, A.F. (2012). Alkali-activated geopolymer produced by seeded fly ash and rice husk bark ash, *Adv. Cem. Res.* 24 301–309, <https://doi.org/10.1680/adcr.11.00038>.
- Nazir, K., Canpolat, O., Uysal, M., Niş, A., & Kuranlı, Ö. F. (2023). Engineering properties of different fiber-reinforced metakaolin-red mud based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 385, 131496.
- Nuaklong, P., Wongsas, A., Boonserm, K., Ngohpok, C., Jongvivatsakul, P., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2021). Enhancement of mechanical properties of fly ash geopolymer containing fine recycled concrete aggregate with micro carbon fiber. *Journal of Building Engineering*, 41, 102403.

- Okoye, F.N. Prakash. S., & Singh, N.B., (2017). Durability of fly ash based geopolymer concrete in the presence of silica fume, *J. Clean. Prod.* 149, 1062–1067.
- Özbey N. (2021) Farklı Bağlayıcı Miktarlarına Sahip Yüksek Fırın Cürufu İkameli Uçucu Küllü Geopolimer Betonların Durabilitesi, İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul.
- Pan, Z., & Sanjayan, J.G. (2012). Geopolimerlerin yumuşama sıcaklığını ve sıcak mukavemetini etkileyen faktörler. *Cem. Kons. Kompostolar*, 34 , 261–264.
- Papenfus, N. (2003). Applying concrete technology to abrasion resistance, in: *Proceedings of the 7th International Conference on Concrete Block Paving*,. Sun City, South Africa.
- Pasupathy, K., Sanjayan, J., & Rajeev, P. (2021). Evaluation of alkalinity changes and carbonation of geopolymer concrete exposed to wetting and drying. *Journal of Building Engineering*, 35, 102029.
- Payakaniti, P., Pinitsoonthorn, S., Thongbai, P., Amornkitbamrung, V., & Chindaprasirt, P. (2018). Effects of carbon fiber on mechanical and electrical properties of fly ash geopolymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14017-14025.
- Polat, B. (2019) Geopolimer Harcın Mikro Organizmalar Yardımıyla Kendiliğinden İyileşmesinin Araştırılması, Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Pouhet, R., & Cyr, M. (2015). Alkali–silica reaction in metakaolin-based geopolymer mortar. *Materials and Structures*, 48, 571-583.
- 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.
- Purdon, A. (1940). The action of alkalis on blast-furnace slag. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 59 (9), 191-202.
- Ramujee, K., & PothaRaju, M. (2017). Mechanical properties of geopolymer concrete composites. *Materials today: proceedings*, 4(2), 2937-2945.
- Ramyar, K., Dönmez, H., & Andiç, Ö. (2002) Araştırma Raporu, “Alkali-Silis Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı İle Kontrol Altına Alınması”, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Çimento Endüstrisi-Üniversite İşbirliği Araştırma Projesi Raporları, Rapor No:9,Ege Üniversitesi, İzmir.
- Rangan, B.V. (2014). Geopolymer concrete for environmental protection. *The Indian Concrete Journal*. 88 (4), 41-59.
- Ranjbar, N. (2014). "Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures." *Construction and building materials* 65,114-121.

- Ranjbar, N., & Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498.
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Maheri, M.R., & Mehrali, M., (2017). Hot-pressed geopolymer. *Cem. Concr. Res.* 100, 14–22.
- Rashedi, A., Marzouki, R., Raza, A., Ali, K., Olaiya, N. G., & Kalimuthu, M. (2022). Glass FRP-Reinforced Geopolymer Based Columns Comprising Hybrid Fibres: Testing and FEA Modelling. *Polymers*, 14(2), 324.
- Raut, U., Shalini, A., & Prabu, B. (2019). Strength of geopolymer concrete reinforced with basalt fibre. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 6, 3811-3817.
- Rill, E., Lowry, D. R., & Kriven, W. M. (2010). Properties of basalt fiber reinforced geopolymer composites. *Strategic materials and computational design: ceramic engineering and science proceedings*, 31, 57-67.
- Rostami, H., & Brendley, W. (2003) Alkali ash material: a novel fly ash-based cement, *Environ. Sci. Technol.* 37, 3454–3457.
- Sarker, P. K., Kelly, S., & Yao, Z. (2014). Effect of fire exposure on cracking, spalling and residual strength of fly ash geopolymer concrete. *Materials & Design*, 63, 584-592.
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J.A., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindaprasirt P. (2015) *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 852p.
- Sathish Kumar, V., Ganesan, N., & Indira, PV (2021). Hibrit Liflerin Üçlü Karışım Geopolimer Betonun Dayanıklılık Özelliklerine Etkisi. *Kompozit Bilimi Dergisi* , 5 (10), 279.
- Shaikh, F. U. A. (2013). Deflection hardening behaviour of short fibre reinforced fly ash based geopolymer composites. *Materials & Design*, 50, 674-682.
- 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.
- Shi, C., Jiménez, A.F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41 (7), 750-763.
- Shoaei, P., Ghassemi, P., Ameri, F., Musaei, H. R., Ban, C. C., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Comparative study on the effect of fiber type and content on the fire resistance of alkali-activated slag composites. *Construction and Building Materials*, 288, 123136.
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015) *Geopolymer Concrete: A review of Some Recent Developments*. *Construction and Building Materials*, 85, 78–90.

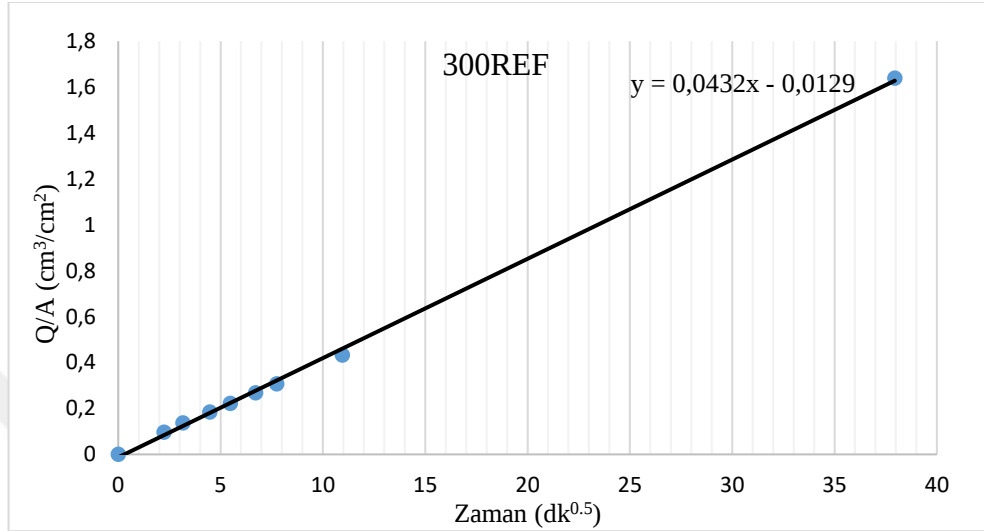
- Singh, N.B., & Middendorf, B. (2020) Geopolymers as an alternative to Portland cement: an overview, *Construct. Build. Mater.* 237.
- Škvára, F., Jílek, T., & Kopecký, L. (2005). Geopolymer materials based on fly ash. *Ceram.-Silik*, 49(3), 195-204.
- Şahin, F., Uysal, M., Canpolat, O., Aygörmmez, Y., Cosgun, T., & Dehghanpour, H. (2021). Effect of basalt fiber on metakaolin-based geopolymer mortars containing rilem, basalt and recycled waste concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 301, 124113.
- Şinik, O. (2019) Geopolimer Betonlarda Dayanıklılık Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2009). Effect of Na₂O content on durability of geopolymer mortars in sulphuric acid. *Int. J. Civil Environ. Eng.* 3(3), 193-199.
- Thomas, B.S. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – a comprehensive review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 3913–3923.
- Timakul, P., Rattanaprasit, W., & Aungkavattana, P. (2016). Improving compressive strength of fly ash-based geopolymer composites by basalt fibers addition. *Ceramics International*, 42(5), 6288-6295.
- Topçu, İ. B., & Toprak, M. U. (2009) Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22:153-164.
- Torgal, P. F., Gomes, C. J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review: Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *J. Constr. Build. Mater.*, 22, pp.1305-1314.
- TS EN 1015-3, (2000). Kagit Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1 (2002). Genel Çimentolar- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450-1 (2015). Uçucu Kül-Betonda Kullanılan-Bölüm 1:Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tuyan, M. (2017) Doğal ve Atık Malzemelerle Geopolimer Harç Ve Beton Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir.
- Tuyan, M., Boyacı, O. C., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K. (2020). Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonların Mekanik Özellik ve Yüksek Sıcaklık Dirençlerinin Araştırılması.

- URL-1. (2022, 11 Kasım) www.turkcimento.org.tr/tr/haber_detay/cimento-ve-klinker-istatistikleri adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2022, 8 Aralık) www.geopolymer.org/applications/geopolymer-cement adresinden alınmıştır.
- Ünal, M. T., Gökçe, H. S., Ayough, P., Alnahhal, A. M., Şimşek, O., & Nehdi, M. L. (2023). Nanomaterial and fiber-reinforced sustainable geopolymers: A systematic critical review. *Construction and Building Materials*, 404, 133325.
- Vaidya, S., & Allouche, E.N. (2011). Strain sensing of carbon fiber reinforced geopolymer concrete, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 44 1467–1475.
- Vilaplana, J. L., Baeza, F. J., Galao, O., Alcocel, E. G., Zornoza, E., & Garcés, P. (2016). Mechanical properties of alkali activated blast furnace slag pastes reinforced with carbon fibers. *Construction and Building Materials*, 116, 63-71.
- Wang, H., Li, H., & Yan, F. (2005). Synthesis and tribological behavior of metakaolinite-based geopolymer composites. *Mater. Lett.* 59, 3976–3981.
- Wang, T., Fan, X., Gao, C., Qu, C., Liu, J., & Yu, G. (2023). The influence of fiber on the mechanical properties of geopolymer concrete: A review. *Polymers*, 15(4), 827.
- 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.
- Xu, H. & Deventer, V.J.S.J. (2000). “The geopolymerisation of alumino-silicate minerals” *International journal of mineral processing*,” vol.59(3), pp.247-266.
- Xu, S., Wu, C., Yue, J., & Xu, Z. (2022). Shrinkage and mechanical properties of fibre-reinforced blast furnace slag-steel slag-based geopolymer. *Advances in Civil Engineering*.
- Yang S., Zhao R., Zeng X., Jia W., Jin H., & Li, F. (2021). Reinforcement of geopolymer materials with natural fibers: a review. *Materials Herald* , 35 (7), 7107-7113.
- Zaharaki, D., Komnitsas, K., & Perdikatsis, V. (2010). Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition, *Journal of Materials Science* 45(10), 2715-2724.
- Zhang, D., Wang, Y., Zhang, T., & Yang, Q. (2023). Engineering and microstructural properties of carbon-fiber-reinforced fly-ash-based geopolymer composites. *Journal of Building Engineering*, 79, 107883.
- Zhang, S.P., & Zong, L. (2014) Evaluation of Relationship between Water Absorption and Durability of Concrete Materials, *Adv. Mater. Sci. Eng.*

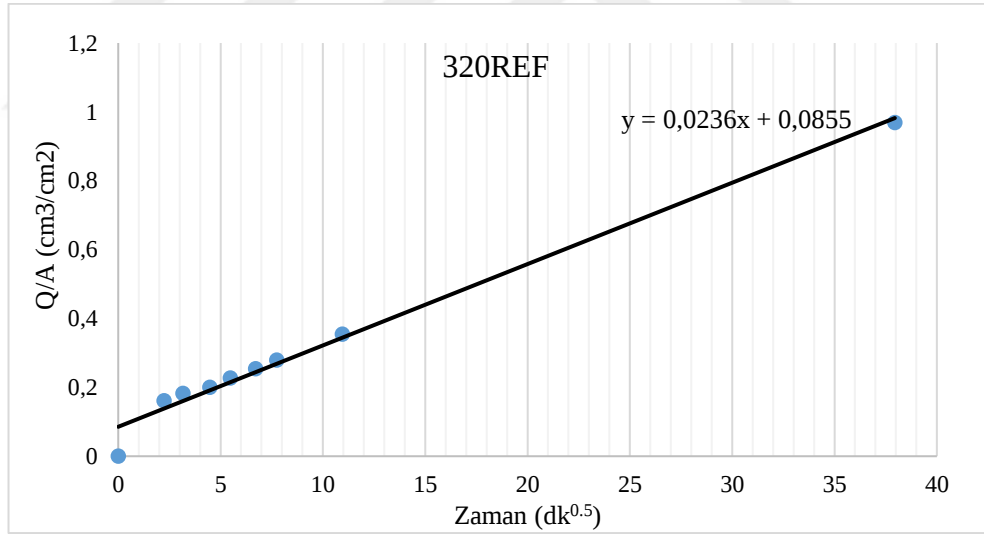
- Zhang, Z., & Provis, J.L. (2014) A. Reid, H. Wang, Fly ash-based geopolymers: the relationship between composition, pore structure and efflorescence, *Cement Concr. Res.* 64, 30–41.
- Zhao, J., Wang, K., Wang, S., Wang, Z., Yang, Z., Shumuye, E. D., & Gong, X. (2021). Effect of elevated temperature on mechanical properties of high-volume fly ash-based geopolymer concrete, mortar and paste cured at room temperature. *Polymers*, 13(9), 1473.
- Zhuang, X. Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., & Wang, H. (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
- Ziada, M., Erdem, S., González-Lezcano, R. A., Tammam, Y., & Unkar, İ. (2023). Influence of various fibers on the physico-mechanical properties of a sustainable geopolymer mortar-based on metakaolin and slag. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 46, 101501.

7. EKLER

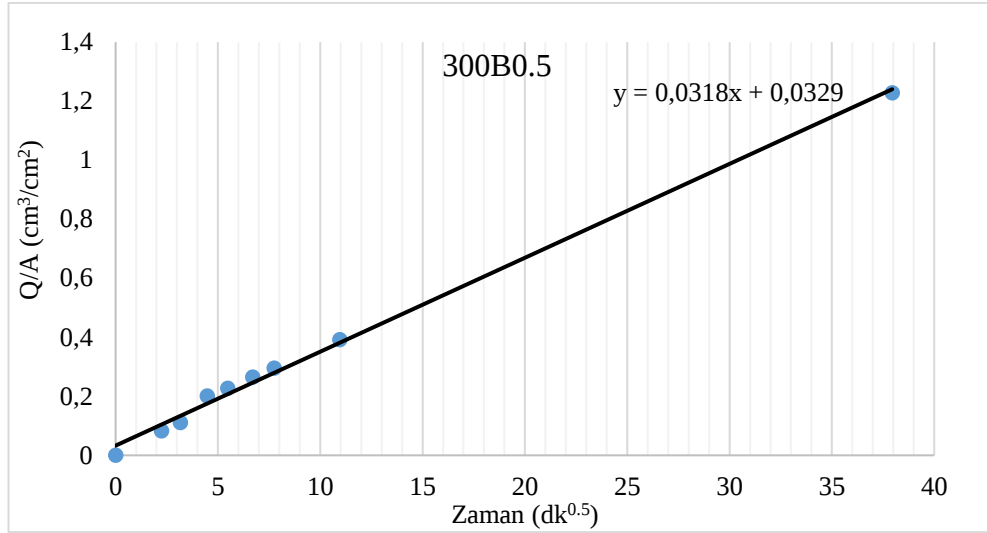
Ek 1. Üretilen harçların kılcallık katsayılarının hesaplanması ((Q/A) – (dk^{0.5}) grafikleri)



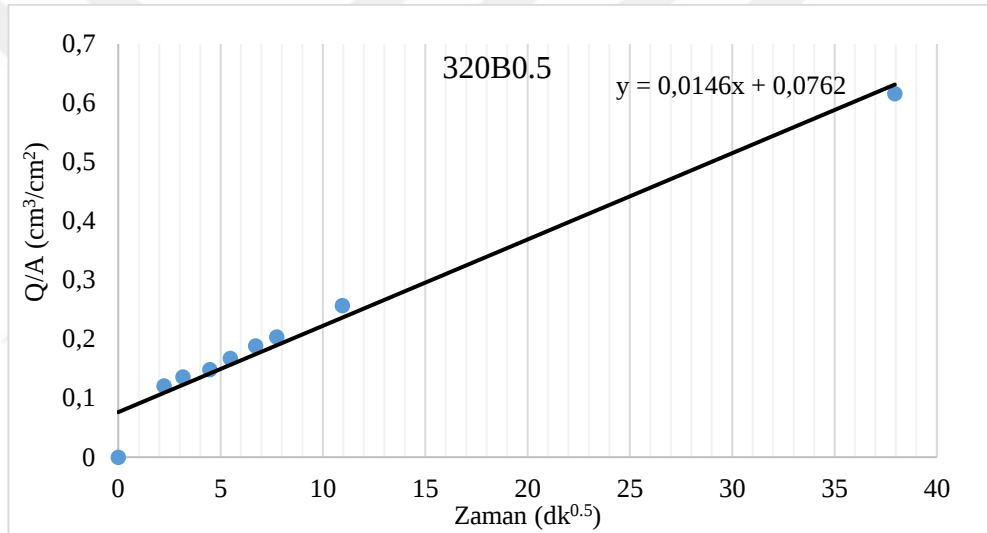
Ek Şekil 1. 300REF kodlu geopolimer harcın (Q/A) – (dk^{0.5}) grafiği



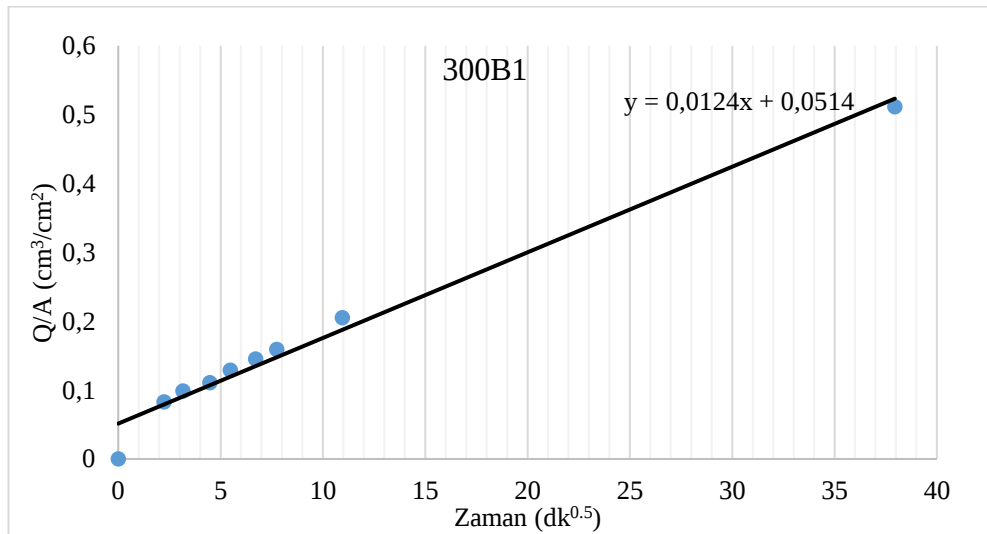
Ek Şekil 2. 320REF kodlu geopolimer harcın (Q/A) – (dk^{0.5}) grafiği



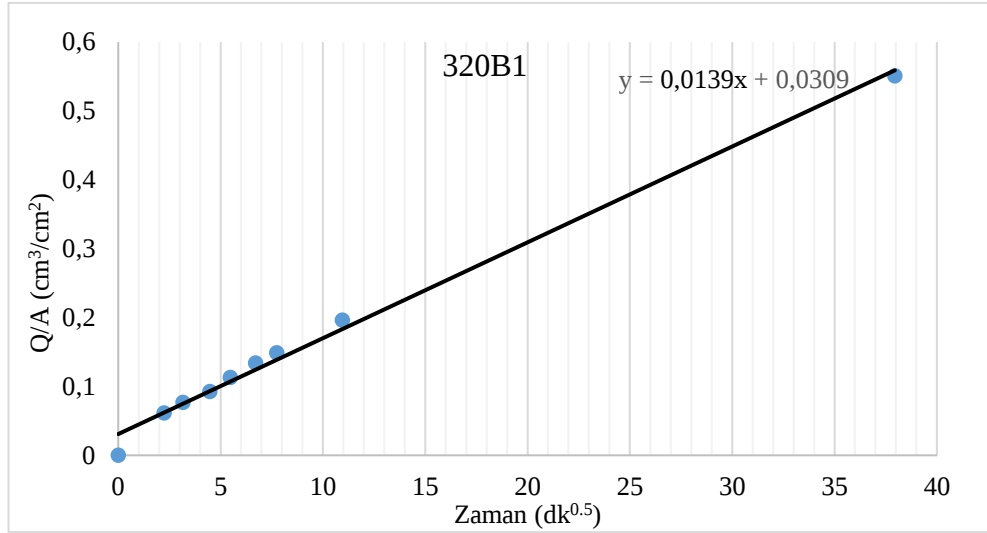
Ek Şekil 3. 300B0.5 kodlu geopolimer harcın $(Q/A) - (dk^{0.5})$ grafiği



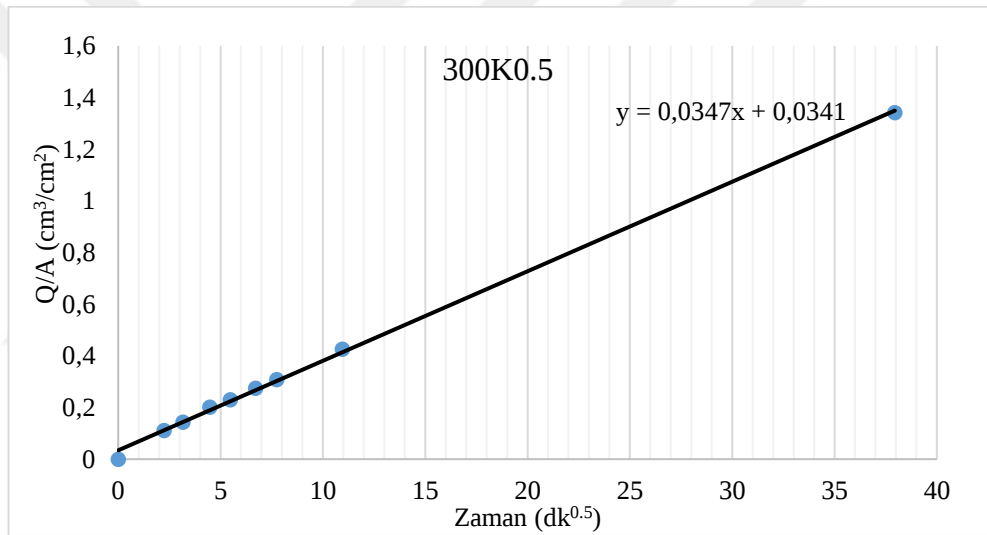
Ek Şekil 4. 320B0.5 kodlu geopolimer harcın $(Q/A) - (dk^{0.5})$ grafiği



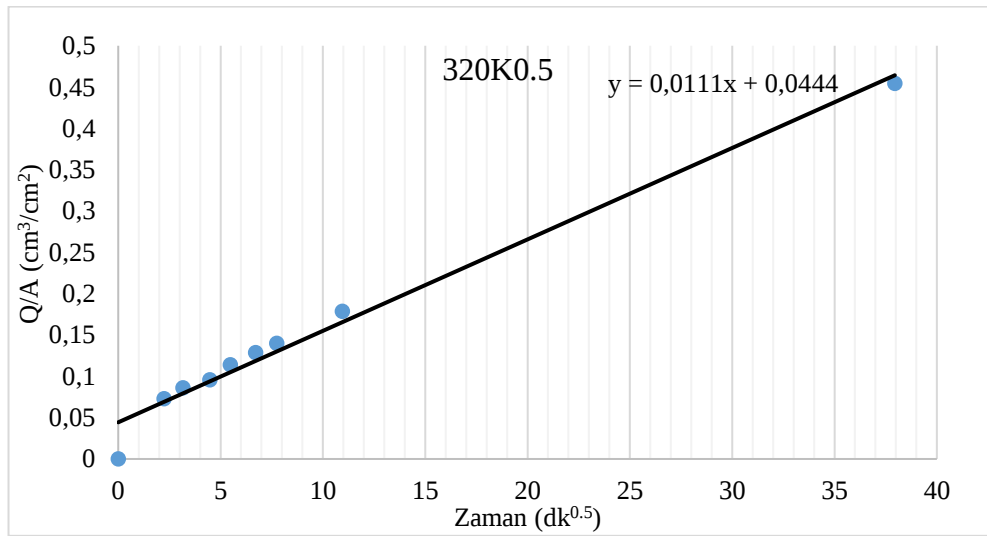
Ek Şekil 5. 300B1 kodlu geopolimer harcın $(Q/A) - (dk^{0.5})$ grafiği



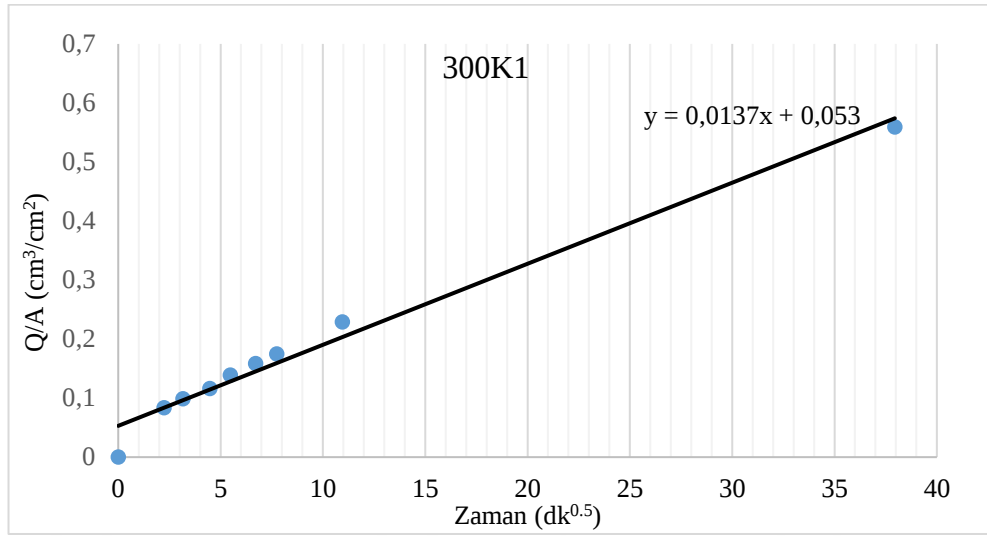
Ek Şekil 6. 320B1 kodlu geopolimer harcın (Q/A) – ($dk^{0.5}$) grafiği



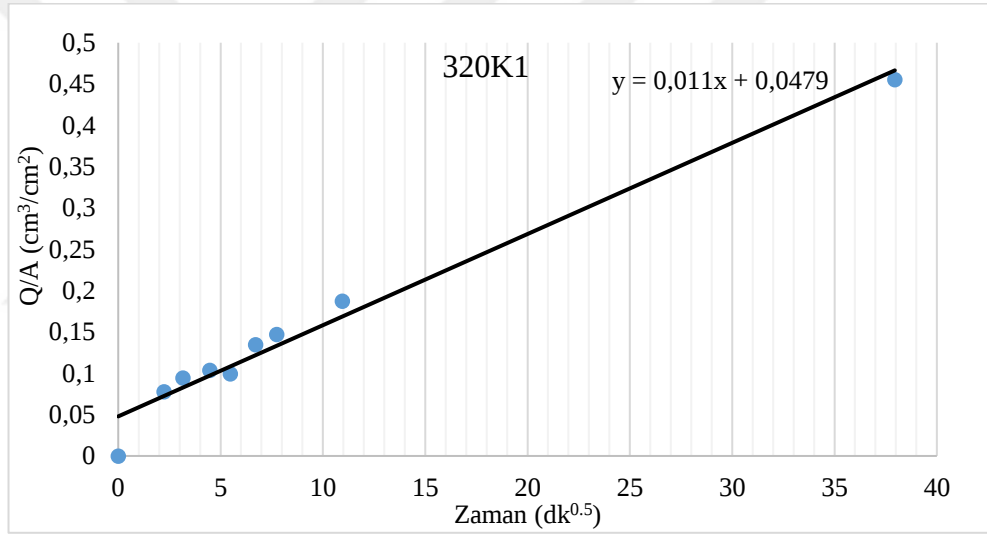
Ek Şekil 7. 300K0.5 kodlu geopolimer harcın (Q/A) – ($dk^{0.5}$) grafiği



Ek Şekil 8. 320K0.5 kodlu geopolimer harcın (Q/A) – ($dk^{0.5}$) grafiği



Ek Şekil 9. 300K1 kodlu geopolimer harcın (Q/A) – ($dk^{0.5}$) grafiği



Ek Şekil 10. 320K1 kodlu geopolimer harcın (Q/A) – ($dk^{0.5}$) grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Şeyma AYDIN, ilköğretimi Namık Kemal İlköğretim okulunda, ortaöğretimi Giresun Nurettin Canikli Anadolu İmam Hatip Lisesinde tamamladı. 2020 yılında Giresun Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Çevre Mühendisliği bölümlerinden mezun oldu. Özel bir firmada şantiye şefi olarak 3 yıl boyunca görev almıştır ve halendir devam etmektedir. Orta derecede İngilizce bilmektedir.

