



**CAM VE BAZALT LİFLİ GEOPOLİMER
BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNDE
ADERANS DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI**

Muhammed Himmet Sami ÖZDEMİR

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**CAM VE BAZALT LİFLİ GEOPOLİMER BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK
ETKİSİNDE ADERANS DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of Adhesion Strength of Glass and Basalt Fiber Geopolymer Concrete at High
Temperature)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Himmet Sami ÖZDEMİR

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK

Erzurum
Ağustos, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Muhammed Himmet Sami Özdemir tarafından hazırlanan “Cam ve bazalt lifli geopolimer betonların yüksek sıcaklık etkisinde aderans dayanımının araştırılması” başlıklı çalışması 15/08/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahmut KILÇ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Mahyar MAALİ <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi Haluk Görkem ALCAN <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
İkinci Tez Danışmanı	Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK <i>Kafkas Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun/.../.... tarih
ve sayılı kararı

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

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: FYL-2023-13299

Aslı Islak İmzalıdır

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak *Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN* danışmanlığında sunulan “Cam ve bazalt lifli geopolimer betonların yüksek sıcaklık etkisinde aderans dayanımının araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	3	30
Kuramsal Temeller	8	30
Materyal ve Yöntem	7	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	2	20
Sonuç ve Öneriler	3	20
Tezin Geneli	7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Muhammed Himmet Sami ÖZDEMİR	Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
15.8.2024	15.8.2024
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Öğrencilik hayatım boyunca gerek derslerde gerekse bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan, her sorun yaşadığımda çözüm bulan, güler yüzünü ve samimiyetini benden esirgemeyen ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli danışman hocam Prof.Dr. Abdülkadir Cüneyt AYDIN' a teşekkür ederim.

Deney aşamasında sağlamış olduğu imkânlar ve yardımlarından, tez yazım aşamasında göstermiş olduğu bilgilendirme ve özverili yaklaşımlarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Barış BAYRAK'a teşekkür ederim.

Bu çalışmada ve öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Sunulan yüksek lisans tez çalışması Atatürk Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü' nün FYL-2024-14083 numaralı projesi kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Atatürk Üniversitesi' ne teşekkür ederim.

Muhammed Himmet Sami ÖZDEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CAM VE BAZALT LİFLİ GEOPOLİMER BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNDE ADERANS DAYANIMININ ARAŞTIRILMASI

Muhammed Himmet Sami ÖZDEMİR

Danışman: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Amaç: Sunulan bu tez çalışmasının amacı, bazalt ve cam lif takviyeli yüksek fırın cürufu esaslı geopolimer betonda donatı çapı (8 mm, 16 mm ve 24 mm), donatının konumu (merkez, alt orta ve köşe) ve yüksek sıcaklığın (20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) aderans dayanımına etkisinin deneysel olarak incelenmesidir.

Yöntem: Geopolimer beton karışımında hacimce %0,75 oranında bazalt ve cam lifli olmak üzere iki tür beton karışımı kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu tüm karışımlarda bağlayıcı malzeme olarak tercih edilmiştir. Yüksek fırın cürufuna ek olarak metakaolin ve atık agrega malzemesi olarak mermer tozu kullanılmıştır. Lifli geopolimer betonda yüksek sıcaklığın aderans dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi için 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz bırakılacak numunelerin aderans dayanımı deneysel olarak araştırılmıştır. Toplam 270 adet 150x150x150 mm boyutlarında küp numune üretilmiş olup aderans dayanımı için pull-out testi uygulanmıştır. Tüm numunelerde aderans boyu 5d (d: donatı çapı) olarak alınmıştır.

Bulgular: Donatı çapının aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Donatı çapının artması aderans dayanımını azaltmıştır. Numunelerin maruz kaldığı sıcaklık değerinin artması aderans dayanımının yüksek oranlarda azalmasına neden olmuştur. Yüksek sıcaklıklarda cam lifli numunelerin aderans dayanımına katkısı bazalt lifli numunelere göre daha fazla olmuştur. Bununla birlikte donatı konumunun 20 °C ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde etkili olduğu görülmesine rağmen 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise donatı konumunun etkisinin daha az olduğu görülmektedir. Merkez konumuna yerleştirilen numunelerde maksimum aderans dayanımı elde edilmiştir. Donatının köşe noktasına yerleştirilmesine alt orta noktaya göre aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur.

Sonuç: Çalışma neticesinde özellikle literatürde pas payı olarak dikkate alınan parametre bu çalışmada donatı konumu şeklinde ele alınmış olup literatürdeki bu boşluğun giderilmesi hedeflenmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalacak geopolimer betonda aderans dayanımı açısından cam lif kullanılması önerilmektedir. Ayrıca imalat koşulları, donatı konfigürasyonu vb. parametrelerden dolayı gerekli olması durumunda donatının köşe noktasına uzak olması aderans açısından avantaj sağlayacaktır. Gelecekteki çalışmalarda ise geopolimer betonun aderans dayanımının farklı lif türlerinin hibrid ya da üçlü kombinasyonu ile kullanılması durumunda elde edilen verilerin literatüre sunulmasının bu alanda oldukça faydalı olacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Aderans, donatı çapı, geopolimer beton, pull-out testi, yüksek sıcaklık

Ağustos 2024, 104 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF ADHESION STRENGTH OF GLASS AND BASALT FIBER GEOPOLYMER CONCRETE AT HIGH TEMPERATURE

Muhammed Himmet Sami ÖZDEMİR

Supervisor: Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Objective: The aim of this thesis is to experimentally investigate the effects of rebar diameter (8 mm, 16 mm and 24 mm), reinforcement location (center, bottom center and corner) and high temperature (20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C) on the bond strength of basalt and glass fiber reinforced blast furnace slag based geopolymer concrete.

Method: The geopolymer concrete consists of two types concrete mixtures, namely basalt and glass fiber at a rate of 0,75% by volume. Blast furnace slag was preferred as the binder material in all mixtures. In addition to blast furnace slag, metakaolin and marble dust were used as waste material. In order to investigate the effect of high temperature on the bond strength in fibrous geopolymer concrete, the bond strength of samples to be exposed to temperatures of 200 °C, 400 °C, 600 °C and 800 °C were experimentally investigated. A total of 270 cube samples with dimensions of 150x150x150 mm were produced and pull-out test was carried out for bond strength. The bond length was taken as 5d (d: reinforcement diameter) in all samples.

Findings: It was observed that the rebar diameter had a significant effect on the bond strength. The increasing rebar diameter decreased the bond strength. The increasing temperature to which the samples were exposed caused the bond strength to decrease at high rates. At high temperatures, the contribution of the glass fiber to the bond strength was greater than the basalt fiber. It was seen that the effect of the rebar position was less in the samples exposed to high temperatures of 600 °C and 800 °C, the rebar position was seen to be effective in the samples exposed to 20 °C and 200 °C temperature. Maximum bond strength was obtained in the samples placed in the center position. The placement of the rebar at the corner point caused the bond strength to decrease compared to the lower center point.

Conclusion: As a result of the study, the parameter considered as concrete cover in the literature was considered as the reinforcement position in this study and it was aimed to eliminate this gap in the literature. It is recommended to use glass fiber in terms of adhesion strength in geopolymer concrete that will be exposed to high temperatures. In addition, if it is necessary due to manufacturing conditions, reinforcement configuration, etc. parameters, the distance of the reinforcement to the corner point will provide an advantage in terms of bond strength. In future studies, it is thought that presenting the data obtained in the case of using different fiber types with hybrid or triple combinations of the adhesion strength of geopolymer concrete to the literature will be quite useful in this field.

Keywords: Bond strength, rebar diameter, geopolymer concrete, pull-out test, high temperature

August 2024, 109 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	5
MATERYAL VE YÖNTEM	11
Materyal	11
Yöntem.....	26
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	27
Bazalt ve Cam Lifli Geopolimer Betonların Mekanik Özellikleri.....	27
Aderans Dayanımı-Sıyırılma Grafikleri.....	32
Farklı parametrelerin aderans performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi.....	56
Donatı çapının aderans performansına etkisinin incelenmesi.....	56
Lif türünün aderans performansına etkisinin incelenmesi	65
Donatı konumunun aderans performansına etkisinin incelenmesi.....	72
Yüksek sıcaklığın aderans performansına etkisinin incelenmesi.....	77
Göçme modları ve çatlak dağılımları	82
SONUÇ VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	93

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri	12
Tablo 2. Öğütölmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri (%).....	12
Tablo 3. Metakaolinin kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	14
Tablo 4. Atık Mermer Tozu Kimyasal Özellikleri (%).....	14
Tablo 5. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Özellikleri (%)	15
Tablo 6. Sodyum Silikatın Kimyasal Özellikleri (%).....	15
Tablo 7. Bazalt Lif Teknik Özellikleri.....	16
Tablo 8. Cam Lif Teknik Özellikleri	16
Tablo 9. Donatıların Mekanik Özellikleri.....	17
Tablo 10. 1 m ³ İçin Beton Karışım Miktarları.....	19
Tablo 11. Deney Parametreleri	23
Tablo 12. Oda Sıcaklığındaki ve Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Numunelerin 7 ile 28 Günlük Basınç, Yarmada Çekme ve Eğilme Dayanım Sonuçları	28
Tablo 13. 7 ile 28 Günlük Basınç Dayanımı Karşılaştırması	32
Tablo 14. Cam Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları.....	54
Tablo 15. Bazalt Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları	55
Tablo 16. Bazalt Lifli ve 8 mm, 16 mm ve 24 mm Donatı Çaplı Numunelerin Aderans Dayanımı Karşılaştırması	57
Tablo 17. Cam Lifli ve 8 mm, 16 mm ve 24 mm Donatı Çaplı Numunelerin Aderans Dayanımı Karşılaştırması	57
Tablo 18. 8 mm çaplı Numuneler Arasında Lif Türünün Aderans Dayanımına Etkisi.....	67
Tablo 19. 16 mm Çaplı Numuneler Arasında Lif Türünün Aderans Dayanımına Etkisi	67
Tablo 20. 24 mm Çaplı Numuneler Arasında Lif Türünün Aderans Dayanımına Etkisi	68
Tablo 21. Bazalt Lifli Numunelerde Donatı Konumunun Aderans Dayanımına Etkisi	73
Tablo 22. Cam Lifli Numunelerde Donatı Konumunun Aderans Dayanımına Etkisi.....	73
Tablo 23. Bazalt Lifli Numunelerde Yüksek Sıcaklığın Aderans Dayanımına Etkisi	78
Tablo 24. Cam Lifli Numunelerde Yüksek Sıcaklığın Aderans Dayanımına Etkisi	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Yüksek fırın cürufunun XRD deseni	12
Şekil 2. Yüksek fırın cürufu (a) elek analizi (b) görüntüsü.....	13
Şekil 3. Metakaolinin XRD deseni.....	13
Şekil 4. Metakaolinin (a) elek analizi (b) görüntüsü	14
Şekil 5. Atık mermer tozu (a) elek analizi (b) görüntüsü	15
Şekil 6. Karışımda kullanılan liflerin görüntüsü (a) cam lif (b) bazalt lif.....	17
Şekil 7. Donatıların gerilme şekil değiştirme eğrileri (a) 8 mm çap (b) 16 mm çap (c) 24 mm çap	18
Şekil 8. Beton döküm aşaması	20
Şekil 9. Beton dökümü için hazırlanan numuneler	21
Şekil 10. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelere uygulanan işlemlerin şematik gösterimi	22
Şekil 11. Donatının küp numunedeki farklı konumlarının gösterilmesi	24
Şekil 12. Deney düzeneği	25
Şekil 13. Deney numunesinin şematik gösterimi	25
Şekil 14. Bazalt ve cam lifli geopolimer numunelerin 7 ve 28 günlük dayanımları (a) Basınç dayanımı (b) Yarmada çekme dayanımı (c) Eğilme dayanımı	28
Şekil 15. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri	38
Şekil 16. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri	40
Şekil 17. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri	43
Şekil 17. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı).....	44
Şekil 18. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri	45
Şekil 19. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri	48
Şekil 21. Bazalt lifli numunelerin donatı çapına göre maksimum aderans dayanımlarının karşılaştırılması	58
Şekil 22. Cam lifli numunelerin donatı çapına göre maksimum aderans dayanımlarının karşılaştırılması	59
Şekil 23. Bazalt lifli numunelerde donatı çapının 8 mm' den 16 mm' ye arttırılması durumunda aderans dayanımındaki karşılaştırma.....	60
Şekil 24. Cam lifli numunelerde donatı çapının 8 mm' den 16 mm' ye arttırılması durumunda aderans dayanımındaki karşılaştırma.....	61
Şekil 25. Aderans testi sırasında donatıdaki gerilme dağılımı	63
Şekil 26. Donatı nervürleri arasındaki kuvvet dağılımı	64

Şekil 27. 8 mm çaplı donatılarda lif türü aderans dayanımı ilişkisi	68
Şekil 28. 16 mm çaplı donatılarda lif türü aderans dayanımı ilişkisi	69
Şekil 29. 24 mm çaplı donatılarda lif türü aderans dayanımı ilişkisi	69
Şekil 30. Bazal lifli ve cam lifli numunelerin aderans dayanımlarının karşılaştırılması	70
Şekil 31. Liflerin aderans dayanımına etkisinin şematik olarak gösterimi	71
Şekil 32. Aderans boyunca yüzey alanının hesaplanması	72
Şekil 33. Bazalt lifli numunelerin donatı konumu aderans dayanımı arasındaki ilişki	74
Şekil 34. Cam lifli numunelerin donatı konumu aderans dayanımı arasındaki ilişki	74
Şekil 35. Bazalt lifli numunelerde donatı konumunun aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi	75
Şekil 36. Bazalt lifli numunelerde donatı konumunun aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi	75
Şekil 37. Bazalt lifli numunelerde sıcaklık aderans dayanımı ilişkisi	79
Şekil 38. Cam lifli numunelerde sıcaklık aderans dayanımı ilişkisi	79
Şekil 39. Bazalt lifli numunelerde yüksek sıcaklığın aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi	80
Şekil 40. Cam lifli numunelerde yüksek sıcaklığın aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi	80
Şekil 41. Aderans deneylerinde çatlağa neden olan gerilmelerin şematik gösterimi	83

GİRİŞ

Günümüz dünyasında en önemli problemlerden bir tanesi çevre kirliliği ve atmosfere salınan karbon dioksit (CO_2) miktarına bağlı küresel ısınma tehlikesidir. Geleneksel betonda kullanılan çimentonun, üretim aşamasında ise atmosfere oldukça fazla CO_2 salınmaktadır. Günümüzde çevre kirliliğini ve atmosfere salınan CO_2 miktarın azaltmak ve daha sürdürülebilir yapı tasarımları için geopolimer ya da alkaliler ile aktive edilen malzemelerin kullanımını yenilikçi ve daha çevreci bir yaklaşım olarak karşımıza çıkarmaktadır. Hem Kuzey hem de Güney Kutuplarının küresel ısınmaya maruz kalması ve buzulların erimesi, büyük miktarlarda CO_2 emisyonu üreten ve çevre kirliliğine neden olan insan faaliyetleri nedeniyle uzun yıllardır alternatif çözümler aranmaktadır. Özellikle inşaat sektörü CO_2 emisyonlarından sorunlu sektörlerin başında gelmektedir. Yapı sektöründe en çok kullanılan yapı malzemelerinden olan beton üretiminde kullanılan 1 ton Portland çimentosu (PC) 1 ton CO_2 salınımına yol açmaktadır. PC, küresel CO_2 salınımının yaklaşık %10'undan sorumludur. Son yıllarda inşaat mühendisliğinde alternatif ve daha sürdürülebilir yapı malzemeleri üzerine AR-GE çalışmaları yapılmaktadır. Bu alanda geopolimer beton türü ön plana çıkan en önemli yapı malzemeleridir. Yukarıda bahsedilen nedenlerden ötürü bu çalışmanın ana parametrelerinden bir tanesi geopolimer beton türü seçilmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisi, yenilikçi ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer betonun performansını etkileyebilir. Sıcaklık etkisini gerek geleneksel beton gerekse de geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerinde etkisinin olduğu bilinmektedir. Hatta belli bir sıcaklık değerine kadar geleneksel betonun basınç dayanımının arttığını ifade eden çalışmalar ile de literatürde karşılaşılmıştır. Geopolimer betonda ise yüksek sıcaklık etkisi geleneksel betona göre farklılık göstermektedir. geopolimer betonun geleneksel Portland çimentosu bazlı betonlara kıyasla yüksek sıcaklık performansı daha iyidir. Hatta sıcaklık kürünün geopolimer betonun mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirten çalışmalara da literatürde ulaşılmıştır. Fakat belli bir yüksek sıcaklık değerinden sonra ise geopolimer betonun mekanik performansı da azalmaktadır. Bahsedilen bu nedenlerde dolayı farklı kür koşullarının geopolimer beton ile donatı çeliği arasındaki aderansı ne ölçüde ve hangi yönde etkileyeceği sorusu bu tez çalışmasının çıkış noktasını oluşturan etkenlerde bir tanesidir. Oda sıcaklığı, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakılan geopolimer beton numunelerinin aderans performansı deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Tez çalışmasının bir diğer ana konusunu da beton ile donatı arasındaki aderans kavramı oluşturmaktadır. İnşaat mühendisliği açısından aderans, beton ile donatı çeliği arasındaki yapışma, tutunma veya bir birine kenetlenme anlamına gelmektedir. Beton ile donatı çeliği arasındaki aderans bir yapı elemanının davranışını ve taşıma gücünü doğrudan etkileyen bir durumdur. Hatta yakın geçmişte ülkemizde yaşadığımız büyük depremlerden sonra yıkılan binalar incelendiğinde donatıların beton içerisinden kolay bir şekilde sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Bu sorunun önüne geçebilmek için de yıllar içerisinde revize edilen yönetmeliklerde nervürlü inşaat demirinin kullanılması mecburi kılınmıştır. Böylece beton ile donatı arasındaki aderansı arttırarak yapı elemanının işlevini en iyi şekilde yerine getirebilmesi amaçlanmıştır. Kolon, kiriş, perde duvar ve döşeme gibi yapı elemanlarında iyi bir aderans bu elemanlara etki eden yüklerden kaynaklı gerilmelerin belli noktalarda toplanması yerine eleman boyunca daha iyi bir şekilde dağılmasını sağlar.

Beton ile donatı arasındaki aderansı etkileyen birkaç parametre vardır. Öncelikle donatı çubuğunun çapı aderansı etkileyen faktörlerden bir tanesidir. Donatı çubuğunun çapı değiştikçe kenetlenmeyi sağlayacak alan artacaktır. Böylece bu noktaya etki eden kuvvetin oluşturduğu radyal gerilmeler artacaktır. Diğer bir değişle donatı çapının artması kesit alanının artmasına ve dolayısıyla etki eden gerilmenin artmasına ve kenetlenmenin azalmasına neden olabilecektir. Bundan dolayı sunulan bu tezde donatı çapı çalışmanın bir parametresi olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında 8 mm, 16 mm ve 24 mm çapında nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır.

Aderansı etkileyen bir diğer faktör de çelik donatının yer ve konumudur. Donatı çubuğunun kesitteki konumu gerilme yığılmaları açısından aderansı etkilemektedir. Dolayısıyla sunulan bu tez çalışmasında donatı çubuğu küp numune üzerinde üç farklı şekilde konumlandırılmıştır. Numunenin orta noktasına, alt kenara yakın ve merkeze 45 derece açı olacak şekilde üç farklı konumda donatı çubuğu yerleştirmiş olup aderans dayanımı değerlendirilmiştir.

Beton ile donatı arasındaki aderansı etkileyen önemli bir faktör de beton karışımıdır. Beton karışımında kullanılan malzemelerin gerek fiziksel gerekse de kimyasal özellikleri beton ile donatı arasındaki aderansı etkilemektedir. Örneğin, beton karışımında kullanılan agregaların granülometri dağılımı, fiber takviyeler ve betonun işlenebilirliğini etkileyen parametreler beton ile donatı çeliği arasındaki aderansı doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla sunulan bu çalışmada öncelikle beton türü olarak daha çevreci ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer beton seçilmiştir. Ulaşılan literatürde beton ile donatı çubuğu arasındaki aderansın değerlendirildiği ve geleneksel betonun kullanıldığı çalışmalara oldukça fazla rastlanılmıştır. Yapılan literatür taramasında artık beton ile donatı arasındaki aderansın araştırılırken geleneksel beton yerine

son zamanlarda araştırmacıların ilgi odağı olan ve yükselen bir trende sahip olan geopolimer beton türü seçilmiştir. Geopolimer betonun gerek harç ve hamur bazında gerekse de yapı elemanlarına uygulanması giderek popüler hale gelmiştir. Hatta ulaşılan literatürde geopolimer betonun kullanıldığı numunelerde aderans dayanımı üzerinde durulan çalışmalara da rastlanılmıştır. Dolayısıyla sunulan bu çalışmaya özgünlük katılması açısından ve literatürdeki lifli geopolimer betonun aderans üzerindeki etkisin hakkındaki boşluğun doldurulması açısından lifli geopolimer beton ve donatı çubuğu arasındaki aderans üzerinde durulmuştur. Çalışma kapsamında da literatürde sıkça kullanılan bazalt ve cam lifler tercih edilmiştir.

Yukarıda da bahsedilen sebeplerden dolayı sunulan bu yüksek lisans tez çalışmasının konusunu, yenilikçi ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer beton ile yapı elemanlarının performansı üzerinde önemli bir etkisi olan aderans olayının birlikte değerlendirilmesi oluşturmaktadır. Bundan dolayı bu tez çalışmasının amacı, bazalt ve cam lifli geopolimer betondan üretilen deney numunelerinde, lif türü, donatı çapı, donatının konumu ve maruz kalınan sıcaklığın aderans dayanımı ve performansı üzerindeki etkinin deneysel olarak incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda da geleneksel betonda performansı arttıran bazalt ve cam liflerin geopolimer betonda aderans üzerindeki etkisinin tespit edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca küp numune üzerinde üç farklı şekilde yerleştirilen donatı çubuğunun da aderansı ne yönde ve hangi ölçüde etkileyeceğinin deneysel olarak tespit edilmesi de hedeflenmiştir. 8 mm, 16 mm ve 24 mm çaplarında donatılar seçilerek de donatı çapının lifli geopolimerin aderans dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılması da hedeflenmektedir. Çalışmanın bir diğer hedefi ise farklı sıcaklık değerlerinin (20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C), lifli geopolimer beton ile donatı çubuğu arasındaki aderans üzerindeki etkinin araştırılmasıdır. Bu çalışmanın özgün değeri ise özellikle farklı lif türlerine sahip ve son zamanlarda araştırmacıların ilgi odağı olan geopolimer beton üzerinde aderans çalışmasının yürütülmesidir.

Sunulan bu tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, KURAMSAL TEMELLER başlığında, geopolimer beton kavramı üzerinde durulmuştur. Geopolimer betonun tarihsel gelişimi, avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Bununla birlikte aderans kavramı üzerinde durulmuş olup, aderansı etkileyen parametreler ve bu parametreler ile tezin konusunu oluşturan parametreler arasındaki bağlantılardan bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde literatürde ulaşılan geleneksel betonlu ve geopolimer betonlu aderans çalışmalarının özetleri sunulmuştur.

İkinci bölümde, MATERYAL VE YÖNTEM başlığı altında, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri, deney düzeneği, deney parametreleri ve deney numunelerinin açıklanması üzerinde durulmuştur. Deney numunelerinin imalatı, ölçüm ile

yükleme prosedürü açıklanmıştır. Ayrıca deney sonucunda ulaşılacak hedefler doğrultusunda çizilen grafik ve tablo değerlerinin hesaplanması açıklanmıştır.

    nc  bölümde, ARAşTIRMA BULGULARI VE TARTIşMA başlığında öncelikle numunelerin aderans performansı kenetlenme dayanımı-sıyrılma ilişkisi çerçevesinde değerlendirilmiştir. Deney numunelerinin aderans dayanımları, numuneler çatlak dağılımı, sıyrılma miktarı gibi çıktılar değerlendirilmiştir. Daha sonra donatı çapı, lif türü, donatının konumu ve yüksek sıcaklık parametrelerinin aderans performansı üzerindeki etkisi karşılaştırılmalı olarak açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, SONUÇ VE  NER LER başlığında deneysel veriler genel hatları ile özetlenerek sunulmuştur. Bununla birlikte gelecekteki çalışmalara yönelik öneriler de yine bu bölümde sunulmuştur.



KURAMSAL TEMELLER

Küresel Isınma günümüzde ki en büyük küresel sorunlardandır. Bu nedenle kaynakların verimli kullanımı insanlık için büyük önem arz etmektedir. İnşaat mühendisleri ise birçok çevre dostu proje üzerine çalışmaktadır. Betonun en önemli bileşenlerinden olan çimentonun üretimi küresel ısınmada önemli bir rolü olan, sera gazı olarak tanımlanan karbondioksitin (CO_2) önemli miktarlarda salınımına yol açar. Çimento üretimi sırasında kil ve kireçtaşı yaklaşık 1500 °C sıcaklığında işlem görür. Bu işlemler sırasında ortaya çıkan çimento üretimi kaynaklı CO_2 emisyonu küresel CO_2 emisyonu toplamının %5-%7' sini oluşturmaktadır (Maddalena *et al.* 2018)

Agrega çimento ve suyun ayrıca ihtiyaç halinde mineral ve kimyasal katkıların uygun oranda karıştırılması ile oluşan homojen karışımdır. Başlangıçta plastik kıvamda olup zaman içerisinde sertleşmektedir. Çağdaş toplumların en önemli yapı malzemelerinden biridir.

Çimentoya alternatif olarak görülen geopolimer terimi ilk kez 1979' da Davidovits tarafından zeolitler gibi amorf bir mikro yapıya ve kimyasal bileşime sahip olan bir mineral bağlayıcıları tanımlamak için yapılmıştır (Pacheco-Torgal *et al.* 2018). Geopolimerler, alüminosilikat malzemelerin alkali silikat veya hidroksit aktivasyonu ile oluşturulan alkali alüminosilikat bağlayıcılardır (Duxson *et al.* 2007).

Alkali aktivatörler arasında oldukça hızlı gerçekleşen kimyasal reaksiyonlara Geopolimerizasyon adı verilmektedir. Bazik ortamda, çeşitli alüminyum, silisyum ve oksijen atomlarının, reaksiyon sonucu alimünosilikat polimeri olarak isimlendirilen Si-O-Al-O yapısal zincirini oluşturduğu görülür (Xu and Deventer 2000) inorganik polimerlerin üyesi geopolimerler, amorf yapılarından yarı kristal yapısına geçerler. Bu şekilde dayanıklılık ile mukavemet bakımından daha iyi bir malzeme oluşur. Bu oluşum geopolimer beton olarak adlandırılır.

Puzolanik malzemeler, alkali çözeltiler ile tepkimeye girerek agregayı harika bir şekilde sarıp sertleşerek, alüminosilikat jeli oluşturup geopolimeri oluştururlar. Geopolimer erime ya da sinterleme olmayıp, bir polimerizasyon prosesidir. Geopolimerler, Silisyum, Magnezyum, Kalsiyum, Alüminyum, Fosfor, Potasyum, Sodyum gibi mineral moleküllü monomerler arasında polimerleşme tepkimesi ile kovalent kompleks polimer zincirlerin oluşmasıyla olur (Görhan *et al.* 2015).

Geopolimer beton, çimento kullanılmadığı için çevreci bir beton türü olarak bilinmektedir. Geopolimer beton üretiminde puzolanik özellik gösteren endüstriyel atıkların kullanılmasıyla çevreci beton olarak bilinmesine olanak sağlamıştır. Bu endüstriyel atıklar geopolimer betonlarda çimento yerine kullanıldığı için çimento tüketimi azaltmakla birlikte betonun mekanik özelliklerine olumlu katkılar sağlamıştır. Endüstriyel atıklar “yüksek fırın cürufu, uçucu kül, taban külü, silis dumanı”, ısıtılmış malzemeler “metakaolin, pişirilmiş killer ve şeyller” ve doğal puzolanlar “ diatomit toprak, traslar ve volkanik küller” geopolimer beton içerisinde kullanılabilmektedir. Geopolimer betonların içerisinde bu kadar malzemelerin kullanılmasıyla birlikte geniş bir çalışma ve araştırma alanına sahip olduğunu gösterir.

Geopolimer betonların avantajları

Geopolimer betonların, geleneksel betonlara göre avantajları vardır:

Daha düşük CO₂ gaz salınımına sahiptir.Yüksek ısı yalıtım özelliği sağlar.Yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı ve yangın dayanımına sahiptir.Atık malzemelerin kullanılmasına olanak sağlar.

Daha iyi basınç dayanımına sahiptir.

Geopolimer betonların dezavantajları

Geopolimer betonların, geleneksel betonlara göre bazı dezavantajları vardır. Bunlar Kullanılan kimyasalların insan sağlığına zararlı olduğu için üretimi zordur. Hassas geopolimerizasyon sürecine sahiptir.

Geopolimerler çok hızlı bir şekilde yüksek dayanıma sahip olma özelliği taşımaktadırlar. Ayrıca donma-çözülme, aşınma vb. gibi durabilete özelliklerinin PÇB' ye göre daha iyi olduğu bilinmektedir (Çakmak and Uysal 2021). Bu üstün özellikleri nedeniyle GB'ler, yaya köprüleri, hava alanı yolları, dayanma duvarları, atık tankları, çevreci yaklaşımla yapılan binalar gibi birçok uygulamada tercih edilmişlerdir.

Betonarme, beton ile inşaat çeliğinin birlikte kullanıldığı inşaat yapı malzemesidir. Betonarme yapı elemanında beton, basınç gerilmesine, donatı çekme gerilmelerini karşılar. Gevrek özellikte olan beton, basınç gerilimine karşı mukavemet gösterebilmektedir. Beton duktıl olan çelik ile güçlendirilerek çekme ve basınca dayanıklı bir yapı malzemesi olan betonarmeyi yapı malzemesini oluşturur.

Betonarme davranışının sağlanması için yapı elemanının beton ve donatıdan oluşması ve donatının betona kenetlenmesi gerekmektedir. Bu kenetlenmeyi sağlayan, donatı ile beton arasında oluşan kayma gerilmelerine aderans adı verilmektedir (Bakis *et al.* 1988). Adereans mekanizması olmaz ise çelik çubuk beton içerisinden ayrılır ve eleman, betonarme değil düz beton özelliklerde davranır (Sartori *et al.* 2017).

Betonarmede aderans iki şekilde oluşur. İlk olarak dış aderans inşaat çeliğinin oluşan yük altında betonu bırakmasını engellerken, ikincisinde iç aderans olarak adlandırılan, eğilme veya çekme yükleri altında betonarme yapı malzemesinin yarıma olayını tayin eden davranıştır (Celep ve Kumbasar 1996).

Yapılan bilimsel çalışmalara göre aderans gerilmesi çoklu değişkene sahiptir. Değişkenlerin en önemlileri, betonun çekme gerilmesi direnci, çeliğin akmaya karşı direnci, donatının yüzey geometrisi, donatı çapı, donatının konumu, donatının birleşme boyu, pas payı tabaka kalınlığı, yerel gerilmeler, sargı donatısı, kullanılan agreganın cinsi ve kullanılan katkı maddeleri olarak sıralanmaktadır (Şener 2006).

Aderans kaymaları çoğaldıkça beton yarılr. Hareketlilik süreklilik gösterir ve aderans bütünüyle yok olursa, çelik çubuk betondan ayrılır (Ersoy ve Özcebe 2001).

Aderans Çeşitleri:

Kenetlenme Aderansı

İnşaat çeliğinin beton içine yerleştiği boyu kenetlenme uzunluğu olarak belirtilirken, meydana gelen bu aderansa kenetlenme aderansı denilmektedir. Betonla inşaat çeliğinin birleşmesinin yeterli seviyede olduğunda, çelik çubuğun ayrılması ya da betonun derin çatlaması olayları azalmış olur.

Eğilme Aderansı

Eğilme yükü altındaki betonarme bir yapı elemanında, beton ile çelik çubuk arasında kesit kuvvetlerinin değişimi vardır. Oluşan değişim aderans gerilmeleri dolayısıyla oluşmaktadır. Bu gerilmeler eğilme aderansı olarak adlandırılan kesme gerilmesidir. Çelik çubuğun birim uzama kapasitesi, betonun birim uzama kapasitesine göre daha yüksektir. Bu

sebeple çelik çubuktaki birim uzamalar çoğaldığında betonda yarılmalar oluşmaktadır. Eğilme aderansı, betonarme yapının eğilme yükü etkisindeki davranışında göstereceği yarıma durumunda önemli rol oynamaktadır (Yalçın 2019).

Aderans Kuvvetleri:

3 adet aderans kuvveti mevcuttur bunlar;

1. Beton ve Donatı Arasındaki Sürtünme Kuvveti

Düz çelik çubuklar da dâhil olmak üzere yeni imal edilmiş inşaat çeliği donatıların yüzeyinde azda olsa pürüzlülük vardır. Bu çıkıntılar betona tutunma sağlayarak sürtünme kuvveti oluştururlar ve düz donatıların aderansının tamamına yakını bu tutunmadan oluşur (Yılmaz 2006).

2. Beton ve Donatı Arasındaki Mekanik Kuvvetler

Nervürlü donatılardaki tümsek şeklindeki kabarıklar ile beton birbirlerine tutunarak aderans oluşturmaktadır. Tutunmadan meydana gelen kuvvetler mekanik dış kuvvetleri olarak adlandırılır (Ersoy ve Özcebe 2001).

3. Beton ve Donatı Arasındaki Moleküler ve Kapiler Bağ Kuvvetleri

Bağ kuvvetleri aşırı az olmasıyla birlikte düşük yüklerle, donatı ve beton arasındaki yer değişimlerle ayrılmaktadırlar (Tanyıldızı 2006).

Aderans Dayanımına Etki Eden Faktörler

İnşaat Çeliğinin Çapı

İnşaat çeliği boyutu, inşaat çeliği ile etrafındaki beton ile bağ gerilmesini etkileyen sebeplerin başında gelir. Nervürlü inşaat çeliği bağ kuvvetini etkilerken, daha büyük donatı çapına sahip inşaat çeliği ile daha küçük donatı çapına sahip inşaat çeliğine oranla daha az bağ kuvveti meydana gelir (Elbusaefi 2014). Çap ne kadar farklılaşırsa birleşmenin gerçekleştiği etrafın, kuvvetin uygulandığı alana göre oranı değişir (Boğa 2005). Bu sebeple, donatı çapı ne kadar küçülürse, aderans dayanımı da o denli artacağını veya donatı çapı arttıkça da kesit yüzeyi fazlalaşacağından donatının maruz kalacağı kuvvette artacak ve kenetlenmenin azalacağı tespit edilmiştir.

İnşaat Çeliğinin Konumu

Aderansın daha iyi sağlanabilmesi için betonun içerisine gömülen donatıyı sarmalaması gereklidir. Beton dökümü sırasında üst katmanda donatıların zemininde oluşan hava kabarcıkları bu donatıların beton ile oluşan aderansında olumsuz etkiler oluşturur (Şahin 2019).

Beton ve inşaat çeliğın arasında kenetlenme fazlalaştıkça aderans o kadar yüksek olacaktır. Betonun düzgün yerleştirilmemesi sebebiyle üst donatı altı betondaki oturma, alt donatılarinkine göre daha fazla olacağından aderansın daha az olmasına sebebiyet vermektedir.

Kenetlenme Boyu

Beton ile çelik çubuk arasındaki aderansın yeterli düzeyde oluşması için çelik çubuk akmanın üstünde şekil değıştirdiğinde ya da akma dayanımına ulaştığında, çelik çubuğun betonu çatlatması ve betondan ayrılması meydana gelmesi gerekmektedir. Bu yüzden kenetlenme boyunun tasarıma uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Çelik Çubuk Yüzeyi

Nervürlü inşaat çeliğinin aderans gerilmesi düz inşaat çeliğinin, tutunma yüzeyinin daha fazla olmasından dolayı daha yüksektir (Boğā 2005).

Çelikteki Akma Dayanımı

Çelik Çubuktaki akma dayanımı kenetlenme boyunca aderans gerilmesindeki dağılımı etkilemektedir.

Enine Donatı

Sabitlenme yerlerinde kullanılan enine donatılar ile çubuk donatıda oluşması muhtemel çatlakların önüne geçilebilir. Enine donatı kullanılmaz ise betonarme elamanda meydana gelecek bir yarığı durduramayacağından aderans yok olacaktır. Enine donatıyla hasar tamamen önlenemese de hasarı azaltmaya yardımcı olur.

Paspayı

Paspayı miktarı artıkça aderansın çoğaldığı, düştükçe aderansın azalarak çatlakların oluştuğı yapılan bilimsel çalışmalarda tespit edilmiştir (Karabacak 1994).

Betonun Çekme Dayanımı

Nervür donatılı yapı elemanlarında çatlama olasılığı olduğu için çekme dayanımı önem arz etmektedir (Boğā 2005).

Kullanılan Agregā Cinsi

Betonarme yapı elemanlarında beton karışımında bulunan agregā hafif seçildiğinde aderans, standart agregaya nazaran daha az oluşacaktır (Boğā 2005).

Çekme-Çıkarma Deneyi

Çekme-çıkarma deneyinin ilk ortaya çıkışı Sovyetler Birliği'dir. Kenetlenme davranışını belirlemek için beton ile çelik çubuk arasındaki aderansı belirlemek üzere çeşitli deneyler vardır. Bunlardan en çok tercih edilen çekme deneyleridir. Her deneyde olduğu gibi çekme deneylerinin avantajları ve dezavantajları mevcuttur. Çekme deneyi, daha az gömme uzunluk ölçülerinde daha kolaydır. Çelik çubuk bir betonun içine yerleştirilir ve sonradan direk beton numuneden çekilir, bu da üç genel arıza tipine yol açabilir. Çelik donatıyı saran betonun, çelik donatı nervürleri tarafından oluşturulan kesmede başarısız olduğu çekme kırılması, (2) çelik donatı çevresinde oluşan radyal çatlaklar, bu çatlaklar beton yüzeyinin dışına ulaştığında numunenin ayrıldığı ve (3) çelik donatının akmasıdır. Avantajlı yanı ise beton ile çelik çubuk arasındaki kaymanın ölçülmesi ile kenetlenme dayanımının hesaplanmasına olanak verir. Deney, çeşitli beton karışımına göre kayma direnci, çimento katkı malzemeleri ve farklı boyutlardaki çelik çubukların korozyonu gibi çeşitli bağ dayanımının göstergelerinin etkisini inceleyebilmekye olanak sağlayacaktır (Elbusaefi 2014).

Bu deney ile kenetlenmenin gerçek direnciyle karşılaştırıldığında, kenetlenmenin orantılı direncinin elde edildiği her yerde faydalı olacaktır. Yük uygulanması sonucu, uygulanan yük arttırıldığında kayma miktarında artış meydana gelir, bununla birlikte daha çok aderans gerilmesine ve çelik çubuğun betonunda bir kaymanın derinden artış göstermesine yol açmaktadır. Betona yerleştirilmiş çubuk yeterli uzunlukta ise, kenetlenme dayanımı çubuktaki çekme dayanımından daha yüksek hal alır bu da çubuğun kopması ile kırılmasına neden olur. Çelik çubuk daha kısa ise aderans mukavemeti çubuğun mukavemetinden daha düşük olur. Beton ve çelik çubuktaki çekme sebebiyle kırılma oluşur. Bir beton için boyuna yönünde çatlama oluşması halinde, çökme nedeniyle çevresindeki betonu çatlatacaktır. Deney türünde, betonarme elemanlarda mevcuttaki eğilme momentlerine ya da dış kesmeye maruz kalmamaktadır. Bu sebeple, çekme testindeki arıza tipi doğru olmamaktadır (Alfouadi 2020).

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal ve Yöntem başlığı altında deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin tanımı, standartlara uygunluğu, deney yöntemleri, yükleme prosedürü vb. parametreler açıklanmıştır. Materyal alt başlığında geopolimer beton karışımında ve deneysel ölçümler için kullanılan malzemelerin tanımları yapılmıştır. Ayrıca bu başlık altında gerek geopolimer numunelerin gerekse de donatıların karakteristik özelliklerinin belirlenmesi için uygulanan deney yöntemleri açıklanmıştır. Yöntem başlığında ise deney düzeneği, ölçüm yöntemi ve yükleme prosedürü gibi parametreler açıklanmıştır. Bununla birlikte yine bu başlık altında deney numunelerin geometri ve donatı detayları açıklanmıştır.

Materyal

Materyal başlığı altında deneysel çalışmada kullanılan malzemeler detaylı olarak ele alınmıştır. Çalışmada geopolimer beton yüksek fırın cüruf esaslı olarak üretilmiştir. Bununla birlikte yüksek fırın cürufuna ek olarak metakaolin malzemesi de kullanılmıştır. Ayrıca zaten çevreci ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer beton türünde mermer tozu gibi bir diğer atık malzeme de kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımında alkali aktivatör olarak ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Bununla birlikte aderans deneylerinde üç farklı çapta (8, 16 ve 24 mm) nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır. Lifli geopolimer beton karışımında ise cam ve bazalt lifler kullanılmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri açıklanmıştır.

Sunulan tez çalışmasında esas bağlayıcı malzeme olarak öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu Türkiye’ de Bolu ilinde buluna OYAK çimento fabrikasından temin edilmiştir. Yüksek fırın cürufu genel olarak demir çelik fabrikalarında üretim aşamasından kalan yan bir üründür. Bu çalışmada da çevreci ve sürdürülebilir bir beton türü olan geopolimer beton karışımında yüksek fırın cürufu, bağlayıcı malzeme olarak kullanılarak bu malzemenin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Geopolimer beton karışımında kullanılan yüksek fırın cürufu ASTM C 618 (2023) standardına uygundur. Yüksek fırın cürufunun fiziksel özellikleri **Tablo 1**’de sunulmuştur. Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı $2,90 \text{ g/cm}^3$ tür. Bununla birlikte yüksek fırın cürufunun fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan ilgili standart da tabloda sunulmuştur. Ayrıca yüksek fırın cürufunun TS-EN 196-2 (2013) standardına uygun olarak belirlenen kimyasal özellikleri ise **Tablo 2**’de sunulmuştur. **Tablo 2**’den görüldüğü üzere çalışmada kullanılan yüksek fırın

cürufunda yaklaşık olarak %41,7 oranında silika ve %35 oranında kalsiyum oksit mevcuttur. Böylece karışımda kullanılan yüksek fırın cürufunda yüksek silika muhtevassından dolayı bağlayıcı olarak kullanılmasında bir sakınca olmadığı görülmektedir.

Tablo 1. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Fiziksel Özellikleri

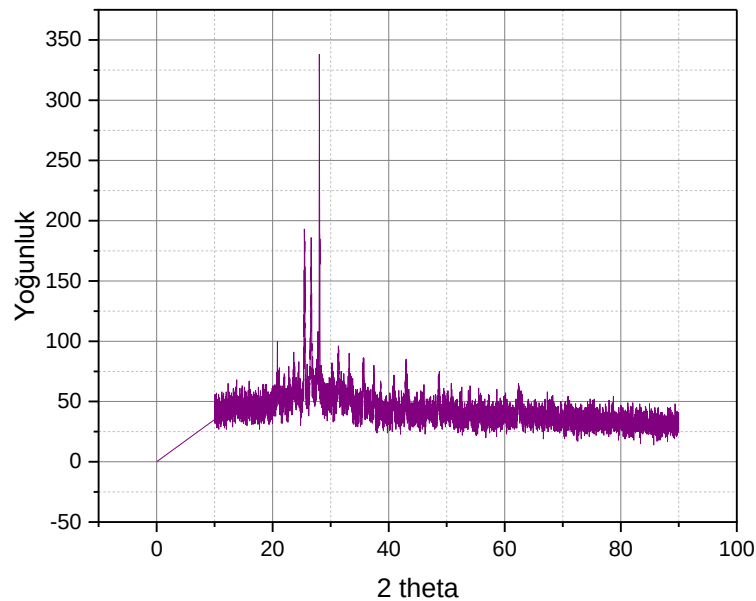
Fiziksel özellik	Birim	Değer	TS EN 197-1 sınır değerleri	Deney metodu
Özgül ağırlık	g/cm ³	2,90	-	TS EN 196-6
Özgül yüzey (blaine)	cm ² /g	5445	min 2750	TS EN 196-6
Priz başlangıcı	Dakika	230	max (2xRef)	TS EN 196-3
Priz başlangıcı referans	Dakika	155	-	TS EN 196-3
Rutubet	%	0,1	max 1	TS EN 15167-1
7 günlük aktivite	%	55,7	min 45	TS EN 196-1
28 günlük aktivite	%	78,6	min 70	TS EN 196-1

Tablo 2. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Özellikleri (%)

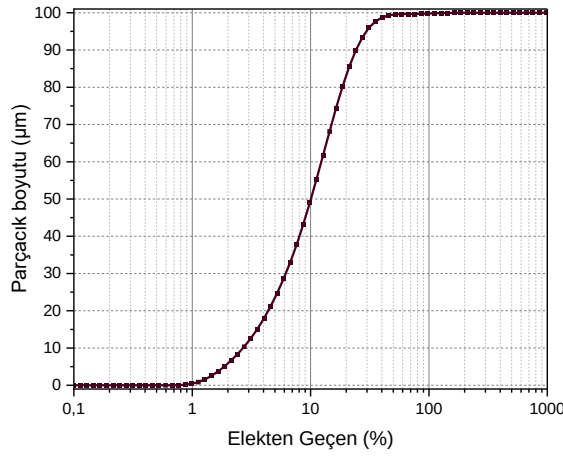
SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
41,7	36,6	10,1	6,25	3,1	0,51	0,92	0,87	0,4

SiO₂: Silisyum dioksit, CaO: kalsiyum oksit, Al₂O₃: alüminyum oksit, MgO: magnezyum oksit, Fe₂O₃: demir(III) oksit, SO₃: sülfür trioksit, K₂O: potasyum oksit, Na₂O: sodyum oksit, LOI: düz kızdırma kaybı

Karışımda kullanılan yüksek fırın cürufunun XRD deseni **Şekil 1'** de sunulmuştur. Bununla birlikte yüksek fırın cürufunun görüntüsü ve elek analizi **Şekil 2'** de sunulmuştur.



Şekil 1. Yüksek fırın cürufunun XRD deseni



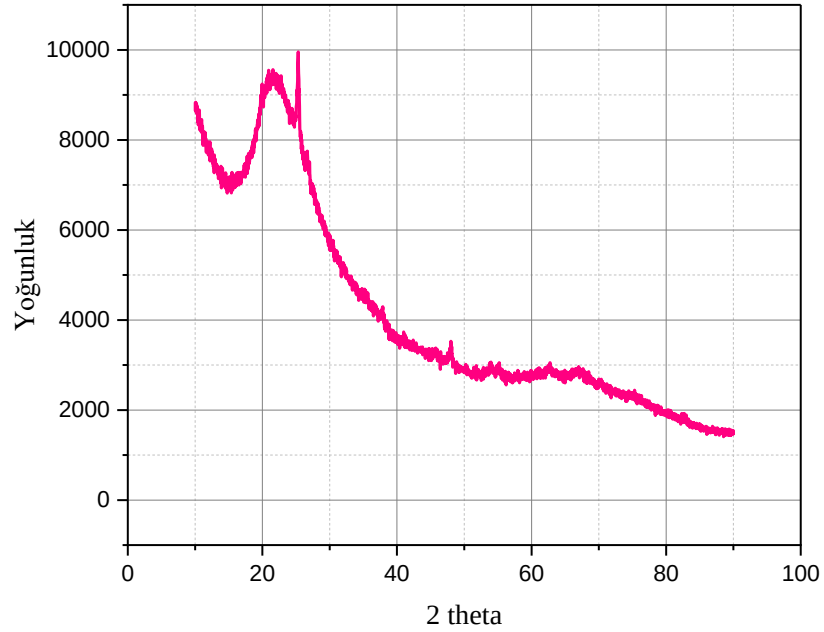
(a)



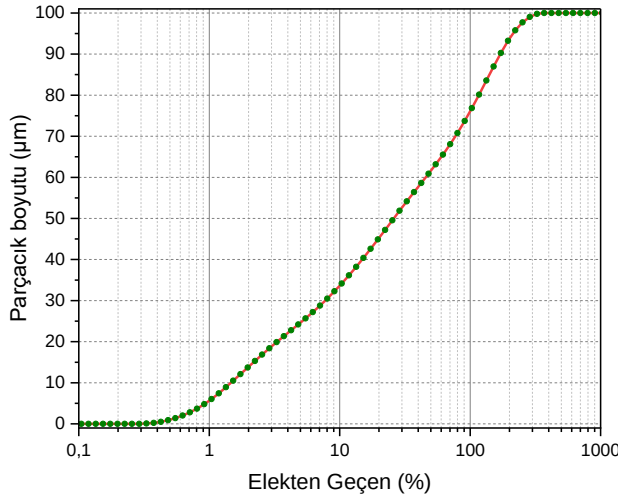
(b)

Şekil 2. Yüksek fırın cürufu (a) elek analizi (b) görüntüsü

Geopolimer beton karışımında yüksek fırın cürufunun yanı sıra metakaolin de kullanılmıştır. Metakaolin tüm karışımlarda ve aynı oranda kullanılmıştır. Metakaolinin özgül ağırlığı ve yüzey alanı sırasıyla $2,66 \text{ gr/cm}^3$, ve $18860'$ dır. Karışımlarda kullanılan metakaolinin kimyasal ve fiziksel özellikleri **Tablo 3'**de sunulmuştur. **Tablo 3'** den görüldüğü üzere metakaolinde yaklaşık olarak %54 silika ve %39 oranında alüminyum oksit mevcuttur. Böylece karışımlarda kullanılan metakaolinin yüksek mukavemet sağlayacağı anlaşılmaktadır. Metakaolin malzemesinin, **Şekil 3** XRD deseni ve **Şekil 4'**de ise elek analizi ile birlikte görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 3. Metakaolinin XRD deseni



Şekil 4. Metakaolinin (a) elek analizi (b) görüntüsü

Tablo 3. Metakaolinin Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	Özgül ağırlığı (gr/cm ³)	Yüzey alanı	Renk
0.4	54.3	38.4	4.6	0.1	0.3	0.6	0.3	0.4	2.66	18860 ^b	Beyaz

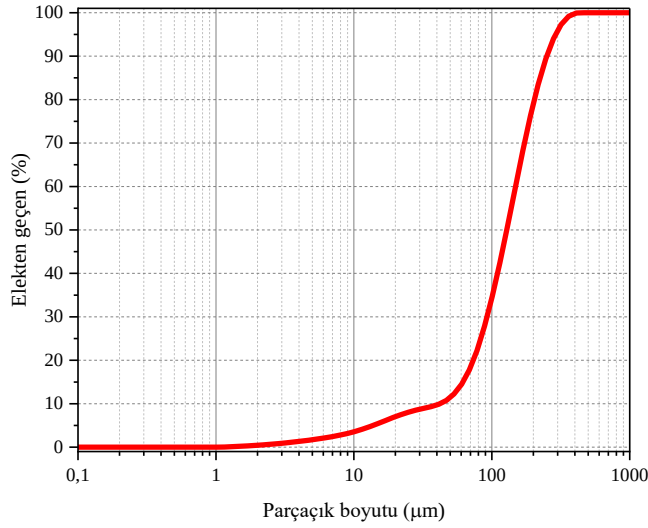
CaO: kalsiyum oksit, SiO₂: Silisyum dioksit, Al₂O₃: alüminyum oksit, Fe₂O₃: demir(III) oksit, MgO: magnezyum oksit, Na₂O: sodyum oksit, K₂O: potasyum oksit, SO₃: sülfür trioksit, LOI: düz kızdırma kaybı

Geopolimer karışımında 2,65 gr/cm³ özgül ağırlıklı atık mermer tozu kullanılmıştır. Böylece sunulan bu tez çalışmasının ana hedefi olan çevreci ve sürdürülebilir malzemelerin inşaat mühendisliği alanında yapı elemanlarında kullanımı hedefine paralellik göstermektedir. Dolayısıyla atık mermer tozunun beton karışımında değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Karışımında kullanılan atık mermer tozunun kimyasal özellikleri **Tablo 4**'de sunulmuştur. Karışımında kullanılan atık mermer tozunun görseli ve granülometre eğrisi **Şekil 5**'de sunulmuştur.

Tablo 4. Atık Mermer Tozu Kimyasal Özellikleri (%)

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
53,2	0,4	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	45,1

CaO: kalsiyum oksit; SiO₂: silisyum dioksit veya silika; Al₂O₃: alüminyum oksit; Fe₂O₃: demir(III) oksit veya ferrik oksit; MgO: magnezyum oksit veya magnezya; Na₂O: sodyum oksit; K₂O: potasyum oksit; SO₃: kükürt trioksit; LOI: kızdırma kaybı



Şekil 5. Atık mermer tozu (a) elek analizi (b) görüntüsü

Geopolimer beton karışımında iki farklı alkali aktivatör kullanılmıştır. Karışımda sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) malzemeleri alkali aktivatör olarak kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan sodyum silikatın, sodyum hidroksite oranı karışımın mukavemet ve işlenebilirlik parametreleri de göz önünde bulundurularak ve önceki çalışmalar baz alınarak [Bayrak *et al.* 2023a; Bayrak *et al.* 2023b; Öz *et al.* 2023) 2,5 olarak tercih edilmiştir. Karışımlarda kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri **Tablo 5** ve **Tablo 6'** da sunulmuştur. Karışımda kullanılan sodyum hidroksitin 30 °C' de yoğunluğu 1,5 gr/cm³ ve kaynama noktası 1390 °C' dir. Sodyum silikatın ise 20 °C' de yoğunluğu 1,38-1,42 gr/cm³ dür. Ayrıca saflık derecesi ise 2 modüldür.

Tablo 5. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Özellikleri (%)

Na_2CO_3	NaOH	Cl	SO_4	Fe	Al
0,3	99	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01

Na_2CO_3 : sodyum karbonat; NaOH: sodyum hidroksit; Cl: klorür; SO_4 : sülfat; Fe: demir; Al: alüminyum

Tablo 6. Sodyum Silikatın Kimyasal Özellikleri (%)

SiO_2	Na_2O	H_2O	Fe
28,2	8,8	63,0	<0,01

SiO_2 : silisyum dioksit veya silika; Na_2O : sodyum oksit; H_2O : su; Fe: demir

Deneyisel çalışmada daha öncede vurgulandığı üzere bazalt ve cam lifli geopolimer karışımlar üretilmiştir. Bazalt liflerin, yüksek mukavemet ve yüksek kimyasal direnç özelliklerinden faydalanılmak için tercih edilmiştir. Benzer şekilde cam liflerinde yüksek elastisite özelliğinden faydalanılması hedeflenmektedir. Geopolimer beton karışımında cam liflerin karışım içerisinde zarar görmemesi için alkali dirençli cam liflerden tercih edilmiştir.

Karışımlarda 13 mm uzunluğunda cam lif kullanılmıştır. Bununla birlikte lif boyutu ve lif hacmine karar verilirken işlenebilirlik ve mukavemet parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Geopolimer beton karışımında hacimce %0,75 oranında cam lif kullanılmıştır. Bu oranın üzerine çıkıldığı ön dökümlerde işlenebilirliğin önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Bu sebepten dolayı liflerin hacim oranı %0,75 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda 12 mm uzunluğunda bazalt lif kullanılmıştır. Böylece cam ve bazalt lifli karışımların karşılaştırılması yapılırken boyut faktörünün ihmal edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan bazalt ve cam liflere ait teknik özellikler **Tablo 7 ve Tablo 8'** de görülmektedir. Ayrıca karışımda kullanılan bazalt ve cam liflerin görseli **Şekil 6'** da görülmektedir.

Tablo 7. Bazalt Lif Teknik Özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Çekme dayanımı	MPa	4840
Elastisite modülü	GPa	89
Sıcaklık limitleri	°C	-260 ~ +982
Ergime sıcaklığı	°C	1450
Özgül ağırlık	gr/cc	2,60 ~ 280
Elyaf çapı	mikron	9-23

Tablo 8. Cam Lif Teknik Özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Çekme dayanımı	MPa	4135
Elastisite modülü	GPa	85
Uzama	%	4,8
Termal genleşme katsayısı	$10^{-7}/^{\circ}\text{C}$	33
Özgül ağırlık	gr/cc	2,60
Elyaf çapı	mikron	13±1,4



(a)



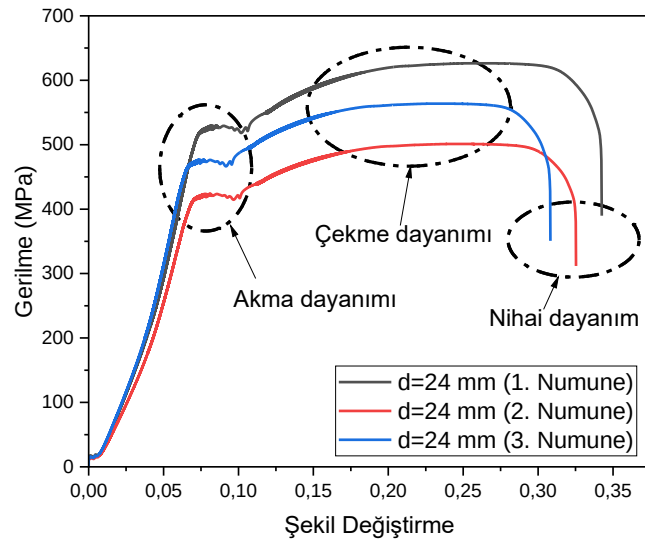
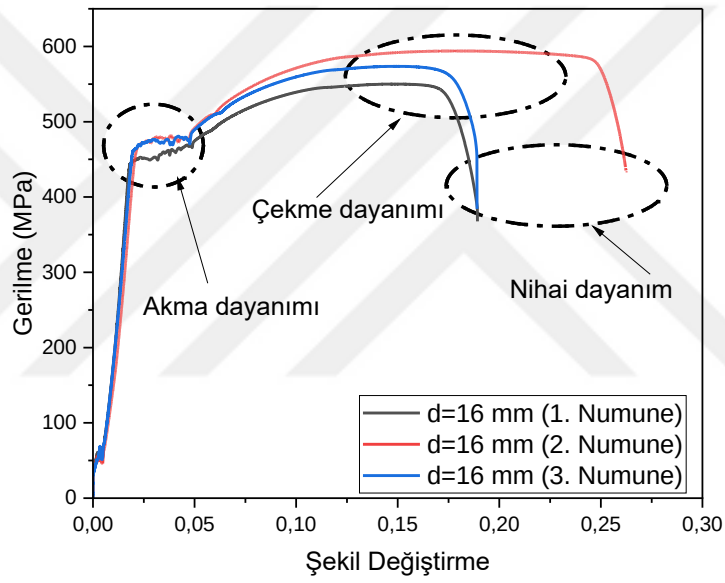
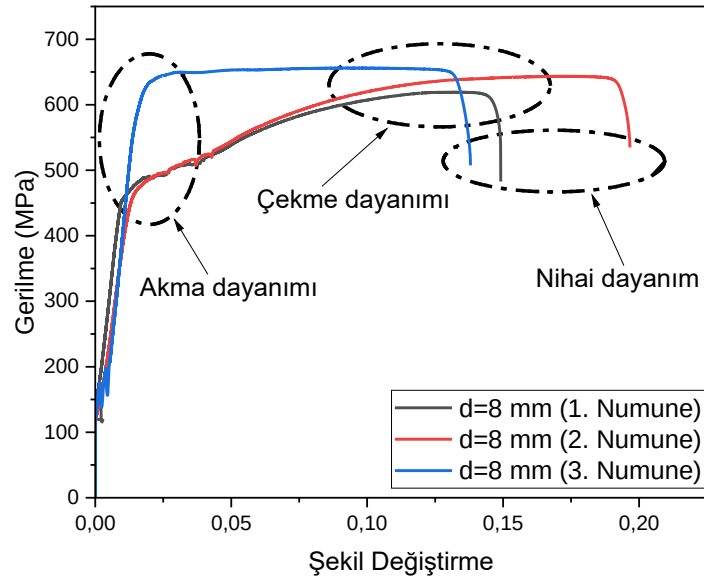
(b)

Şekil 6. Karışımda kullanılan liflerin görüntüsü (a) cam lif (b) bazalt lif

Çalışmanın ana parametrelerinden bir tanesi de donatı çapının aderans dayanımı üzerindeki etkisinin araştırılmasıdır. Bu sebepten dolayı deneysel çalışma kapsamında 8 mm, 16 mm ve 24 mm olmak üzere üç farklı çapta donatı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan farklı çaplardaki donatıların gerilme-şekil değiştirme eğrileri **Şekil 7'** de sunulmuştur. Deney numunelerinde kullanılan boyuna donatılardan rastgele üç adet örnek alınmış olup geleneksel çekme deneyi uygulanmıştır. Bununla birlikte çalışmada kullanılan donatılar nervürlü inşaat demiri olarak tercih edilmiştir. Dolayısıyla donatıların nominal ve ölçülen çapları bir birinden farklı olmaktadır. Donatıların mekanik özellikleri de **Tablo 9'** da sunulmuştur. **Tablo 9'** dan görüldüğü üzere donatıların nominal ve ölçülen çapları bir birinden farklıdır.

Tablo 9. Donatıların Mekanik Özellikleri

Nominal çap (mm)	Ölçülen (mm)	çap	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Nihai dayanım (MPa)
8	8,2		619,37	469,07	482,85
8	8,2		643,59	473,19	534,72
8	8,1		656,25	594,27	507,52
16	16,4		550,05	450,52	367,62
16	16,3		594,03	471,81	433,55
16	16,3		573,63	469,90	384,20
24	24,4		626,40	417,12	389,82
24	24,5		501,12	468,86	311,86
24	24,5		563,76	520,09	350,84



Şekil 7. Donatıların gerilme şekil değiştirme eğrileri (a) 8 mm çap (b) 16 mm çap (c) 24 mm çap

Sunulan tez çalışması kapsamında bazalt lifli ve cam lifli olmak üzere iki farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Tez çalışmasında kullanılan beton karışım oranları **Tablo 10'** da sunulmuştur. Karışım oranlarına, gerek ön dökümler gerekse de literatürdeki çalışmalar (Kaplan *et al.* 2023a; Kaplan *et al.* 2023b; Alcan *et al.* 2023) dikkate alınarak karar verilmiştir. **Tablo 10'** dan görüldüğü üzere çalışmada kullanılan geopolimer beton yüksek fırın cüruf esaslı olarak üretilmiştir. Bununla birlikte mukavemet açısından bir diğer malzeme olan metakaolin kullanılmıştır. Karışımındaki yüksek fırın cürufu ve metakaolinin toplam miktarı 800 kg/m^3 tür. Ayrıca bir diğer atık malzeme olan mermer tozu da karışımında ince agrega olarak kullanılmıştır. Geopolimer beton karışımında su kullanılmamıştır. Bunun yerine geopolimerizasyon sürecinin başlaması için alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit toplam bağlayıcının yaklaşık %78' i oranında kullanılmıştır. Toplam alkali aktivatör miktarı ise sodyum silikat ve sodyum hidroksit arasında 2,5 kat olacak şekilde ayarlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar da göz önünde bulundurularak sodyum silikat/sodyum hidroksit oranı 2,5 olarak tercih edilmiştir.

Tablo 10. 1 m³ İçin Beton Karışım Miktarları

Beton türü	Yük. Fırın cürufu	Metakaolin	Atık mermer tozu	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Cam lif	Bazalt lif
			(kg)			(%)	
GC1	720	80	700	180	450	0,75%	-
GC2	720	80	700	180	450	-	0,75%

Beton döküm işlemleri Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde bulunan laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. **Şekil 8' de** beton döküm aşamasını göstermektedir. Beton dökümü için 300 dm³ kapasiteli laboratuvar tipi betoniye kullanılmıştır. Her bir numuneden üç adet üretilmiş olup bu numuneler arasında homojenliği sağlamak için her grup tek döküm şeklinde gerçekleştirilmiştir. Beton döküm işlemi ise üç adımda uygulanmıştır. Birinci adımda katı malzeme olan yüksek fırın cürufu, metakaolin ve atık mermer tozu 3 dakika betoniye karıştırılmıştır. Daha sonra ikinci adımda alkali aktivatörler sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışıma eklenerek 2 dakika daha karıştırılmıştır. Üçüncü ve son adımda ise lifler karışıma eklenerek 2 dakika daha karıştırılmıştır. Karışımların işlenebilirlikleri ise yaş betondan alınan örneklere slump deneyi uygulanarak tespit edilmiştir. Cam lifli geopolimer beton karışımının slump değeri 215 mm olarak ölçülmesine karşın bazalt lifli karışımın slump değeri 150 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere geopolimer karışımına bazalt lif eklenmesi işlenebilirliği

önemli ölçüde düşürmüştür. Bununlar birlikte işlenebilirliğin düşmesinden dolayı betonun kalıplara yerleştirilmesi de cam lifli numunelere göre daha zor olmuştur.



Şekil 8. Beton döküm aşaması

Beton dökümü aşamasında karışımların mekanik özelliklerinin tespiti için de örnek numuneler alınmıştır. TS 1247 (2018) standardına uygun olmak üzere, basınç dayanımının tespiti için 150x150x150 mm boyutlarında altı adet küp numune, yarmada çekme dayanımının tespiti için altı adet 200x100 mm boyutlarında silindir numune ve eğilme dayanımının tespiti için de altı adet 70x70x280 mm boyutlarında prizma numuneler alınmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti için alınan numunelerden üç âdeti pull-out deneylerinin gerçekleştirildiği gün, üç âdeti ise 28 gün sonra ilgili deneylere tabi tutulmuştur. Basınç dayanımının tespiti TS 12390 (2019) standardına, yarmada çekme dayanımının tespiti TS 12390-6 (2024) standardına ve eğilme dayanımının tespiti de TS 12390-5 (2019) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Böylece geopolimer betonlu numunelerin hem 7 günlük hem de 28 günlük sonuçlarının karşılaştırılması sunulmak amaçlanmıştır.

Çalışma kapsamında her bir numuneden üç adet olmak üzere toplam 270 adet 150x150x150 mm boyutlarında küp numune üretilmiştir. Numuneler cam lifli ve bazalt lifli karışımlar olmak üzere iki ana gruba ayrılmıştır. Her bir gruptan 135 adet küp numune üretilmiştir. Beton dökümünden önce hazırlanan küp numunelerin bir bölümü **Şekil 9’ da** sunulmuştur. Kalıp işlemleri için küp şeklinde plastik numuneler kullanılmıştır. Donatıların küp numunelerde yerleştirilmesi ve beton işlemleri sırasında konumlarının zarar görmemesi için demir tel ile sabitlenmişlerdir. Çalışma kapsamında donatılar, ilerleyen bölümde daha ayrıntılı açıklandığı üzere, küp numunelere üç farklı şekilde yerleştirilmiştir. Dolayısıyla donatıların konumlarının değişmemesi için demir tel ile plastik kalıplara sabitlenmişlerdir.

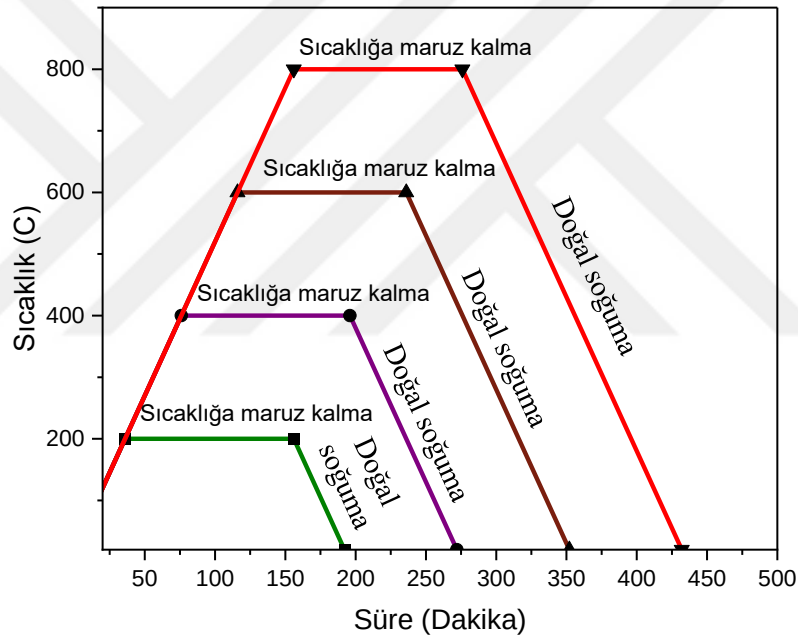


Şekil 9. Beton dökümü için hazırlanan numuneler

Beton döküm aşamasından sonra numunelere laboratuvar ortamında hava kürü uygulanmıştır. Beton döküm aşamasından sonra numuneler yaklaşık 12 saat kalıplarda bekletilmiştir. Kalıplardan çıkarılan numunelere hava kürü uygulanmaya başlanmıştır. Tüm numunelere 7 günlük hava kürü uygulanmıştır. Geleneksel betonda 28 günlük bekleme süresi bu çalışmada geopolimer beton kullanılarak 7 güne indirilmiştir. Böylece geopolimer betonun erken yüksek dayanımı özelliğinden faydalanılmak amaçlanmıştır. Literatürde ulaşılan çalışmalarda (Kong and Sanjayan 2008; Zhang *et al.* 2014; Bayrak *et al.* 2023c) geopolimer betonun hızlı geopolimerizasyon sürecinden dolayı dayanımını erken sürede kazandığı görülmektedir. Bu sebepten dolayı da geopolimer betonundan üretilen hem cam hem de bazalt lifli numuneler üretildikten 7 gün sonra pull-put deneyine tabi tutulmuştur.

Numunelere yüksek sıcaklık uygulanması için elektrikli fırın kullanılmıştır. Numunelere uygulanan hedef sıcaklıklar 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C olarak belirlenmiştir. Bu değerler belirlenirken sunulan tez çalışmasından elde edilen verilerin literatürdeki veriler ile karşılaştırılmasında kolaylık olması göz önünde bulundurulmuştur.

Ulaşılan literatürde gerek geopolimer beton gerekse de geleneksel betonda yüksek sıcaklık etkisi genel olarak bu sıcaklık değerlerinde ele alınmıştır. Diğer yandan betonun içyapısına zarar verebilecek sıcaklık değerleri de göz önüne alınmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler 12 saat kalıpta bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmıştır. Ardından bu numuneler hedef sıcaklıklarına göre gruplara ayrılmıştır. Hedef yüksek sıcaklığa dakikada 2 °C artacak şekilde fırında bekletilerek ulaşılmıştır. Bu artış değerine de literatürde ulaşılan çalışmalar ışığında karar verilmiştir (Behnood and Ziari 2008; Ergün *et al.* 2016). Hedef sıcaklığa ulaşıldığında tüm numuneler fırında 120 dakika bekletilmiştir. Numunelere uygulanan yüksek sıcaklık protokolü şematik olarak **Şekil 10'** da sunulmuştur. Hedef sıcaklıkta 120 dakika yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler fırın kapatılarak doğal soğumaya bırakılmıştır. Soğuma işleminden sonra tüm numuneler deney gününe kadar laboratuvar ortamında herhangi bir işlem uygulanmadan bekletilmiştir.



Şekil 10. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelere uygulanan işlemlerin şematik gösterimi

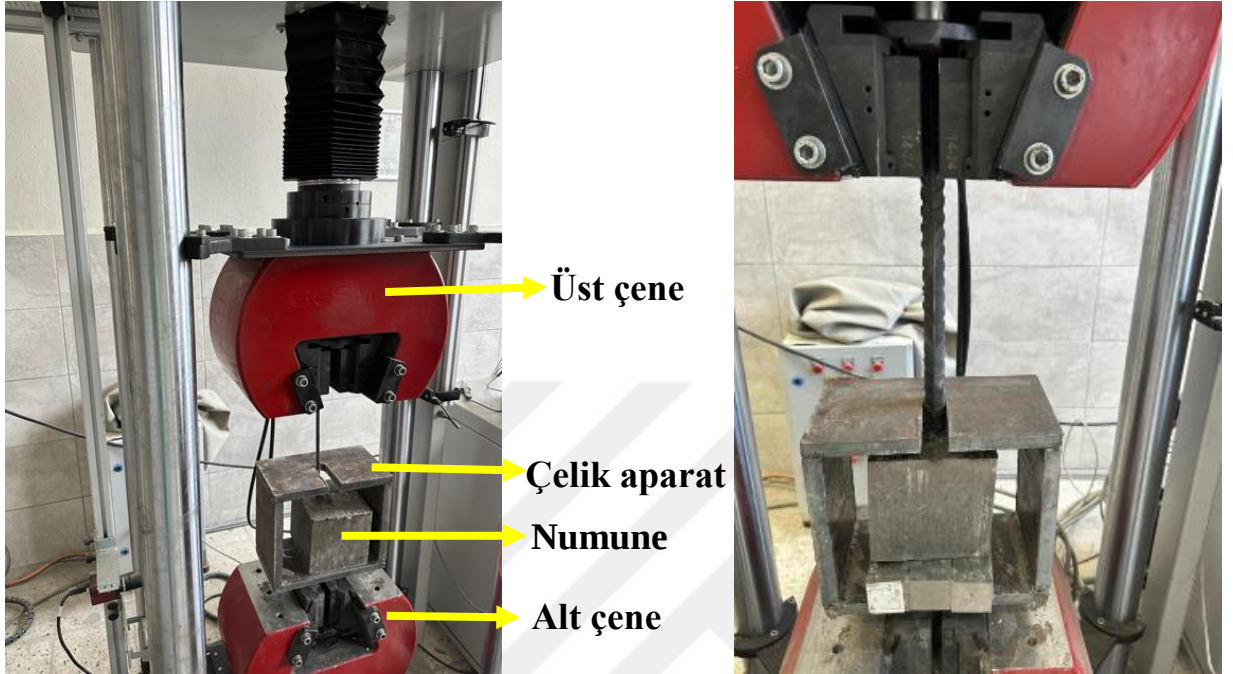
Tablo 11' de tez çalışması kapsamında ele alınan konunun irdelenmesi için dört ana parametre belirlenmiştir. Öncelikle lif türü olarak cam ve bazalt lifler belirlenmiştir. Cam ve bazalt liflerin tercih edilmesinde, bu lif türlerinin yüksek elastisite modülü, özellikle yüksek sıcaklık altındaki çalışmalarda literatürde en çok tercih edilen lif türü olmaları ve yüksek termal dirençlerinden dolayıdır. Cam lifli numuneler GC1, bazalt lifli numuneler ise GC2 olarak kodlanmıştır. Çalışmanın bir diğer parametresi de donatı çapı olarak belirlenmiştir. Ulaşılan literatürde donatı çapının aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Fakat literatürdeki bazı çalışmalarda (Zhu *et al.* 2004; Prince and Singh 2013; Issa and Assaad 2015; Sabău *et al.* 2016) donatı çapının artmasının aderans dayanımını

arttırdığını belirtmesine karşın bazı çalışmalarda (Sarker 2011; Looney *et al.* 2012; Singh *et al.* 2015) ise donatı çapının artmasının aderans dayanımını azalttığı belirtilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada da donatı çapının lifli geopolimer betonda aderans dayanımına ne yönde (azaltıcı mı, arttırıcı mı) ve hangi oranda etki edeceği hipotez sorusunun cevabı aranmıştır. Donatı çapı olarak gerek literatürde gerekse de inşaat uygulamalarında en çok tercih edilen 8 mm, 16 mm ve 24 mm çaplı donatılar tercih edilmiştir. Bir diğer ana parametre olarak da yüksek sıcaklık etkisi tercih edilmiştir. Numuneler 200°C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C olarak belirlenmiştir. Çalışmada seçilen bir diğer parametre ise literatürde üzerinde çok fazla durulmayan bir parametre olan donatının numune üzerindeki konumudur. Bu parametre literatürde pas payı etkisi olarak ele alınmıştır. Fakat pas payı olarak ele alınan çalışmalarda ise pas payının değiştirilmesi durumunda donatı ile pas payı arasındaki mesafe aynı miktarda değişmektedir. Bu çalışmada ise **Şekil 11'** de gösterilen donatı konumları kullanılarak konu farklı bir şekilde ele alınmıştır. Merkez konumda kullanılan donatı C harfi ile adlandırılmıştır. Bu gruptaki donatılar şekilden de görüldüğü üzere donatının nervürleri 90° derece yönünde konumlandırılmıştır. Ayrıca bu gruptaki donatıların küpün kenarlarına uzaklığı her yönden 75 mm' dir. Diğer gruptaki numuneler ise küpün alt orta noktasına konumlandırılmıştır. Bu donatılarda nervür yönü 90° olarak konumlandırılmış olup L0 ile kodlanmıştır. Bu gruptaki donatıların küpün kenarlarına olan mesafeleri sırasıyla 30 mm, 120 mm, 75 mm ve 75 mm' dir. Diğer gruptaki numuneler de küpün köşe noktasına konumlandırılmıştır. Bu gruptaki donatıların küpün kenar noktalarına uzaklıkları ise 30 mm, 120 mm, 30 mm ve 120 mm olup bu numuneler (L45) olarak kodlanmıştır. Görüldüğü üzere donatının küp numune üzerindeki konumları değiştirilerek aderans dayanımı üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

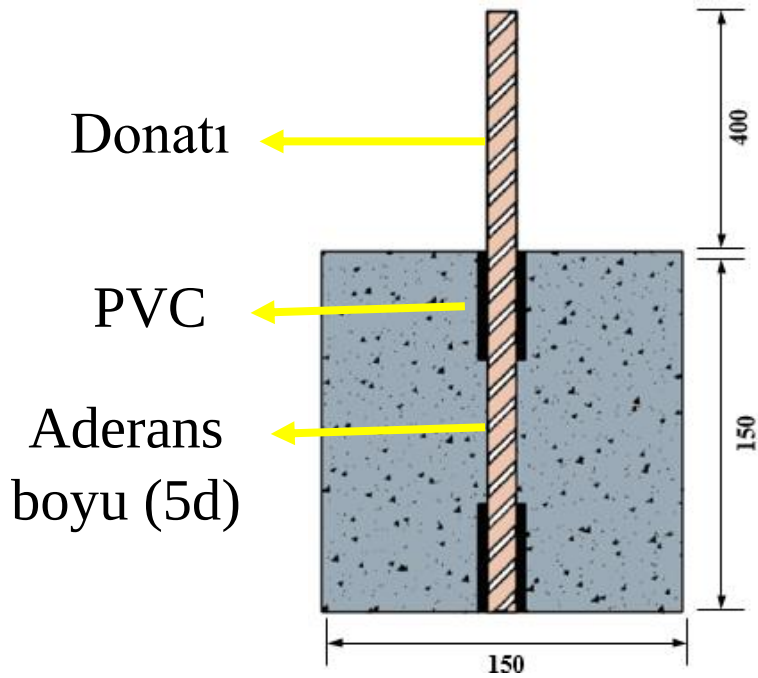
Tablo 11. Deney Parametreleri

Beton türü	Donatı çapı (mm)	Sıcaklık (°C)	Donatı konumu
Cam (GC1)	8	20	Merkez (C)
Bazalt (GC2)	16	200	Orta alt nokta (L0)
		400	Köşe (L45)
		600	
		800	

geri kalan bölümü PVC malzeme ile kaplanmıştır. Bu bölgenin beton ile teması böylece engellenmiş olmuştur. **Şekil 13**'de aderans boyu oluşturulan numunenin şematik gösterimi sunulmuştur. Tüm numunelerde donatı boyu, 150 mm betona gömülü ve 400 mm numunenin üst kısmında olmak üzere toplam 550 mm olacak şekilde bırakılmıştır.



Şekil 12. Deney düzeneği



Şekil 13. Deney numunesinin şematik gösterimi

Yöntem

Deney sonucunda elde edilen kuvvetin kullanılması ile aderans dayanımı Eşitlik (1)' e göre hesaplanmıştır. Eşitlik 1' de τ , aderans dayanımını (MPa); F, uygulanan kuvveti (kN); d, aderans çapını (mm) ve L, aderans boyunu (5d) (mm) göstermektedir.

$$\tau = \frac{F}{(\pi d L)} \quad \text{Eşitlik (1)}$$

Yukarıda açıklanan malzeme özellikleri ve deney yöntemleri ışığında bu tez çalışmasının amacı lif türünün (cam ve bazalt lif), donatı çapının (8 mm, 16 mm ve 24 mm), yüksek sıcaklık etkisinin (20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) ve donatı konumunun (merkez, alt orta ve köşe) aderans dayanımı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda her bir numuneden üç adet olmak üzere toplam 270 adet 150x150x150 mm boyutlarında küp numunelere pull-out testi uygulanmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında lif türünün, donatı çapının, yüksek sıcaklığın ve donatı konumunun aderans dayanımına etkisi ayrı ayrı ele alınarak irdelenmiştir. Ayrıca numunelerin göçme modları da ele alınarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte tüm numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri çizilmiş olup sonuçlar ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA bölümünde detaylı olarak ele alınmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Araştırma Bulguları ve Tartışma başlığında pull-out testleri uygulanan cam ve bazalt lifli numunelerden elde edilen veriler ışığında aderans davranışları ele alınmıştır. Öncelikle tüm numunelerden elde edilen sonuçlar sunulmuş olup genel olarak sonuçların bir değerlendirmesi yapılmıştır. Daha sonra deneylerden elde edilen aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri tüm numuneler için çizilmiş olup bu grafiklerin değerlendirmesi yapılmıştır. İlerleyen bölümlerde de deney parametrelerinin aderans dayanımına etkisi değerlendirilmiştir. Deney parametresi olarak belirlenen lif türünün, donatı çapının, yüksek sıcaklık etkisinin ve donatı konumunun aderans dayanımı üzerindeki etkileri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu bölümlerde numunelerin maksimum aderans dayanımları ve bir birlerine göre dayanım kayıpları değerlendirilmiştir. Son olarak ise numunelerin pull-out deneyinden sonraki resimleri sunularak göçme modları üzerinde durulmuştur. Deney parametrelerinin göçme modları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Fakat aderans performansının değerlendirilmesine geçilmeden önce beton döküm aşamasında geopolimer betonun mekanik özelliklerinin tespiti için alınan numunelerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık altındaki numunelerin 7 ve 28 günlük basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları irdelenmiştir. İki farklı lif türüne ait mekanik özellikler ilk başta sunularak ilerleyen bölümlerdeki aderans performansının değerlendirmesine yardımcı olması amaçlanmıştır.

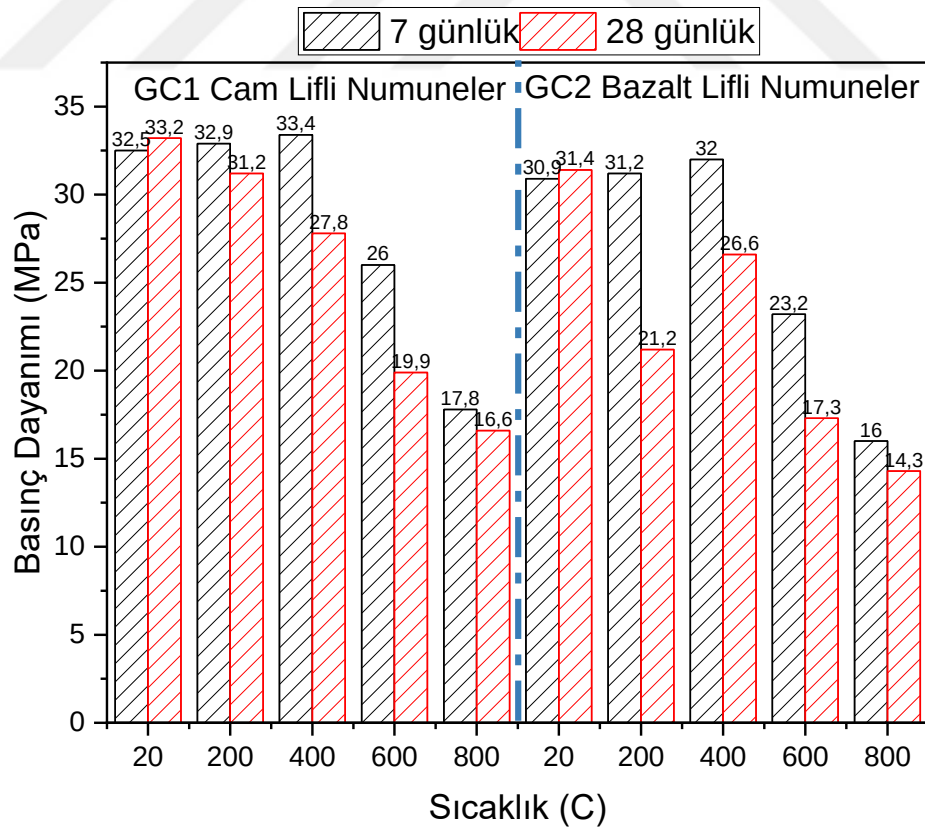
Bazalt ve Cam Lifli Geopolimer Betonların Mekanik Özellikleri

Bazalt ve cam lifli numunelerin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Numunelerin hem deney günü (7 günlük) hem de 28 günlük sonuçları tespit edilmiştir. Böylece tez çalışmasından elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmasının okuyucular açısından kolaylaştırılması amaçlanmıştır. **Tablo 12'** de 7 günlük ve 28 günlük dayanım sonuçları sunulmuştur. **Tablo 12'** den de görüldüğü üzere hem oda sıcaklığındaki hem de yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin dayanım sonuçları sunulmuştur.

Tablo 12. Oda Sıcaklığındaki ve Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Numunelerin 7 ile 28 Günlük Basınç, Yarmada Çekme ve Eğilme Dayanım Sonuçları

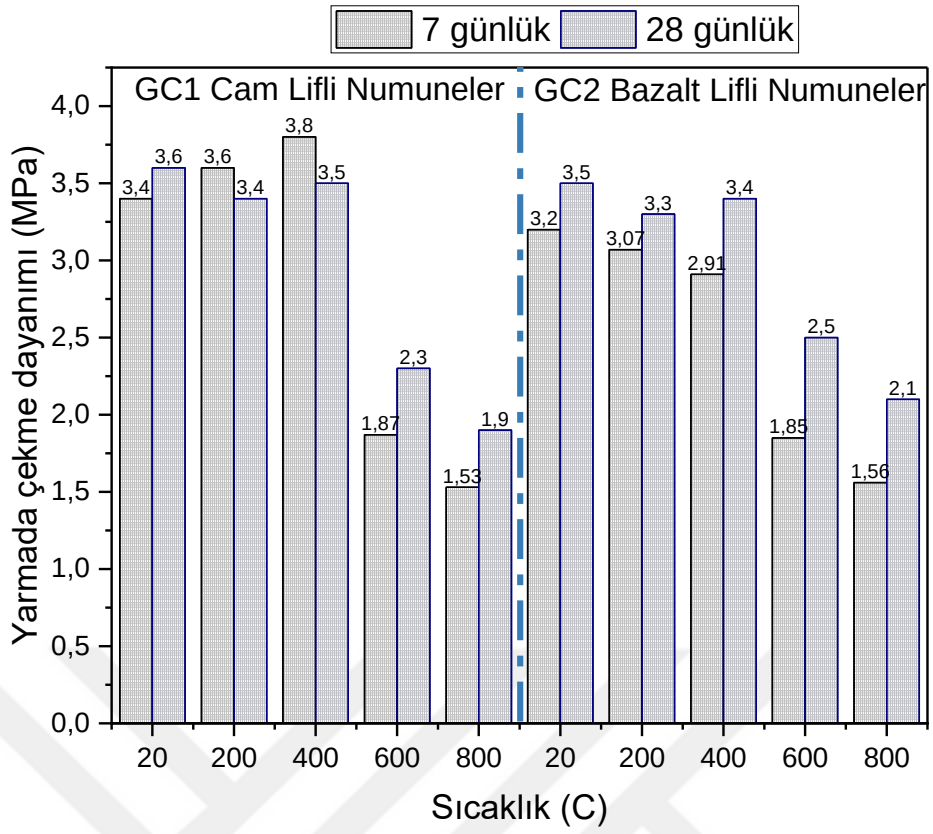
Beton türü	Sıcaklık (°C)	7 günlük			28 günlük		
		Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı	Basınç dayanımı	Yarmada çekme dayanımı	Eğilme dayanımı
		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
GC1*	20	32,5	3,40	8,1	33,2	3,6	8,5
	200	32,9	3,60	7,7	31,2	3,4	8,1
	400	33,4	3,80	7,3	27,8	3,5	8,6
	600	26,0	1,87	4,8	19,9	2,3	4,4
	800	17,8	1,53	3,6	16,6	1,9	3,8
GC2**	20	30,9	3,20	8,5	31,4	3,5	8,8
	200	31,2	3,07	8,1	21,2	3,3	8,6
	400	32,0	2,91	7,8	26,6	3,4	8,7
	600	23,2	1,85	5,5	17,3	2,5	5,4
	800	16,0	1,56	4,8	14,3	2,1	4,4

*Cam lifli karışım; **Bazalt lifli karışım

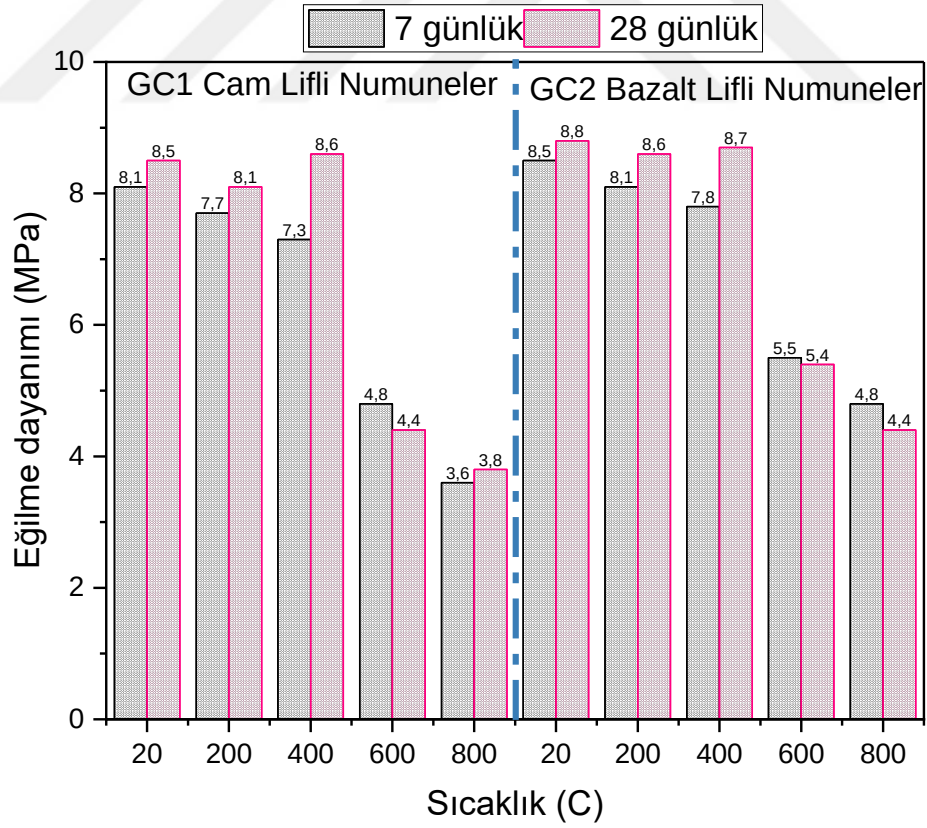


(a)

Şekil 14. Bazalt ve cam lifli geopolimer numunelerin 7 ve 28 günlük dayanımları (a) Basınç dayanımı (b) Yarmada çekme dayanımı (c) Eğilme dayanımı



(b)



(c)

Şekil 14. Bazalt ve cam lifli geopolimer numunelerin 7 ve 28 günlük dayanımları (a) Basınç dayanımı (b) Yarmada çekme dayanımı (c) Eğilme dayanımı (Devamı)

Öncelikle oda sıcaklığında kür edilen cam ve bazalt lifli karışımların basınç dayanımları bir birlerine oldukça yakındır. Cam lif kullanılan karışım bazalt lifli karışıma göre sadece %5 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bu durumun nedeni karışımda kullanılan cam ve bazalt liflerin mekanik özelliklerinin bir birlerine yakın olmasıdır. Örneğin cam liflerin çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 4135 MPa ve 85 GPa olmasına karşın bazalt liflerin çekme dayanımı ve elastisite modülü sırasıyla 4840 MPa ve 89 GPa'dır. Numunelerin sıcaklığının 200 °C ve 400°C'ye çıkarılması 7 günlük basınç dayanımları üzerinde arttırıcı yönde etkili olmuştur. Cam lifli numunelerde sıcaklığının 20°C'den 200 °C ve 400°C'ye çıkarılması durumunda 7 günlük basınç dayanımlarını sırasıyla %1,20 ve %2,76 oranlarında arttırmıştır. Benzer şekilde bazalt lifli numunelerde de sıcaklığın 200 °C ve 400°C'ye maruz bırakılması durumunda 7 günlük basınç dayanımları sırasıyla %0,97 ve %3,55 oranlarında arttırmıştır. Bu durumun nedeni geopolimer matris içerisindeki alüminosilikat malzemelerin alkali aktivatörlerle tepkimeye girmesi aşamasında geopolimerizasyon süreci meydana gelmektedir. Geopolimerizasyon sürecinde ise üç boyutlu polimerik ağlar meydana gelmiştir. Kür sıcaklığının artması (200 °C ve 400 °C) durumunda karışımda kullanılan yüksek fırın cürufu ve metakaolin malzemelerinin kimyasal reaksiyona girme ve geopolimerizasyon süreci de daha etkili ve hızlı bir şekilde meydana gelmiştir. Bu süreç sonucunda da numunelerin basınç dayanımlarında artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca bu süreçte cam ve bazalt liflerin matrise bağlanmasını iyileştirmiştir. Diğer bir değişle cam ve bazalt lifler ile matris arasındaki ara yüzün daha sağlam olmasına neden olmuştur. Bir diğer neden ise 200 °C ve 400 °C yüksek sıcaklık değerlerinde geopolimer matrisi içerisindeki gözenekliliğin azalması ve buna bağlı olarak da mikro yapının iyileşmesi olmuştur. Böylece matris içerisindeki kusursuzluk oranı azalmış olup daha sağlam mikro yapı ise 200 °C ve 400°C'de kür edilen numunelerin basınç dayanımında artışa neden olmuştur. Yüksek sıcaklık altındaki basınç dayanımındaki artışa alkali aktivatörler de neden olmuş olabilir. Karışımda alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksitin 200 °C ve 400 °C yüksek sıcaklıkta reaktivitesi daha yüksek olmuştur. Bu sıcaklık değerlerinde ise sodyum silika ve sodyum hidroksitin artan reaktivitesinden dolayı basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. Basınç dayanımındaki artışa matriste kullanılan cam ve bazalt liflerin de etkili olduğu da söylenebilir. 200 °C ve 400 °C sıcaklık değerlerinde cam ve bazalt liflerin mekanik özelliklerinde önemli değişimler meydana gelmediği için özellikle köprüleme etkisi ile basınç dayanımında artışa neden olmuştur. Yüksek sıcaklıkta bazalt lifler, betonun yüksek sıcaklıklardaki performansını daha da artırarak, cam elyaflara kıyasla 400 °C' de basınç dayanımı artışına daha önemli katkıda bulunmuştur. Fakat sıcaklığının 600 °C ve 800°C'ye çıkarılması durumunda basınç dayanımlarında ciddi azalmalar meydana gelmiştir. Hem cam lif hem de bazalt lif katkılı geopolimer numunelerin mekanik özelliklerinde yüksek

sıcaklık etkisinden dolayı önemli azalmalar meydana gelmiştir. Cam lifli numunelerde kür sıcaklığının 600 °C ve 800 °C'ye çıkarılması 7 günlük basınç dayanımını sırasıyla %20 ve %45,2 oranında azalmasına neden olmuştur. Bazalt lif katkılı geopolimer numunelerde ise yüksek sıcaklık etkisinde 7 günlük basınç dayanımları sırasıyla %24,9 ve %48,2 oranlarında azalmıştır. 600 °C ve özellikle 800 °C sıcaklık değerlerinde cam ve bazalt liflerin geopolimerin iç yapısının bozulmasından dolayı liflerin bu sıcaklık değerlerinde etkinliği fazla olmamıştır. Bu sebepten dolayı da 600 °C ve 800 °C sıcaklık değerlerinde önemli dayanım kayıpları gözlemlenmiştir. Öncelikle dayanımdaki bu azalışa bu yüksek sıcaklıkta matris içerisindeki malzemelerde bozulmalar meydana gelmiştir. Bu bozulmalardan dolayı da dayanımda azalmalar gözlemlenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklık değerlerinde matriste mikro çatlakların meydana gelmesi dayanımda azalmaya neden olmuştur. Geopolimer matris fazının ve matristeki liflerin farklı termal genleşmeye sahip olmasından dolayı bu farklılıktan matris ile lifler arasında mikro çatlaklar meydana gelmiştir. Bu mikro çatlaklar da yük altında dayanımın azalmasına neden olmuştur. Literatüre bakıldığı zaman Wang et al. (2020) cam lifli numunelerin 400°C'ye kadar sıcaklığa maruz kalmasına durumunda basınç dayanımının arttığını fakat daha yüksek sıcaklıklarda ise basınç dayanımında azalmaların meydana geldiğini belirtmiştir. Ziada et al. (2021) bazalt lifli geopolimer üzerinde yürütmüş oldukları çalışmada %1,2 oranında bazalt lif eklenmesi durumunda ve sıcaklık kürü uygulandığında basınç dayanımında %18'e varan dayanım artışının olduğunu belirtmişlerdir. Fakat sunulan çalışmada dayanım artışları %2 seviyelerinde kalmıştır. Burada çalışmalarda kullanılan diğer parametrelerin etkili olduğu düşünülmektedir. Haido et al. (2021) ise kendiliğinden yerleşen geopolimer betonlarda yüksek sıcaklığa maruz kalınmasının basınç dayanımını azalttığını belirtmiştir. Çalışmada 500 °C sıcaklığa maruz kalınması durumunda basınç dayanımının %20 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Fakat sunulan çalışmada geopolimer betona cam veya bazalt lif eklenmesinin 400 °C sıcaklığa kadar basınç dayanımında artışa neden olduğu sonucuna varılmıştır. Tayeh et al. (2021) geopolimer betonda özellikle 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kalınması durumunda basınç dayanımında önemli dayanım kayıplarının olduğunu belirtmiştir. Böylece sunulan çalışma ile bu alandaki diğer çalışmalar arasındaki farklılıklar ve paralel bulgular üzerinde durulmuştur.

Geopolimer numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları ile 28 günlük basınç dayanımları bir birlerine oldukça yakındır. **Tablo 13'** de 7 ile 28 günlük basınç dayanımı karşılaştırmaları sunulmuştur. Ortam kürüne maruz kalan numunelerin basınç dayanımları bir birleri ile oldukça yakın çıkmıştır. Hem cam lifli hem de bazalt lifli numuneler 7 günde 28 günlük basınç dayanımının hemen hemen hepsini kazanmıştır. Bu durumun nedenine geopolimer karışımdaki gerek bağlayıcıların gerekse de alkali aktivatörlerin hızlı bir şekilde

geopolimerizasyon süreci geçirmeleridir. Geopolimer betonun bu erken yüksek dayanım özelliğinden faydalanmak için de aderans deneyleri numuneler üretildikten 7 gün sonra uygulanmıştır. Ayrıca geopolimer beton karışımında bağlayıcı olarak kullanılan hem yüksek fırın cürufu hem de metakaolinin bir biri ile etkileşimin oldukça uyumlu olmuştur. Sıcaklık kürü uygulanan numunelerin ise 7 ve 28 günlük dayanımları arasında ortam kürüne göre farklı bir uyum gözlemlenmiştir. 200°C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklık kürü uygulanan numunelerin 7 günlük basınç dayanımı 28 günlük basınç dayanımından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Arslan et al. (2019) geopolimer betonlarda yürütmüş oldukları deneysel çalışma sonucunda, numunelerin 7 günlük zamanda 28 günlük basınç dayanımlarına oldukça yakın olduğunu belirtmişlerdir. Nematollahi et al. (2019) da geopolimer beton numunelerinin 7 ile 28 günlük basınç dayanımlarının bir birleri ile yakın olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 13. 7 ile 28 Günlük Basınç Dayanımı Karşılaştırması

Beton türü	Sıcaklık (°C)	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	28 GBD/7 GBD
GC1	20	32,5	33,2	1,02
	200	32,9	31,2	0,94
	400	33,4	27,8	0,83
	600	26,0	19,9	0,76
	800	17,8	16,6	0,93
GC2	20	30,9	31,4	1,02
	200	31,2	21,2	0,68
	400	32,0	26,6	0,83
	600	23,2	17,3	0,74
	800	16,0	14,3	0,89

Aderans Dayanımı-Sıyrılma Grafikleri

Aderans testleri uygulanan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma ilişkisi bu bölümde ele alınmış olup numunelerin grafikleri çizilmiştir. **Şekil 15, 16 ve 17’ de** cam lifli **Şekil 18, 19 ve 20’ de** ise bazalt lifli numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. Her numuneden üçer adet üretildiğin daha önce bahsedilmişti. Aderans dayanımı-sıyrılma grafiklerinde ise grafiklerin daha anlaşılabilir olması ve yoğun bir grafik alanından uzaklaşıp okuyucuların daha net olarak sonuçları değerlendirebilmesi için her numuneden ortalamaya en yakın olan numunenin grafiği sunulmuştur. Grafiklerde x eksenine sıyrılma, y eksenine ise aderans dayanımı değerleri yerleştirilmiştir. Sıyrılma değerleri çekip-çıkarma testlerinde

donatının sıyrılma miktarı esas alınarak çizilmiştir. Aderans dayanımı değeri ise **Eşitlik 1'** e göre hesaplanmıştır. Ayrıca aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri, numunelerin özelliklerine göre kendi aralarında gruplandırılmıştır. Öncelikle grafikler cam ve bazalt lifli olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Daha sonra numunelerde kullanılan donatı çapına göre sınıflandırılmıştır. Son olarak ise numunelerin maruz kaldığı sıcaklık değerleri dikkate alınmıştır. Böylece sunulan grafiklerin karşılaştırılmasının daha sade ve anlaşılabilir olması amaçlanmıştır.

Hem cam hem de bazalt lifli numunelerinden elde edilen aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri literatürde ulaşılan aderans çalışmalarındaki (Zhang et al. (2018); Mark et al. (2019); Ba et al. (2021); Yuan and Bing (2021)) grafikler ile paralellik göstermektedir. Grafiklerden görüldüğü üzere deney parametrelerinin grafikler yani aderans davranışları üzerinde etkilerinin olduğu görülmektedir. Grafiklerde gözlemlenen genel davranış ise öncelikle numunelerde lineer bölgede doğrusal bir davranış görülmektedir. Daha sonra bu lineer bölgenin sonunda parabol bir grafik gözlemlenmiştir. Maksimum aderans dayanımına ulaşan numunelerde sıyrılma miktarı artmasına rağmen aderans dayanımında azalmalar meydana gelmiştir.

Şekil 15.a'da cam lifli ve 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere donatı konumunun aderans davranışı üzerinde oldukça önemli bir etkisi vardır. Bunların birlikte GFQ8T20LC ile GFQ8T20L0 numunelerinin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri klasik donatı çekme deneyindeki gibidir. Bu numunelerde özellikle GFQ8T20LC numunesinde donatı beton matrisinden sıyrılırken akma göstermiştir. Bu da donatı ile beton matrisi arasındaki mekanik yapışmanın oldukça güçlü olduğunu göstermektedir. **Şekil 15.b'** de ise 200°C'de sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri görülmektedir. Grafikteki üç numune de klasik donatı çekme testindeki gibi akma bölgesinin oluştuğu görülmektedir. GFQ8T200LC, GFQ8T200L0 ve GFQ8T200L45 numunelerinin donatı ile beton fazı arasındaki aderans dayanımı oldukça güçlüdür. Bu numunelerde aderans deneyi sırasında donatının beton matrisinden sıyrılması esnasında beton fazı donatının sıyrılmasını oldukça zorlaştırmıştır. Hatta donatılar akma davranışı gösterdikten sonra göçme moduna ulaşmışlardır. Bu davranışın nedeninin 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç ve çekme dayanımlarındaki iyileşmenin neden olduğu düşünülmektedir. Beton fazındaki artan mekanik özellikler donatı ile oldukça güçlü bir yapışma göstermiştir. Aderans dayanımındaki artış ayrıca numunelerin sıyrılma kapasiteleri üzerinde de etkili olmuştur. 200 °C sıcaklığa maruz numunelerin sıyrılma miktarları 20 °C ortam kürüne maruz kalan numunelerden daha fazladır. **Şekil 15.c'** de 400 °C yüksek sıcaklığa maruz numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde belirgin bir akma bölgesinin oluşmadığı görülmektedir. GFQ8T400LC, GFQ8T400L0 ve

GFQ8T400L45 numunelerinin sıyrılma kapasiteleri oldukça düşüktür. Hata **Şekil 15.d'** de 600 °C sıcaklığa maruz numunelerin grafikleri ile karşılaştırıldığında 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımları yüksek olmasına rağmen sıyrılma kapasiteleri daha düşüktür. Bu durum ise 400 °C sıcaklığa maruz numunelerde beton fazının yapışma yeteneğinin daha yüksek olduğunu fakat bu yapışmanın donatının akma yapmasına neden olacak kadar da güçlü olmadığını göstermektedir. **Şekil 15.c'** de donatı konumunun davranış üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu görülmektedir. Fakat **Şekil 15.d'** de donatı konumunun davranış üzerinde aynı şekilde etki etmediği görülmektedir. Bu da özellikle 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatı konumunun davranış üzerinde etkili olmasına sıra gelmeden numuneler göçme moduna ulaştığını göstermektedir. Buna rağmen 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatının merkeze konumlandırılmasının aderans dayanımını arttırdığını göstermektedir. **Şekil 15.e'** de 800 °C maruz kalan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatı konumunun az da olsa bir etkisinin olduğu (özellikle GFQ8T600LC numunesi için) görülmesi ile birlikte 800 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatı konumunun oldukça az bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. 800 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise GFQ8T800L45 numunesinin grafiği diğer iki numuneye göre farklılık göstermiştir. Köşe noktasına konumlandırılan bu numunenin aderans dayanımı ve sıyrılma kapasitesi diğer iki numune ile karşılaştırıldığında az da olsa düşük kaldığı görülmektedir. Camlı lifli numunelerden üretilen ve 8 mm çaplı donatılı numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri genel olarak değerlendirildiğinde 20 °C ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatı konumunun etkili olduğu görülmesine rağmen 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise donatı konumunun etkisinin daha az olduğu görülmektedir. Bu durumda özellikle yüksek sıcaklıklarda beton fazının mekanik özelliklerinin zarar gördüğü ve bu neden dolayı da donatı ile beton arasındaki yapışma yeteneğinin oldukça düşük kaldığını göstermektedir. Böylece bu numunelerde donatı konumunun etkisi görülmeden göçme moduna ulaşılmıştır.

Şekil 16.a' da 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. Grafikten anlaşılağı üzere donatı konumunun davranış üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. 8 mm çaplı numunelerde benzer şekilde donatının merkeze konumlandırıldığı GFQ16T20C numunesinin aderans dayanımı diğer numunelerde daha yüksektir. Bu grupta özellikle donatının köşeye konumlandırıldığı GFQ16T20L45 numunesinin aderans dayanımı ve sıyrılma kapasitesi diğer iki numuneye göre daha sınırlıdır. **Şekil 16.b'** de 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin davranışı görülmektedir. Bu numuneler arasında da donatı konumunun davranış üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. 8 mm çaplı numunelerde olduğu gibi 16 mm çaplı numunelerde de 200 °C sıcaklığa maruz kalan beton fazındaki artışlar

davranışa yansımıştır. GFQ16T200LC ve GFQ16T200L0 numunelerinde sıyrılma kapasitesi ise oldukça sınırlı olmuştur. Bu numunelerde göçme donatının beton fazından sıyrılması kısa bir süre içerisinde meydana gelmiştir. **Şekil 16.c'** de 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. Bu numunelerin grafiklerinde sıçramalar görülmektedir. Bu sıçramaların nedeni donatının beton fazından sıyrılması aşamasında dayanım kayıpları meydana gelmesine rağmen beton fazının daha sonra sıyrılmayı zorlaştırılmasından kaynaklanmaktadır. Bu numunelerde de donatı konumunun davranış üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. **Şekil 16.d'** de ise 600 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri görülmektedir. 8 mm çaplı donatılarda da benzer şekilde maruz kalınan sıcaklığın artması durumunda donatı konumunun davranış üzerindeki etkisi azalmıştır. Hatta bu grafikte numunelerinin davranışlarının bir birlerine benzer olduğu görülmektedir. **Şekil 16.e'** de 800 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri görülmektedir. Grafikten görüldüğü üzere bu yüksek sıcaklık değerinde donatı konumunun aderans davranışı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Hatta GFQ16T800L0 ve GFQ16T800L45 numunelerinin aderans davranışlarının bir birlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu numuneler arasında donatının merkeze konumlandırıldığı GFQ16T800L numunesini davranışı diğer numunelere göre az da olsa farklılık göstermiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan 16 mm çaplı numunelerde donatıda akma gözlemlenmemiştir.

Şekil 17.a' da 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri görülmektedir. Bu numunelerde donatıda akma gerçekleşmemiştir. Bununla birlikte donatı konumunun aderans davranışı üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. **Şekil 17.b'** de 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin davranışı görülmektedir. Bu numunelerde de donatıda akmanın gerçekleşmediği görülmektedir. 8 mm çaplı donatılar ile kıyaslandığında 16 mm ve 24 mm çaplı donatılarda akma gerçekleşmemiştir. Hem 20 °C hem de 200 °C sıcaklıktaki numunelerde donatının köşeye konumlandırıldığı GFQ24T20L45 ve GFQ24T200L45 numunelerinin aderans dayanımları daha fazladır. Bununla birlikte 200 °C sıcaklığa maruz numunelerin de sıyrılma kapasiteleri sınırlı düzeyde kalmıştır. **Şekil C.c'** de 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri sunulmuştur. 400 °C sıcaklık değerinde özellikle GFQ24T400L45 numunesinin grafiğinde

sıçramalar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Benzer durum Baena et al. (2009) çalışmasında da görülmektedir. Bu çalışmada da bazı numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafiklerinde sıçramalar olduğu belirtilmiştir. Bu numuneler arasında ise merkeze konumlandırılan numunenin aderans dayanımının diğer numunelere göre daha fazla olduğu

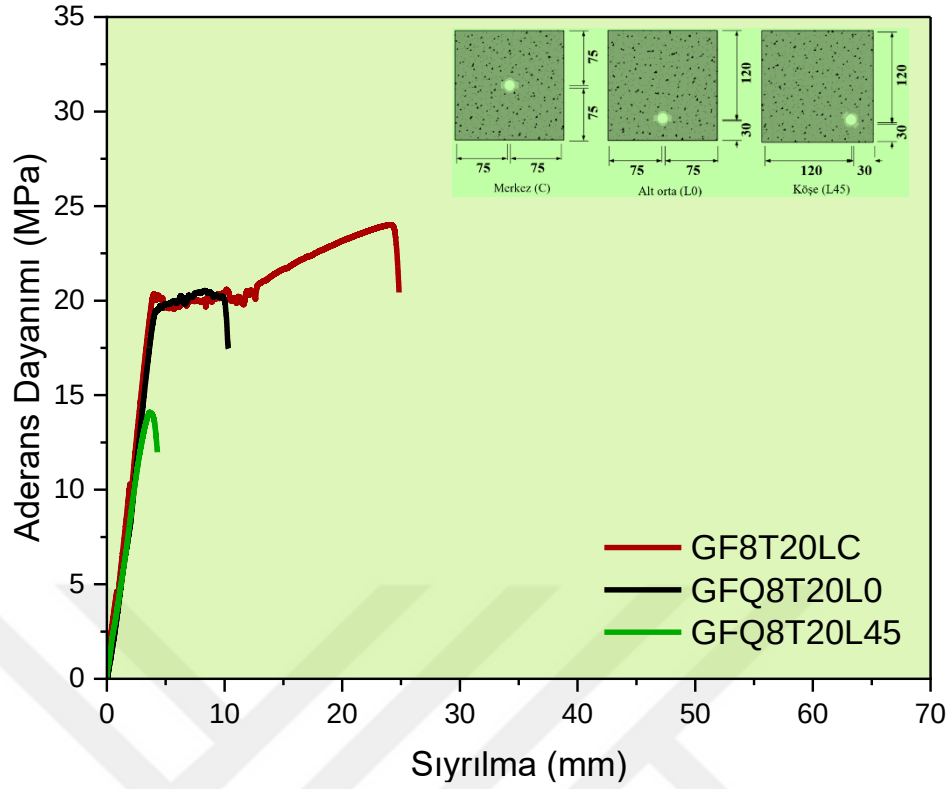
görülmektedir. 20 °C ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde gözlemlendiği gibi 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin donatılarında da akma gerçekleşmemiştir. Bu numuneler arasında yine donatının merkeze konumlandırıldığı numunede maksimum aderans dayanımına ulaşılmıştır. **Şekil 17.d ve e'** de 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin davranışları görülmektedir. 8 mm ve 16 mm çaplı numunelerde bu yüksek sıcaklık değerlerinde donatı konumunun önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bunun aksine 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde ise donatı konumunun davranış üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Şekil 18.a' da bazalt lifli, 8 mm çaplı ve ortam kürüne maruz kalan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma ilişkisi sunulmuştur. 20 °C ortam kürüne maruz kalan numunelerde sadece BFQ8T20Lc numunesinde donatıda akma meydana gelmiştir. **Şekil 18.b'** de 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafiklerinden görüldüğü üzere bu numuneler arasında da BFQ8T200LC numunesinde donatıda akma meydana gelmiştir. Diğer numunelerde ise donatıda akma meydana gelmemiştir. Cam lifli ve 8 mm çaplı numunelerde de benzer durum gözlemlenmiştir. Cam lifli numunelerde 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin üçünde de donatıda akma gerçekleşmiştir. Fakat bazalt lifli numunelerde hem 20 °C hem de 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında sadece donatının merkeze konumlandırıldığı numunelerde donatıda akma olmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere cam lifli numunelerde donatının köşe ve kenar noktalarına konumlandırılan numunelerde beklenen aderans dayanım azalması cam liflerin mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklıktaki davranışları ile tolere edilebilmiştir. Fakat bazalt liflerde aynı durum meydana gelmemiştir. **Şekil 18.c'** de 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. Bu numuneler arasında dikkat çeken nokta ise BFQ8T400LC numunesinde donatıda akma gerçekleşmesidir. Bu durum cam lifli numunelerde gözlemlenmemiştir. 400 °C sıcaklıkta bazalt liflerin beton matrisi ile yapışması ve matris içerisinde cam lifler kadar erimemiş olmasının bu durum üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Bazalt liflerin cam liflere göre sıcaklık limitlerinin de daha yüksek olması bu durumun nedenlerinden bir tanesidir. 400 °C sıcaklığa maruz kalan diğer numunelerde ise ciddi aderans dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Bazalt liflerin bu sıcaklık değerlerinde donatının konumundan kaynaklanan aderans dayanım kayıplarını tolere edememiştir. **Şekil 18.d ve Şekil 18.e'** de sırasıyla 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin aderans davranışları sunulmuştur. Bu numunelerde de beklenildiği üzere aderans dayanımlarında ve sıyrılma kapasitelerinde ciddi azalmalar meydana gelmiştir. Fakat bu numuneler arasında donatı konumunun davranış üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Benzer durum ise cam lif kullanılan 8 mm çaplı donatılarda gözlemlenmemiştir. Özellikle 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalan cam lifli numunelerde donatı konumunun davranış üzerinde

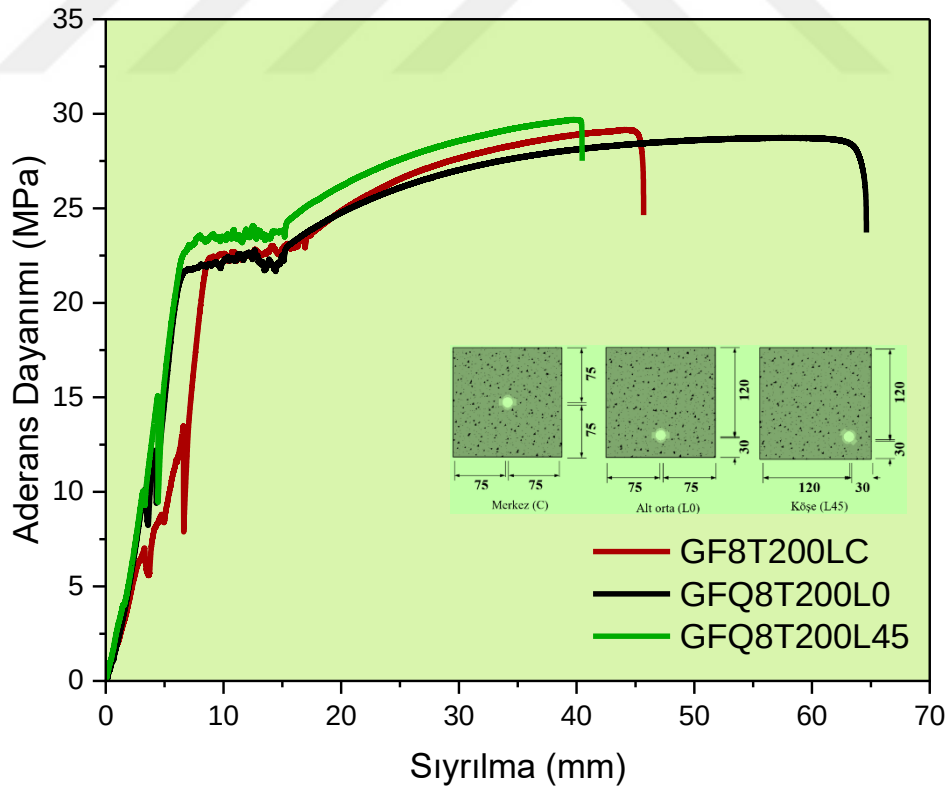
önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Aynı yüksek sıcaklık değerlerine maruz kalan bazalt lifli numuneler arasında ise donatı konumunun davranış üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Şekil 19.a' da 16 mm çaplı ve 20 °C ortam kürüne maruz kalan numunelerin aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri sunulmuştur. Bu numunelerde donatıda akma meydana gelmemiştir. 8 mm çaplı numunelerde olduğu gibi 16 mm çaplı numunelerde donatıda akma gerçekleşmemiştir. Burdan donatı çapının artmasının davranış üzerinde ne kadar önemli bir etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca bu numuneler arasında da donatı konumunun davranış üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. **Şekil 19.b'** de ise 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri görülmektedir. Bu numuneler arasında dikkat çeken nokta ise sıyrılma kapasitelerinin oldukça düşük olmasıdır. 200 °C sıcaklıkta beton fazının mekanik özelliklerinin iyileşmesine karşın sıyrılma miktarındaki sınırlama dikkat çekicidir. **Şekil 19.c'** de 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri görülmektedir. Bu numuneler arasında BFQ16T400L45 ve BFQ16T400LC numunelerinin grafiklerinde sıçramalar meydana gelmiştir. **Şekil 19.d** ve **Şekil 19.e'** de 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri sunulmuştur. Bu numuneler arasında donatı konumunun davranış üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Benzer özelliklerdeki cam lifli numunelerde bu yüksek sıcaklık değerlerinde donatı konumunun önemli bir etkisini olmamasına karşın bazalt lifli numunelerde donatının konumu davranış üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Şekil 20.a' da 24 mm çaplı ve 20 °C ortam kürüne maruz kalan numunelerin grafikleri sunulmuştur. 24 mm çaplı numunelerde 16 mm çaplı numunelerdekine benzer şekilde donatıda akma meydana gelmemiştir. Bu durum cam lifli numunelerde de gözlemlenmiştir. **Şekil 20.b'** de ise 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri görülmektedir. Bu numuneler arasında ise özellikle BFQ24T200LC ve BFQ24T200L0 numunelerinin davranışlarının diğer numunelere göre farklılık göstermektedir. Bu numunelerde maksimum aderans dayanımına ulaşıldıktan sonra dayanımdaki kayıplar diğer numunelere göre az miktarda olmuştur. Bu durum 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde beton fazının mekanik özelliklerinin iyileşmesi neden olmuştur. **Şekil 20.c'** de 400 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin davranışları görülmektedir. Bu numuneler arasında da donatı konumunun davranış üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bu numuneler arasında da özellikle BFQ24T400L0 ve BFQ24T400L45 numunelerinin grafiklerinde sıçramalar olduğu görülmektedir. **Şekil 20.d** ve **Şekil 20.e'** de 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri sunulmuştur. Donatı konumunun bu numuneler üzerinde de etkili olduğu görülmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte numunelerin sıyrılma kapasitelerinin sınırlandığı grafiklerden de görülmektedir. Benzer durum cam lif kullanılan numunelerde de gözlemlenmiştir.

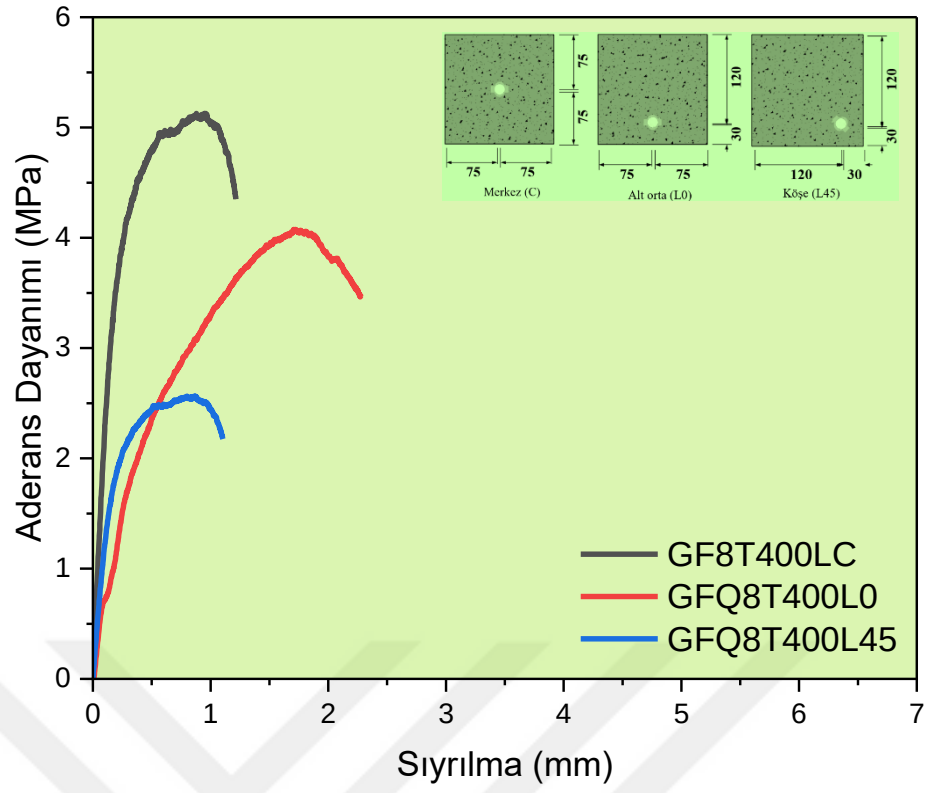


(a) 20 °C ortam kürüne maruz kalan numuneler

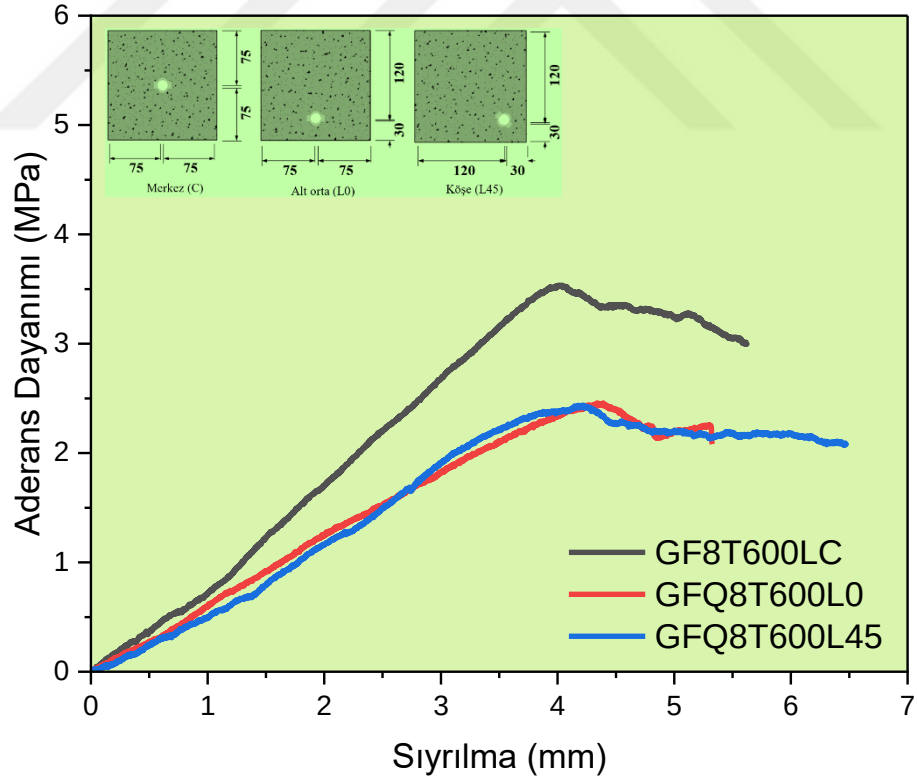


(b) 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 15. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri

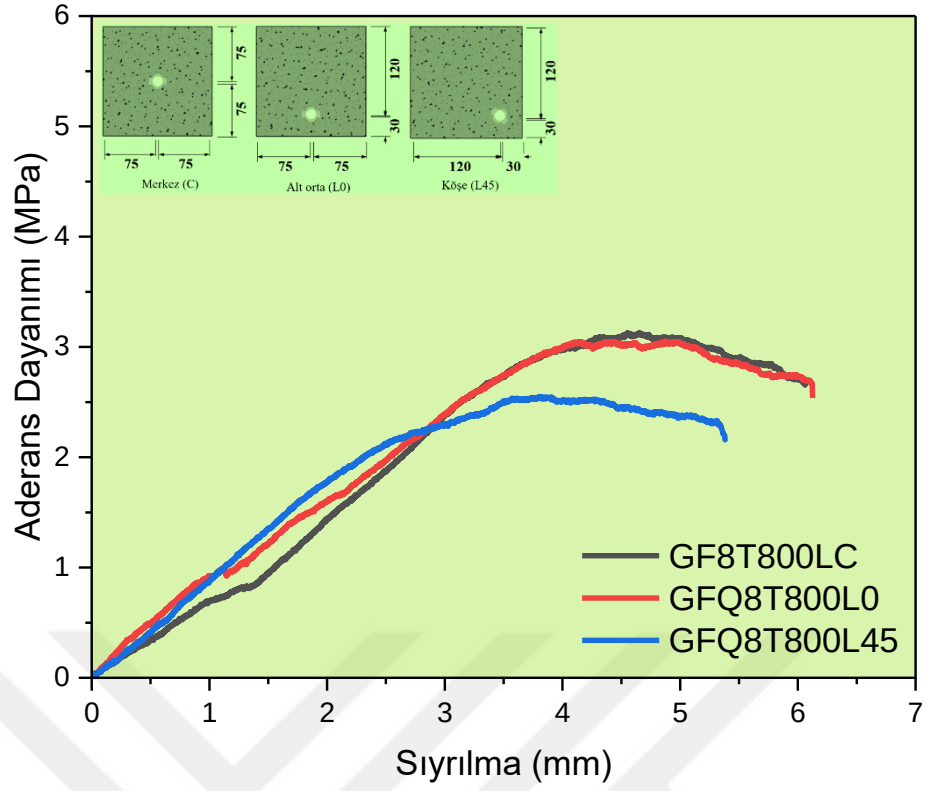


(c) 400 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler



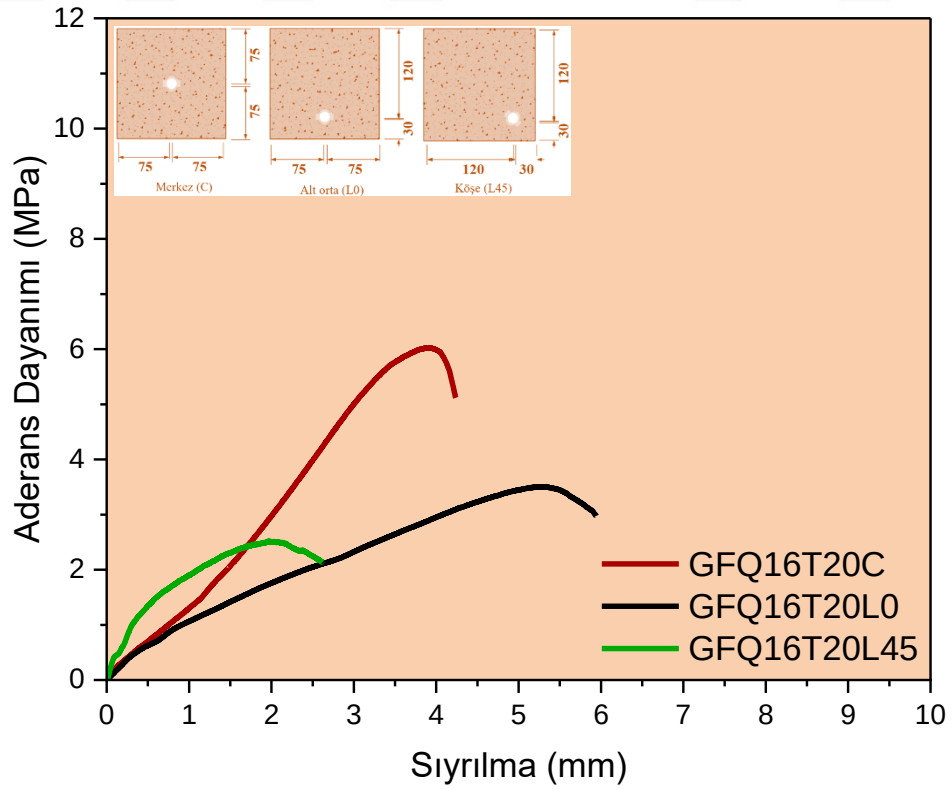
(d) 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 15. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)



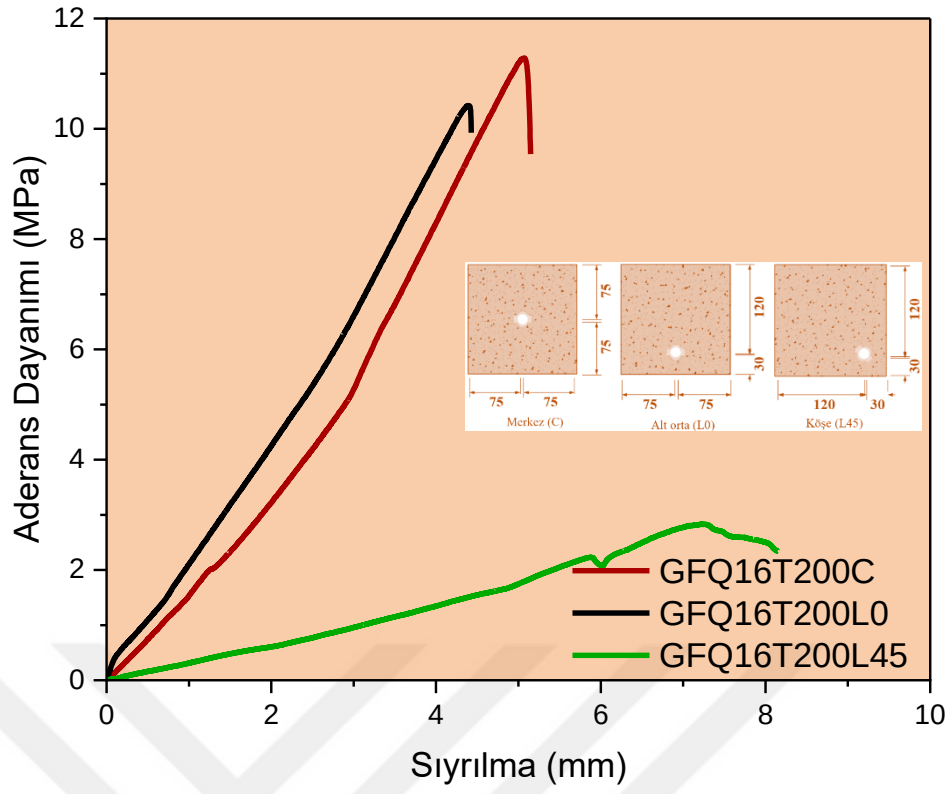
(e) 800 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 15. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyırılma grafikleri (devamı)

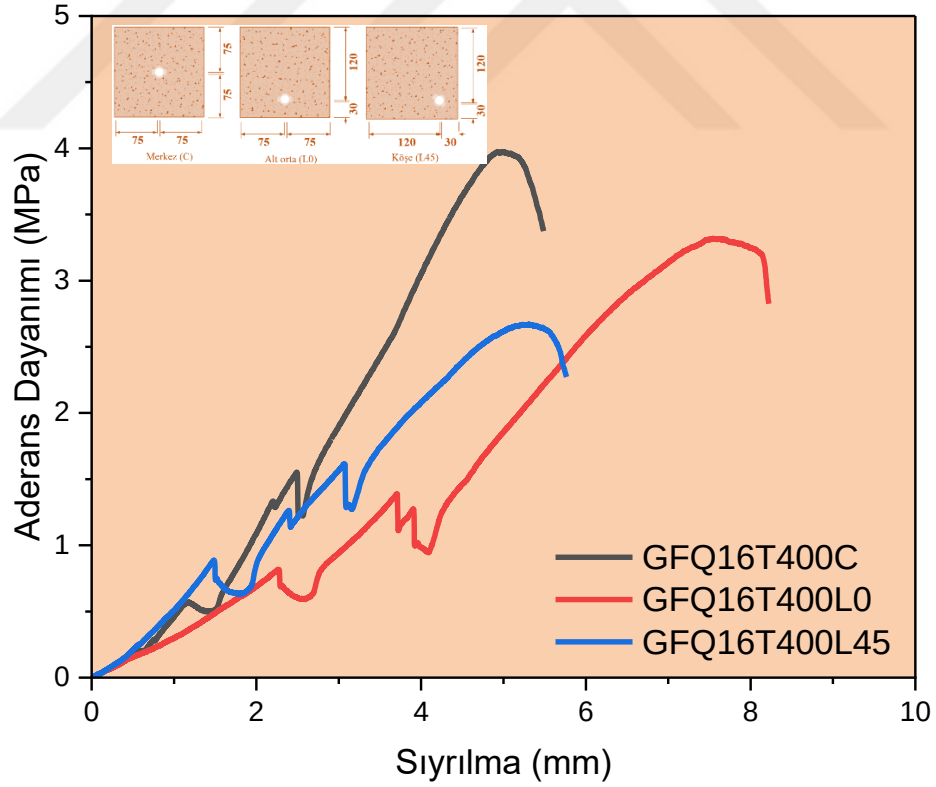


(a) 20 °C ortam kürüne maruz kalan numuneler

Şekil 16. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyırılma grafikleri

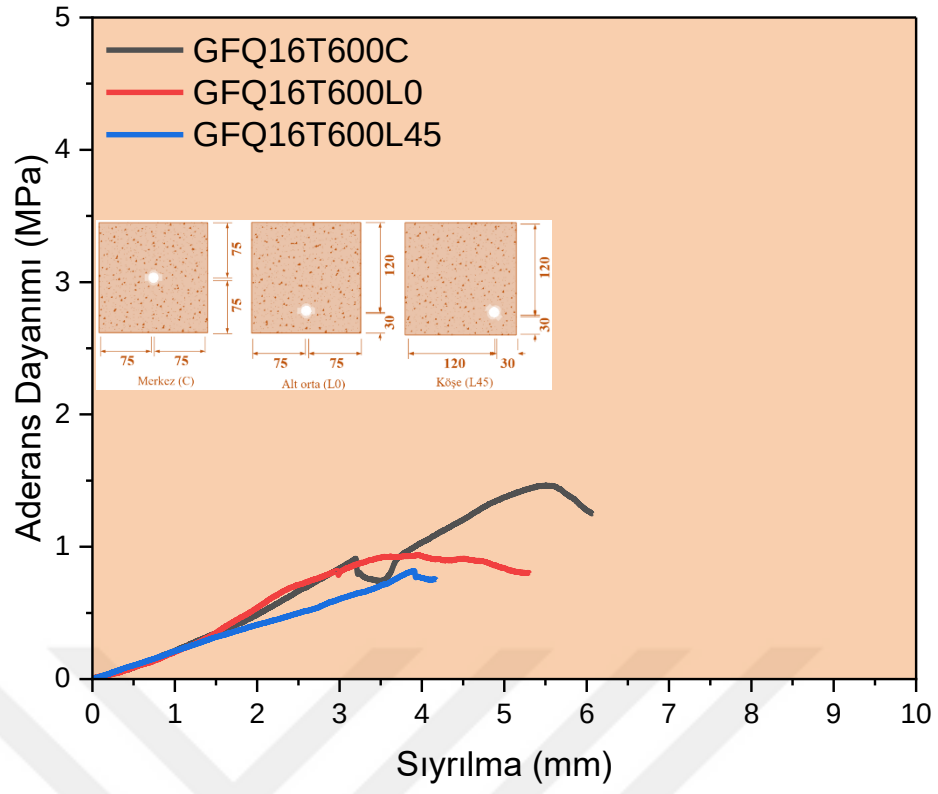


(b) 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

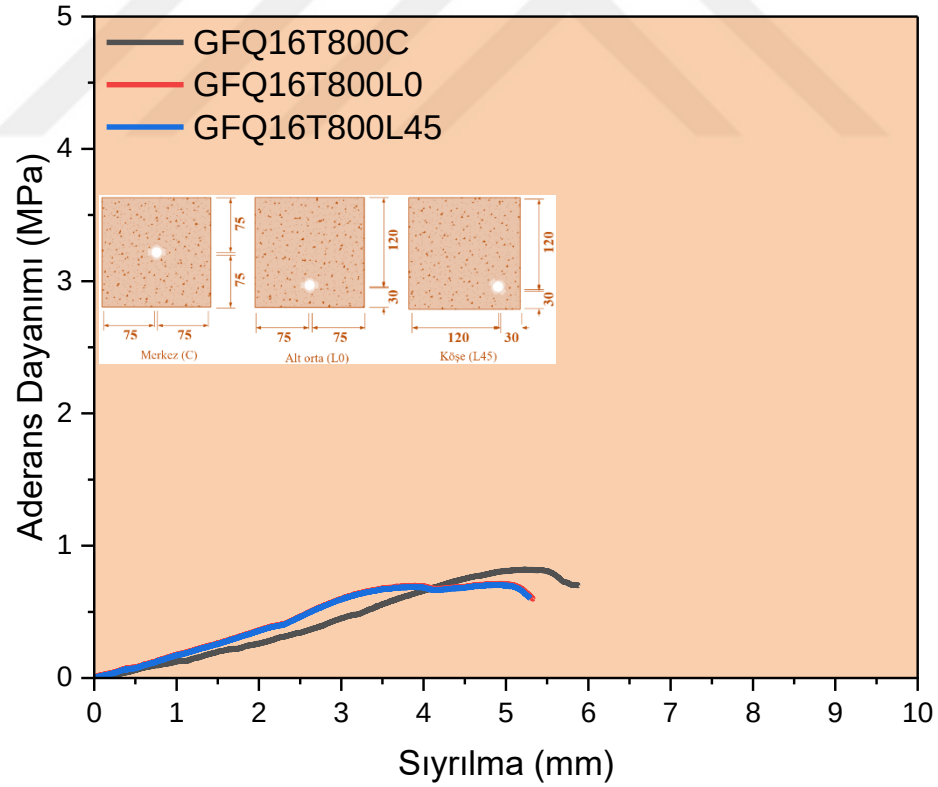


(c) 400 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 16. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)

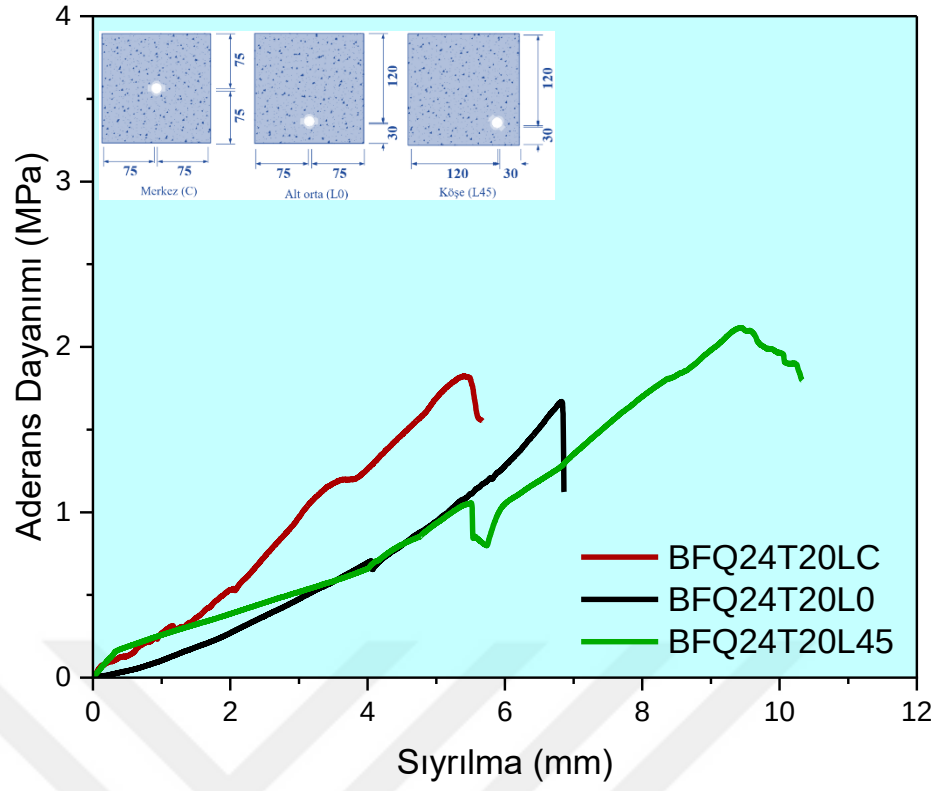


(d) 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

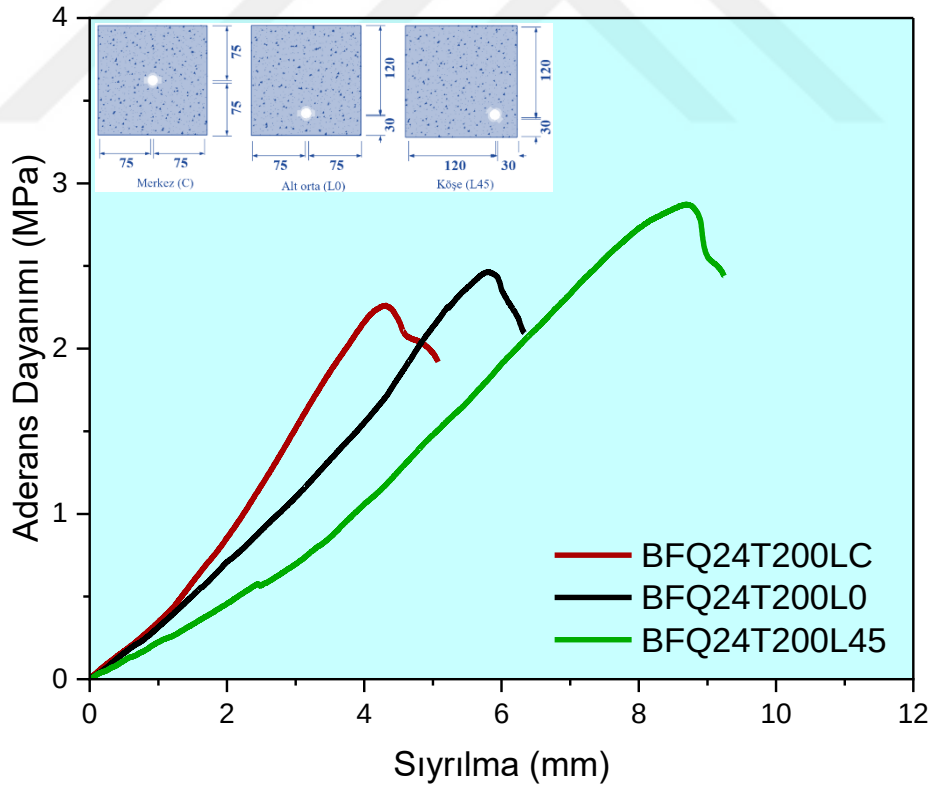


(e) 800 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 16. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)

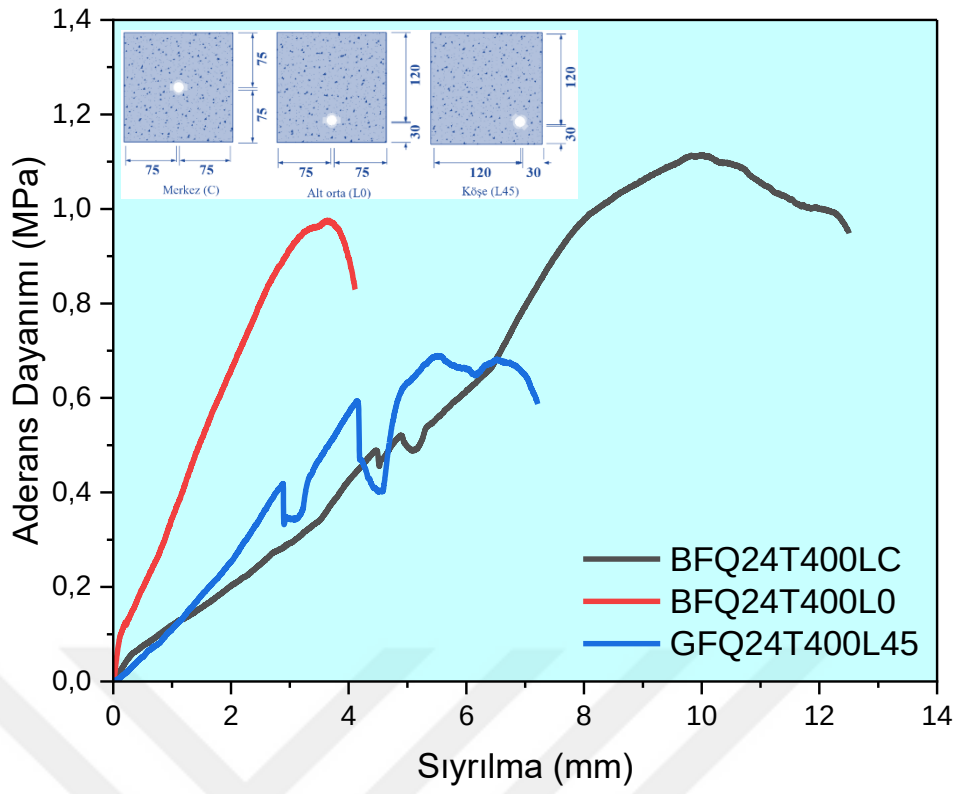


(a) 20 °C ortam kürüne maruz kalan numuneler

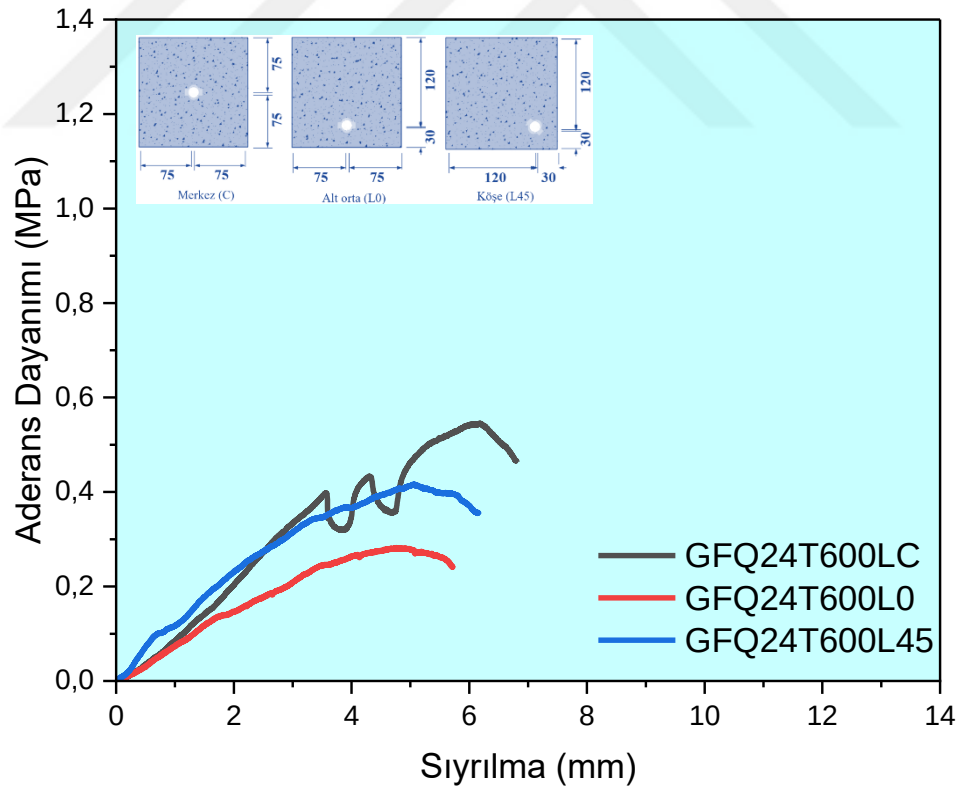


(b) 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 17. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri

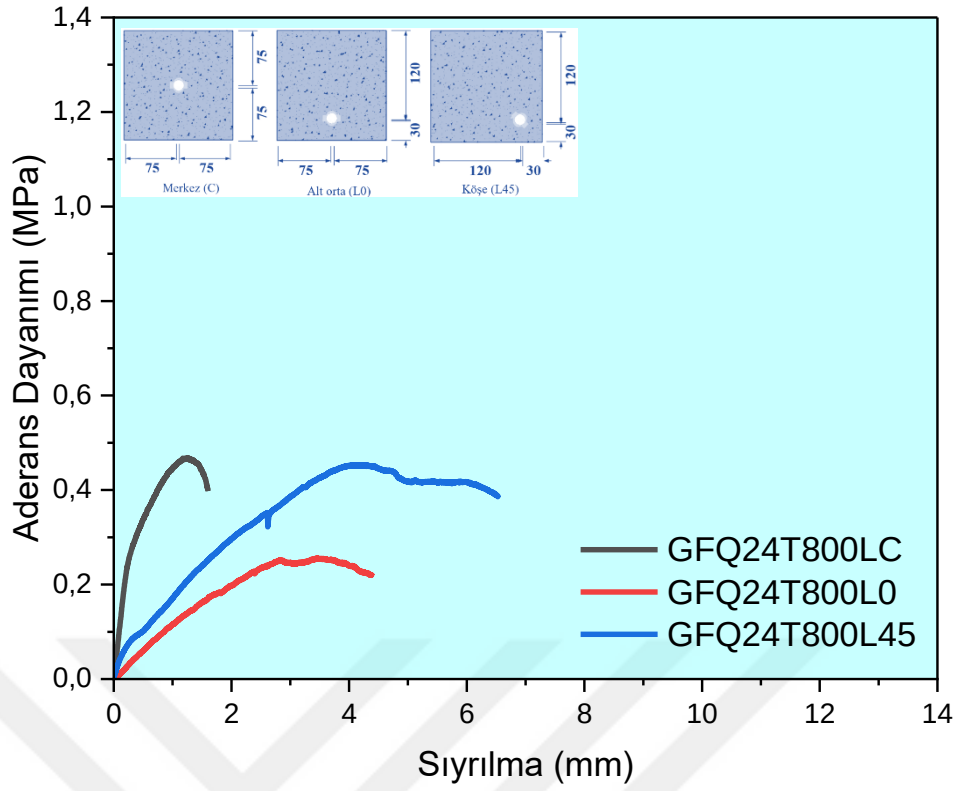


(c) 400 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

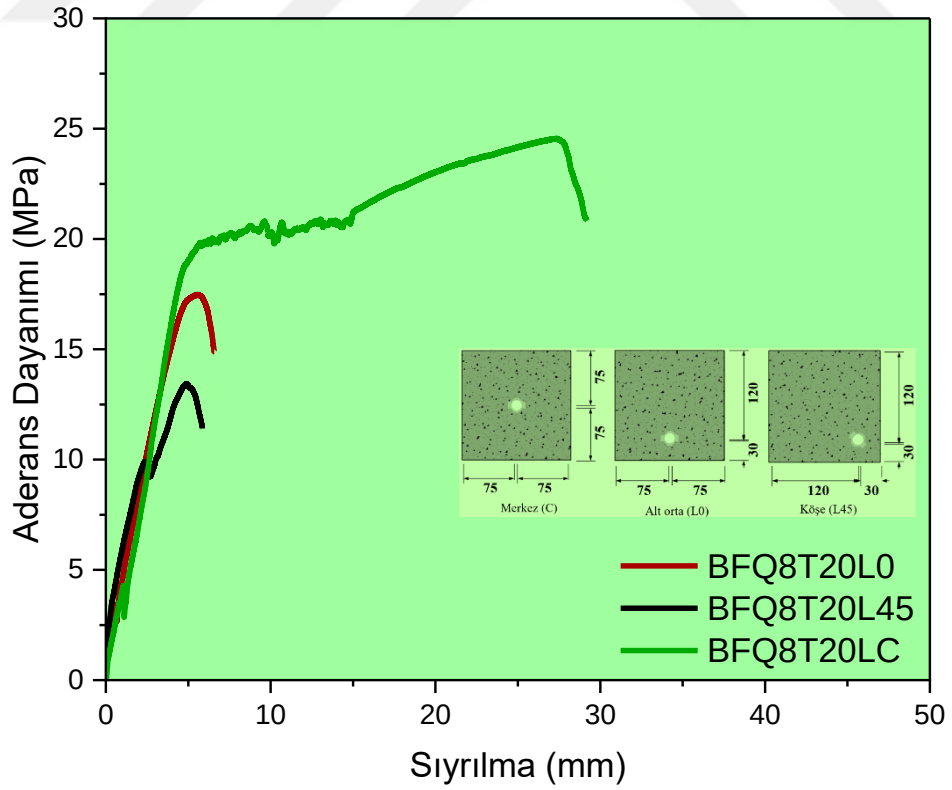


(d) 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

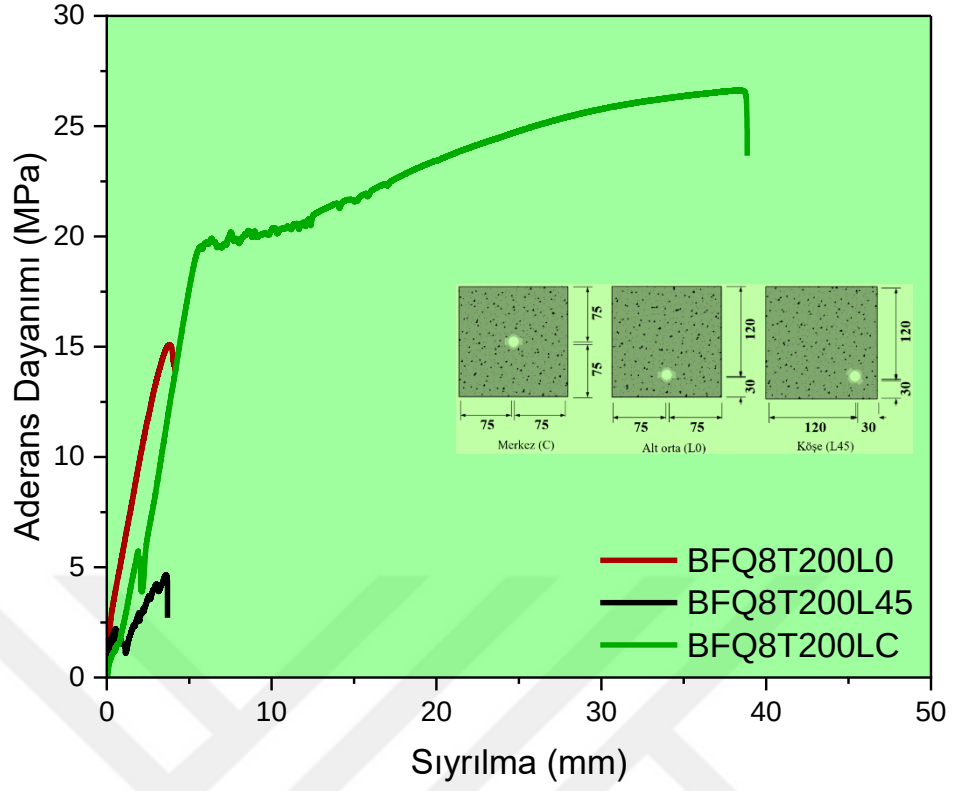
Şekil 18. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyırılma grafikleri (devamı)



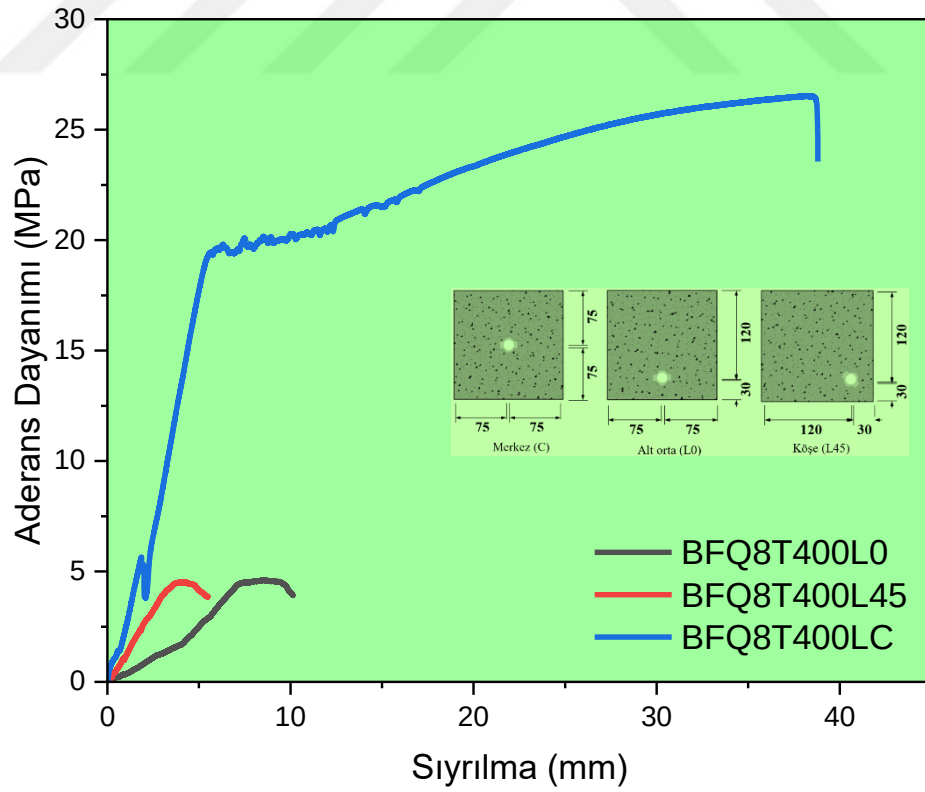
Şekil 17. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)



Şekil 19. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri

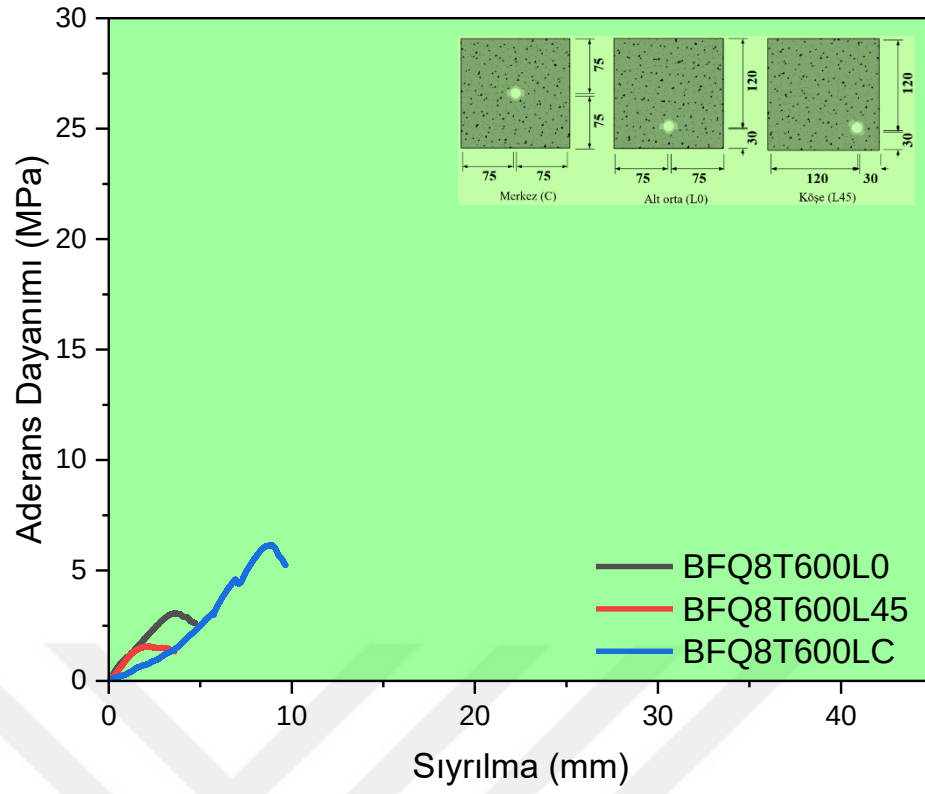


(b) 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

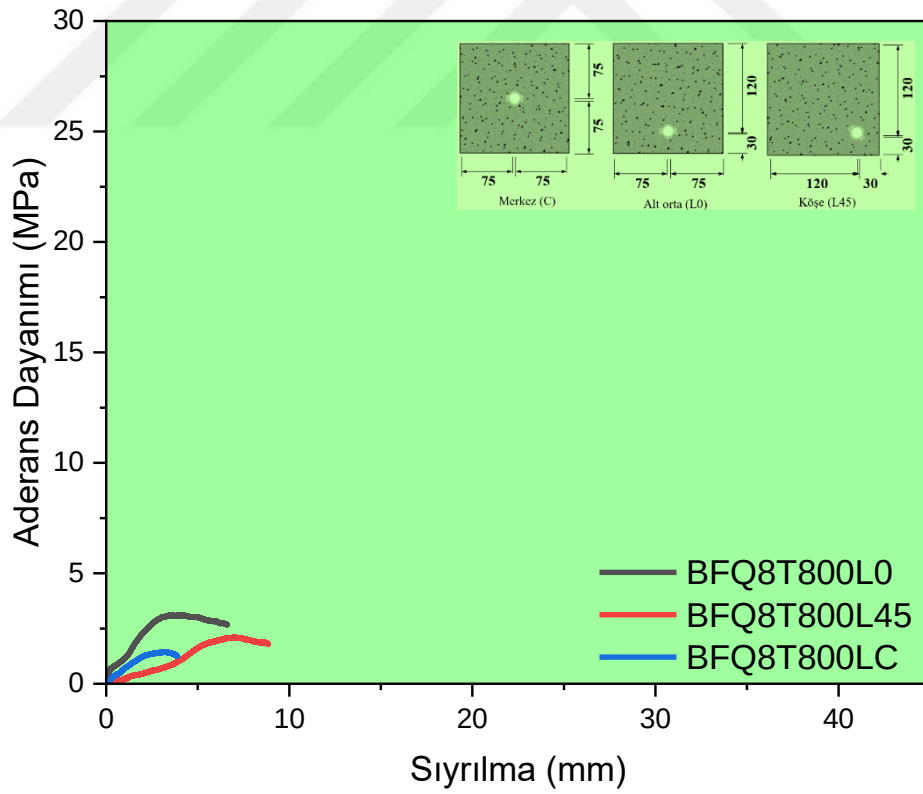


(c) 400 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 18. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)

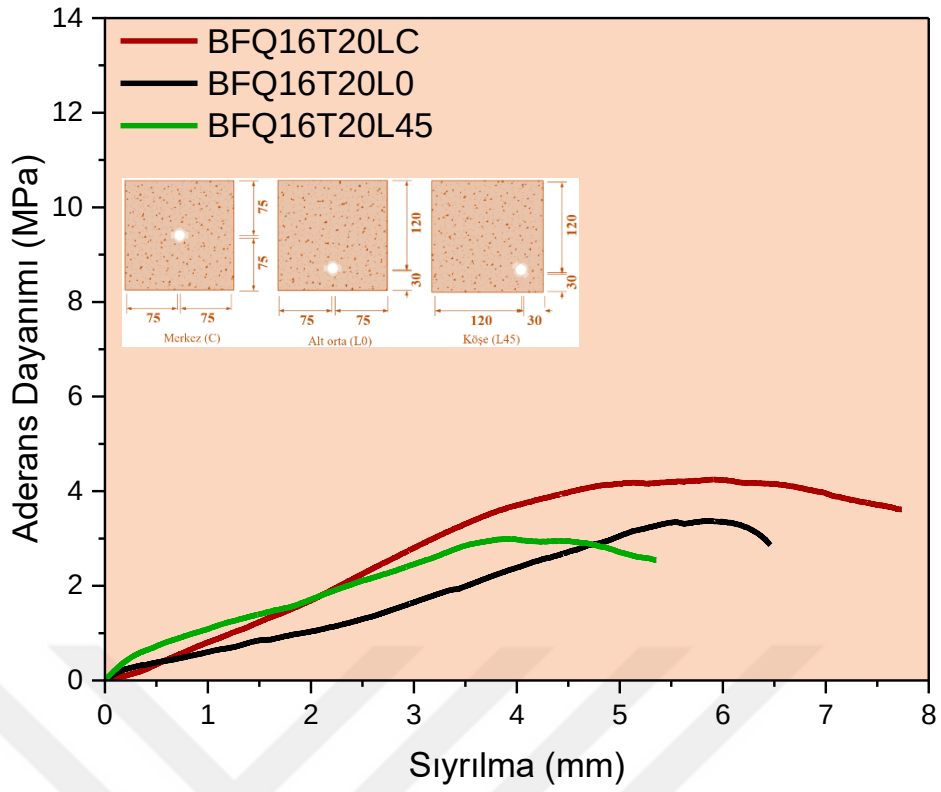


(d) 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

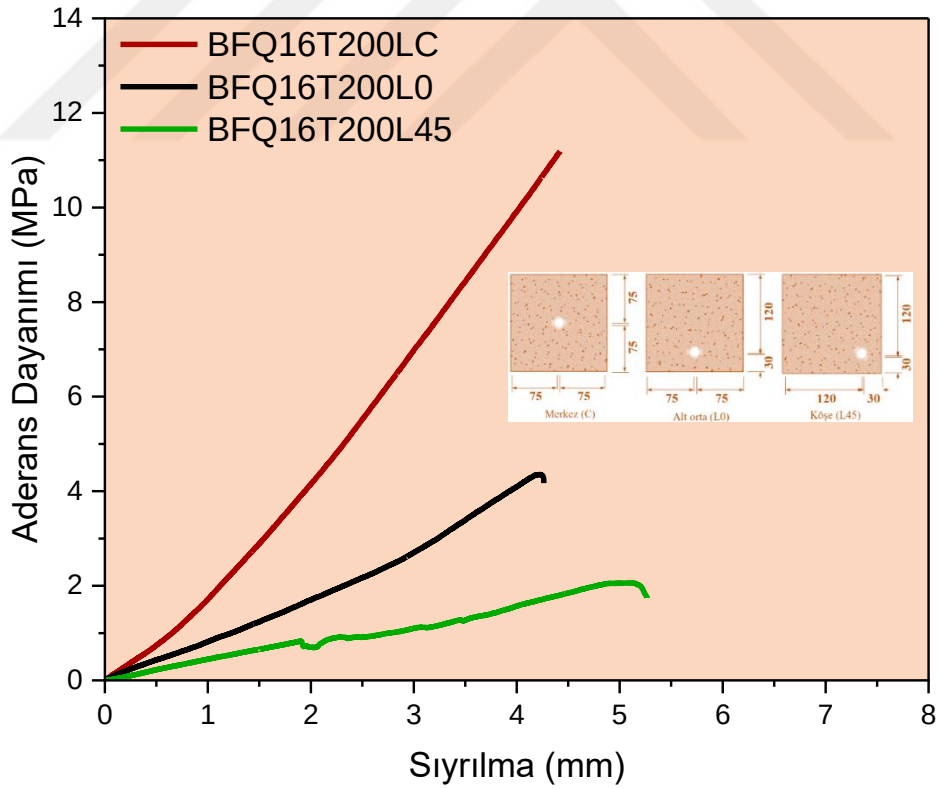


(e) 800 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 18. 8 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)

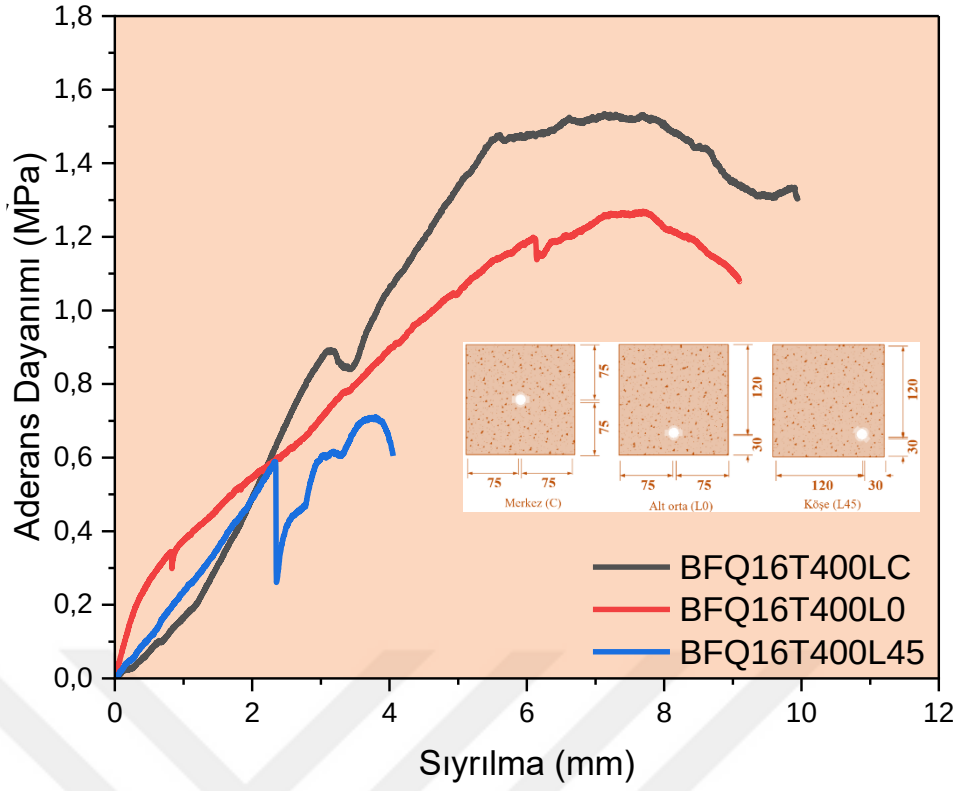


(a) 20 °C ortam kürüne maruz kalan numuneler

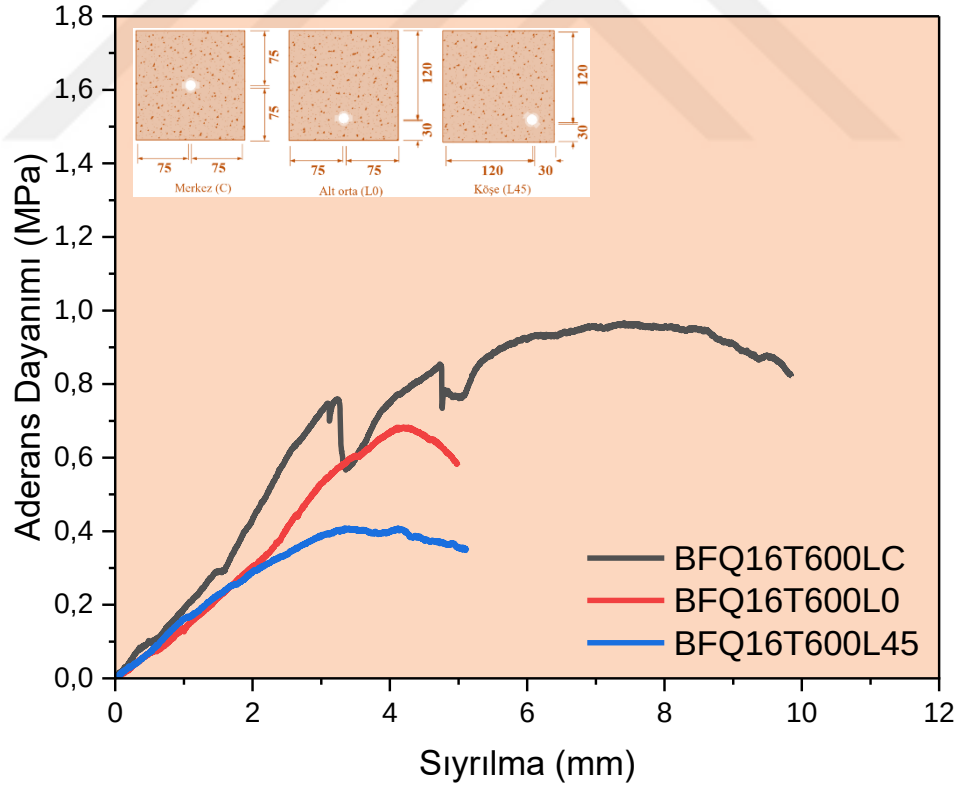


(b) 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 20. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri

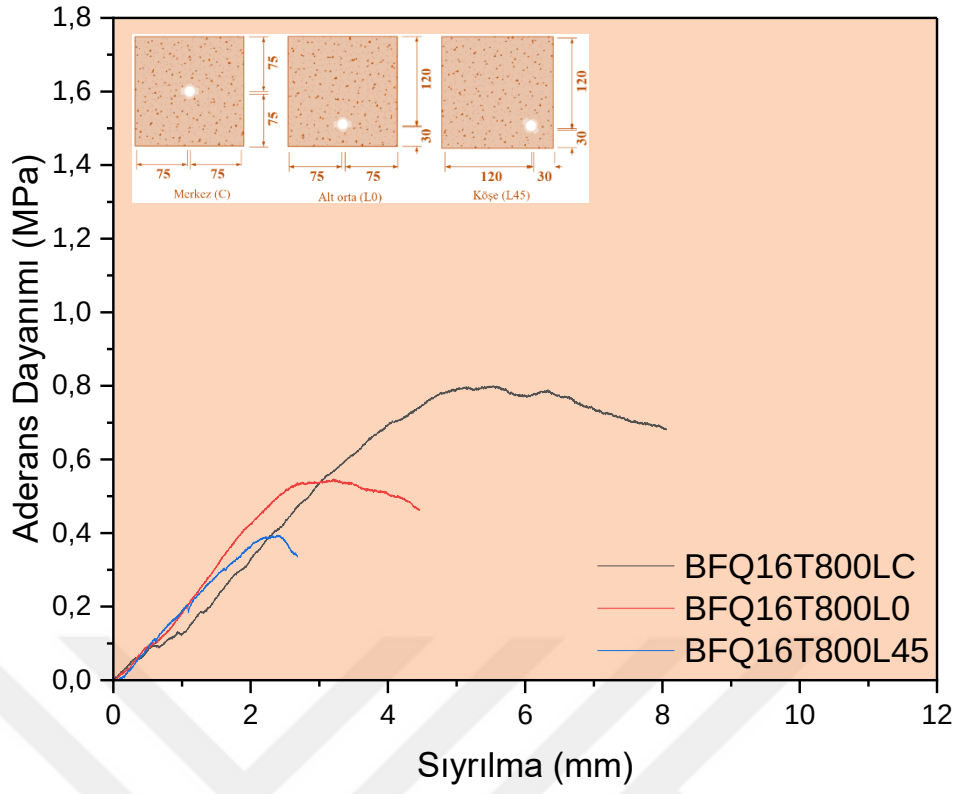


(c) 400 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler



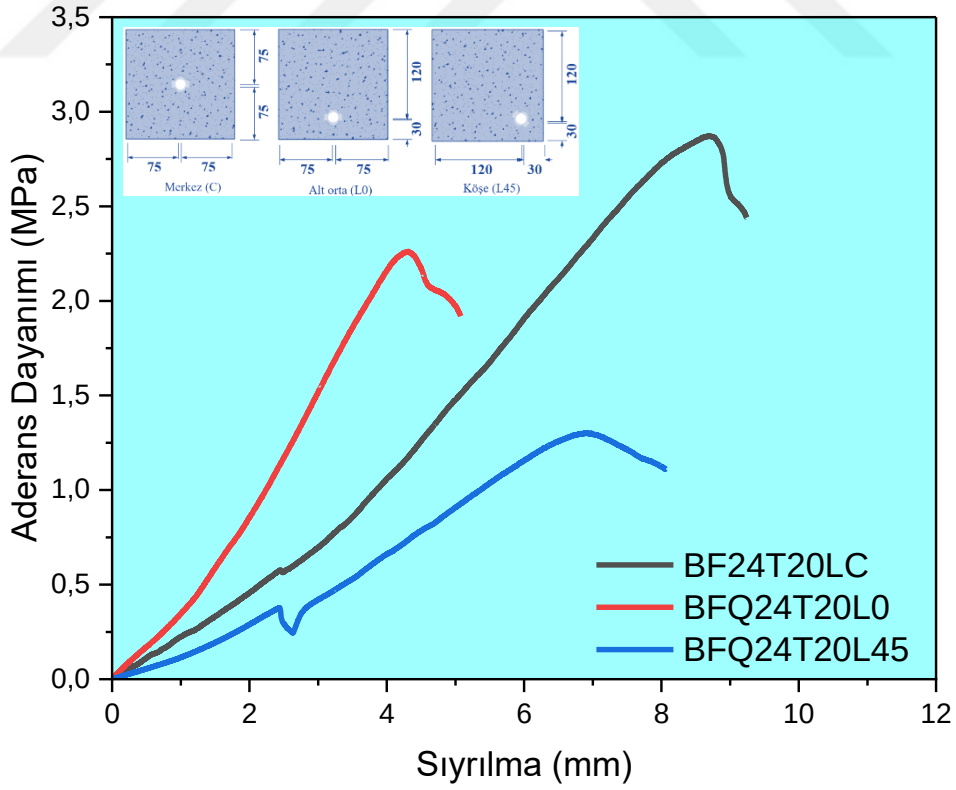
(d) 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 19. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)



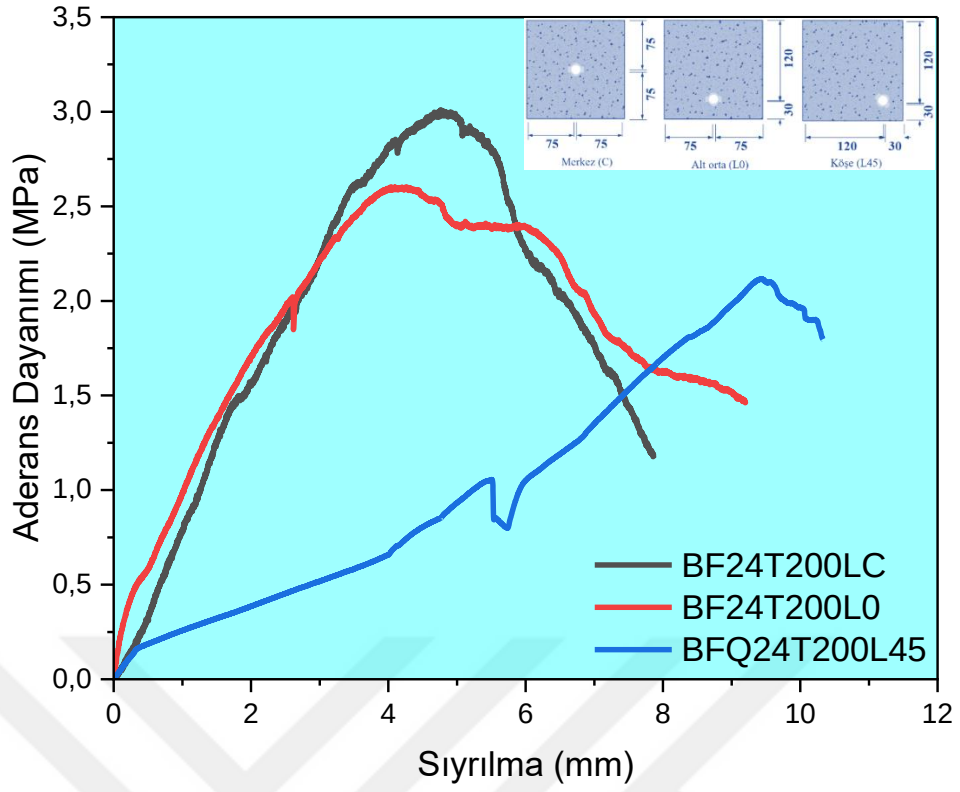
(e) 800 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 19. 16 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)

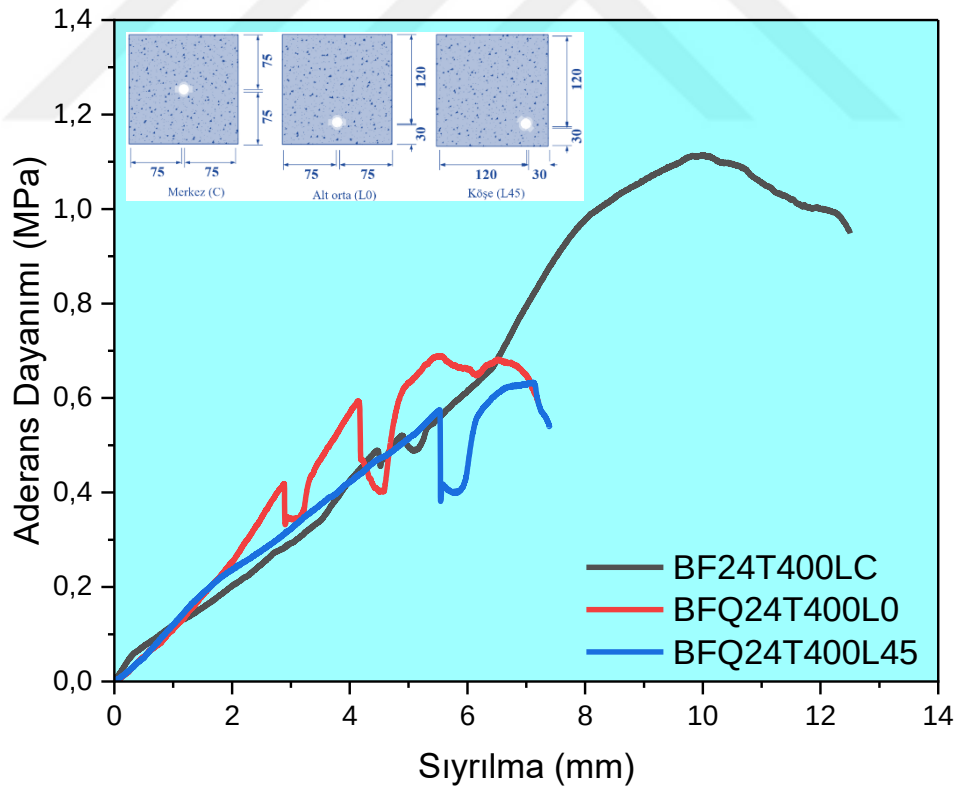


(a) 20 °C ortam kürüne maruz kalan numuneler

Şekil 20. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)

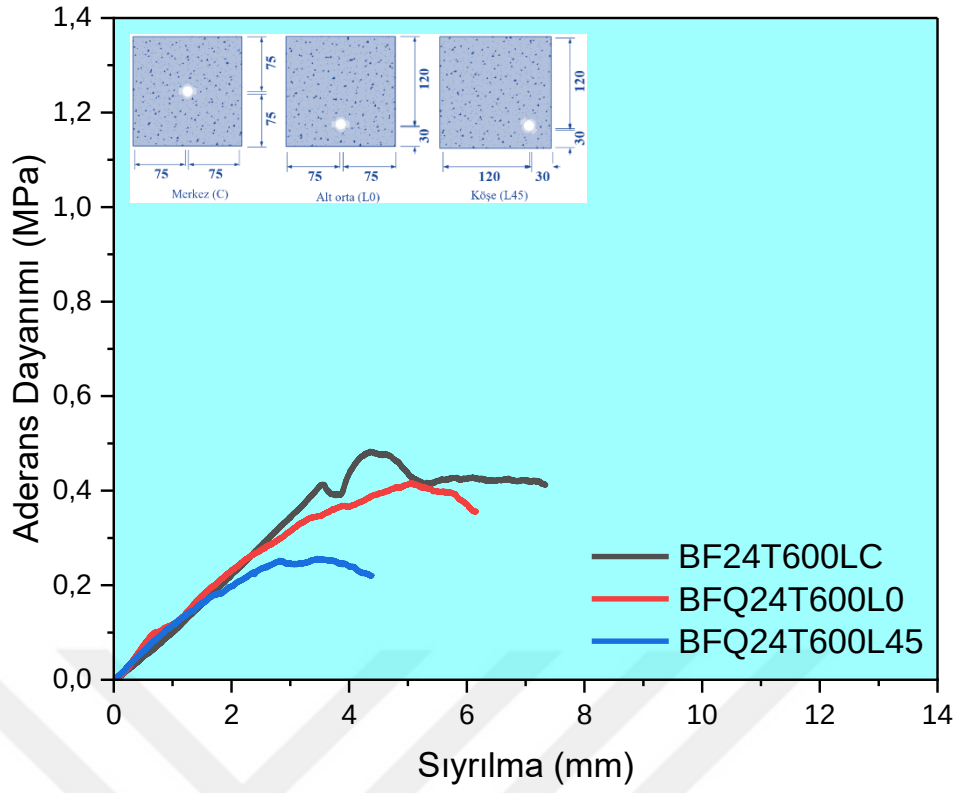


(b) 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

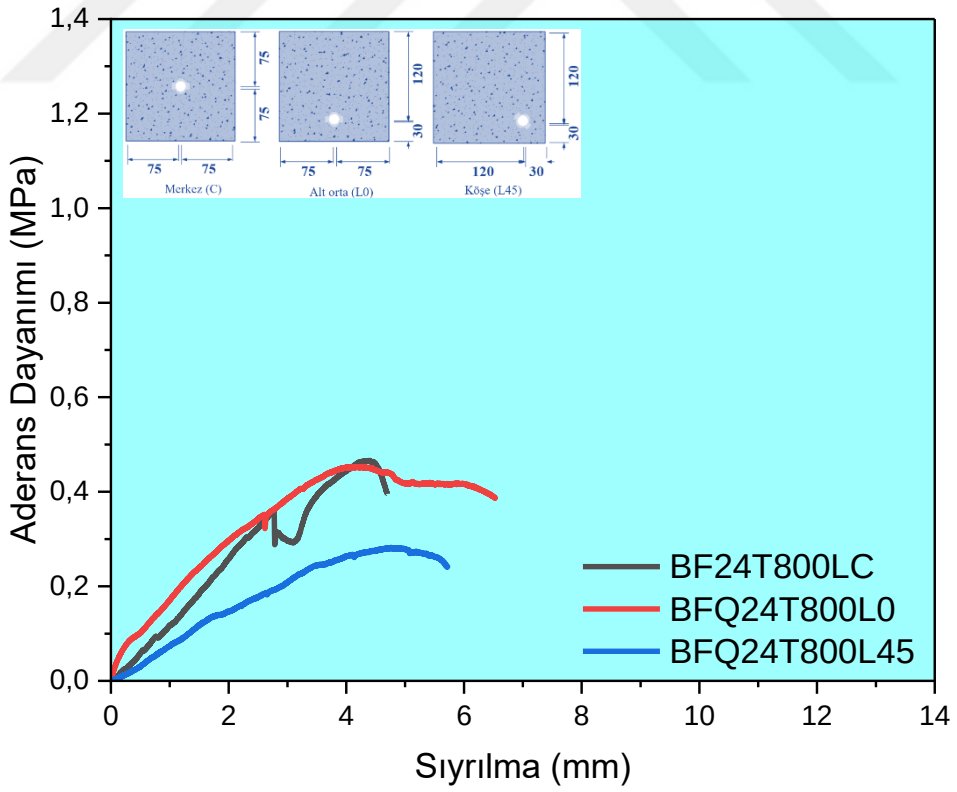


(c) 400 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 20. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)



(d) 600 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler



(e) 800 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler

Şekil 20. 24 mm çaplı donatıların aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri (devamı)

Cam liften üretilen 16 mm çaplı donatılar ile 8 mm çaplı donatılar arasında aderans dayanımı-sıyrılma davranışı bakımında kıyaslama yapıldığı zaman 8 mm çaplı donatılarda 20 °C ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan GFQ8T20LC, GFQ8T20LC, GFQ8T200LC, GFQ8T200L0 ve GFQ8T200L45 numunelerinde donatıda akma gözlemlenmesine karşın 16 mm çaplı donatılarda akma gözlemlenmemiştir. Buradan da donatı çapı, sıcaklık ve beton fazı arasındaki ilişkinin aderans davranışı üzerindeki etkisi görülmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin mekanik performansında artış görülmesi 8 mm çaplı donatılarda etkinliğini göstermesine rağmen 16 mm çaplı donatılarda bu etkinlik görülmemiştir. Burada da 16 mm çaplı donatılarda beton fazı ile donatı arasındaki ara yüzeyin 8 mm çaplı donatılara göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. 16 mm çaplı donatılarda ara yüzeyin fazla olması bu bölgelerdeki kusurluluk oranının fazla olmasına neden olmuştur. Böylece bu bölgelerde mikro düzeyde başlayan çatlak ve asal gerilemeler artan yük etkisi ile davranış üzerinde etkinliğini göstermiştir. Ayrıca hem maruz kalınan sıcaklığın artması hem de donatı çapının artması numunelerin sıyrılma kapasitelerini sınırlamıştır. Bazalt lifli numuneler arasında ise donatıda akma 20 °C, 200 °C ve 400 °C sıcaklığa maruz kalan 8 mm çaplı numunelerde gözlemlenmiştir. Fakat bu numuneler arasında donatıda akma sadece donatının merkeze konumlandırıldığı numunelerde gözlemlenmiştir. Bununla birlikte bazalt lifli numunelerde cam lifli numunelerin aksine yüksek sıcaklık değerlerinde (özellikle 600°C ve 800°C) donatının konumunun davranış üzerindeki etkinliği görülmektedir.

Tablo 14 ve **Tablo 15'** de aderans testi sonucu elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. **Tablo 14'** de cam lifli numunelerin, **Tablo 15'** de ise bazalt lifli numunelerin deney sonuçları sunulmuştur. Öncelikle tabloda her bir numunenin 7 günlük beton basınç dayanımı (f_{cu}) sunulmuştur. İkinci ve üçüncü sütunlarda ise maksimum aderans yükü (P_{maks}) ve maksimum aderans dayanımı (τ_{maks}) sunulmuştur. Maksimum aderans yükü ve maksimum aderans dayanımı sonuçları hesaplanırken aynı özellikteki numunelerin ortalaması alınmıştır. Bunun sonucu olarak da her bir numune için standart sapma (SS) değerleri de tabloda verilmiştir. Bununla birlikte numunelerin basınç dayanımlarının farklı olduğu tablodan görülmektedir. Beton basınç dayanımı parametresinin elemine edilmesi için her bir numunenin normalleştirilmiş aderans dayanımı (τ_n) değeri de sunulmuştur. Normalleştirilmiş aderans dayanımı $\tau_n = (\tau_{nmax})/(\sqrt{f_{cu}^t})$ formülü ile hesaplanmıştır. Tabloda maksimum sıyrılma yüküne karşılık gelen (s_{max}) değeri de verilmiştir. Bu değerinde standart sapmasına (SS) tabloda yer verilmiştir. Tablonun son iki sütununda ise numunelerin enerji sönümleme kapasiteleri ve göçme modları sunulmuştur. Enerji sönümleme kapasiteleri **Şekil 15, 16, 17, 18, 19 ve 20'** de sunulan aderans dayanımı-sıyrılma grafiklerinin altında kalan alandan hesaplanmıştır. Son sütunda ise numunelerin deneyden sonraki çatlak dağılımına göre karar verilen göçme modu (GM) sunulmuştur. Numunelerin göçme modları ve çatlak dağılımları ilerleyen bölümde detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

Tablo 14. Cam Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları

Specimens	f_{cu} (MPa)	P_{maks} (kN)	τ_{maks} (MPa)	τ_n (MPa)	SS	S_{maks} (mm)	SS	E (MPa. mm)	GM
GFQ8T20LC	30,9	24,13	24,01	4,32	1,12	24,11	1,05	490,47	S
GFQ8T20L0	30,9	20,64	20,54	3,69	1,09	8,32	1,06	162,41	S
GFQ8T20L45	30,9	14,16	14,09	2,53	1,10	3,61	1,05	36,66	S
GFQ8T200LC	31,2	29,32	29,17	5,22	1,12	44,13	1,07	1051,4	S
GFQ8T200L0	31,2	28,90	28,75	5,14	1,08	28,62	0,98	1606,6	S
GFQ8T200L45	31,2	29,85	29,69	5,31	1,11	40,11	1,08	973,06	S
GFQ8T400LC	32,0	5,15	5,12	0,91	1,12	0,94	1,07	5,25	S
GFQ8T400L0	32,0	4,09	4,07	0,72	1,05	1,74	1,10	6,97	S
GFQ8T400L45	32,0	2,57	2,56	0,45	1,03	0,87	1,06	2,38	S
GFQ8T600LC	23,2	3,55	3,53	0,73	1,07	4,0	1,08	12,25	S
GFQ8T600L0	23,2	2,47	2,45	0,51	1,09	4,39	1,12	7,88	S
GFQ8T600L45	23,2	2,45	2,43	0,51	1,10	4,22	1,11	10,23	S
GFQ8T800LC	16,0	3,14	3,13	0,78	1,08	4,65	1,10	12,10	S
GFQ8T800L0	16,0	3,06	3,05	0,76	1,11	4,87	1,08	12,63	S
GFQ8T800L45	16,0	2,56	2,54	0,63	1,10	3,82	1,12	9,65	S
GFQ16T20LC	30,9	24,21	6,02	1,08	1,05	3,86	1,06	13,79	S
GFQ16T20L0	30,9	14,09	3,50	0,63	1,03	5,32	1,08	13,09	S
GFQ16T20L45	30,9	10,09	2,51	0,45	1,05	1,96	1,07	4,91	S
GFQ16T200LC	31,2	45,38	11,28	2,02	1,13	5,06	1,12	25,53	S-B
GFQ16T200L0	31,2	41,90	10,42	1,87	1,13	4,38	1,09	21,97	S
GFQ16T200L45	31,2	11,38	2,83	0,51	1,12	7,20	1,14	11,63	S-B
GFQ16T400LC	32,0	15,98	3,97	0,70	1,08	5,01	1,04	10,20	S
GFQ16T400L0	32,0	13,35	3,32	0,58	1,02	7,54	1,05	13,01	S
GFQ16T400L45	32,0	10,74	2,67	0,47	1,05	5,31	1,07	8,23	S
GFQ16T600LC	23,2	5,89	1,46	0,30	1,10	5,50	1,08	4,66	S
GFQ16T600L0	23,2	3,77	0,94	0,19	1,08	3,95	1,09	3,19	S
GFQ16T600L45	23,2	3,29	0,81	0,17	1,08	3,90	1,08	1,75	S
GFQ16T800LC	16,0	3,30	0,82	0,21	1,13	5,31	1,07	2,59	S-B
GFQ16T800L0	16,0	2,87	0,72	0,18	1,07	4,94	0,95	2,40	S-B
GFQ16T800L45	16,0	2,84	0,71	0,18	1,02	4,90	1,07	2,34	S-B
GFQ24T20LC	30,9	16,51	1,82	0,32	1,08	5,39	1,11	5,04	S
GFQ24T20L0	30,9	15,11	1,67	0,30	1,12	6,82	1,08	4,36	S
GFQ24T20L45	30,9	8,96	0,99	0,18	1,12	4,88	1,14	2,88	S
GFQ24T200LC	31,2	28,04	3,09	0,55	1,11	4,43	1,09	7,25	S-B
GFQ24T200L0	31,2	22,29	2,46	0,44	1,09	5,82	1,07	7,80	S
GFQ24T200L45	31,2	4,21	0,46	0,08	1,10	6,34	1,05	2,43	S-B
GFQ24T400LC	32,0	9,55	1,05	0,19	1,14	3,08	1,12	2,75	S
GFQ24T400L0	32,0	8,83	0,97	0,17	1,13	3,63	1,09	2,54	S
GFQ24T400L45	32,0	8,30	0,92	0,16	1,05	4,21	1,11	2,87	S
GFQ24T600LC	23,2	4,93	0,54	0,11	1,08	6,12	1,06	2,12	S
GFQ24T600L0	23,2	4,07	0,45	0,10	1,11	5,82	1,12	1,61	S
GFQ24T600L45	23,2	1,94	0,21	0,04	1,12	2,73	1,07	0,44	S
GFQ24T800LC	16,0	4,23	0,46	0,12	1,09	1,27	1,12	0,58	S-B
GFQ24T800L0	16,0	3,25	0,36	0,10	1,12	1,51	1,08	0,49	S-B
GFQ24T800L45	16,0	1,80	0,19	0,05	1,12	1,28	1,09	0,29	S-B

Tablo 15. Bazalt Lifli Numunelerin Aderans Testi Sonuçları

Specimens	f_{cu} (MPa)	P_{maks} (kN)	τ_{maks} (MPa)	τ_n (MPa)	SS	S_{maks} (mm)	SS	E (MPa. mm)	GM
BFQ8T20LC	30,9	24,68	24,55	4,42	1,08	27,38	0,97	580,21	S
BFQ8T20L0	30,9	17,58	17,48	3,14	1,12	5,56	0,87	76,40	S
BFQ8T20L45	30,9	13,50	13,43	2,41	1,01	4,93	0,91	55,76	S
BFQ8T200LC	31,2	26,78	26,64	4,77	0,88	38,15	0,90	834,10	S
BFQ8T200L0	31,2	15,16	15,08	2,70	1,01	3,77	0,89	39,62	S
BFQ8T200L45	31,2	4,68	4,65	0,83	1,02	3,62	0,92	10,01	S
BFQ8T400LC	32,0	26,68	26,64	4,69	1,05	38,23	1,01	830,19	S
BFQ8T400L0	32,0	6,64	4,61	0,82	0,95	8,54	0,92	26,16	S
BFQ8T400L45	32,0	4,55	4,52	0,80	1,02	4,30	0,93	16,41	S
BFQ8T600LC	23,2	6,19	6,16	1,28	1,11	8,91	1,02	26,87	S
BFQ8T600L0	23,2	3,08	3,07	0,64	1,10	3,66	1,02	9,54	S
BFQ8T600L45	23,2	1,58	1,58	0,33	1,08	2,21	0,99	4,19	S
BFQ8T800LC	16,0	3,13	3,12	0,78	1,11	3,66	1,01	15,91	S
BFQ8T800L0	16,0	2,11	2,10	0,52	1,07	7,21	0,99	10,67	S
BFQ8T800L45	16,0	1,46	1,45	0,36	1,01	3,21	0,95	3,92	S
BFQ16T20LC	30,9	17,09	4,25	0,76	0,98	5,91	0,97	22,21	S
BFQ16T20L0	30,9	13,56	3,37	0,61	1,09	5,91	1,05	11,98	S
BFQ16T20L45	30,9	12,05	2,99	0,54	1,11	3,91	1,06	10,79	S
BFQ16T200LC	31,2	44,99	11,18	2,00	1,07	4,41	0,98	22,11	B
BFQ16T200L0	31,2	17,51	4,36	0,78	1,14	4,21	1,01	8,36	S
BFQ16T200L45	31,2	8,29	2,06	0,37	1,13	5,11	1,05	5,47	B
BFQ16T400LC	32,0	6,17	1,53	0,27	1,13	7,70	0,98	10,33	S
BFQ16T400L0	32,0	5,10	1,27	0,22	1,05	7,73	0,94	7,95	S
BFQ16T400L45	32,0	2,85	0,71	0,13	1,08	3,80	0,95	1,64	S
BFQ16T600LC	23,2	3,89	0,97	0,20	1,07	7,41	1,05	6,89	S
BFQ16T600L0	23,2	2,74	0,68	0,14	1,10	4,20	0,97	1,93	S
BFQ16T600L45	23,2	1,64	0,41	0,09	1,11	3,40	1,00	1,46	S
BFQ16T800LC	16,0	3,21	0,80	0,20	1,08	5,53	0,98	4,39	S
BFQ16T800L0	16,0	2,19	0,55	0,14	1,07	3,20	1,02	1,64	S-B
BFQ16T800L45	16,0	1,58	0,39	0,10	1,08	2,39	1,03	0,62	B
BFQ24T20LC	30,9	25,99	2,87	0,52	1,04	8,69	0,98	12,90	S
BFQ24T20L0	30,9	20,46	2,26	0,41	1,10	4,31	1,05	6,07	S
BFQ24T20L45	30,9	11,79	1,30	0,23	1,08	6,89	0,95	5,47	S
BFQ24T200LC	31,2	27,23	3,01	0,54	1,10	4,76	0,96	5,52	S
BFQ24T200L0	31,2	23,52	2,60	0,47	1,11	4,03	0,96	8,58	S-B
BFQ24T200L45	31,2	19,13	2,11	0,38	1,10	9,41	0,95	10,50	S
BFQ24T400LC	32,0	10,08	1,12	0,19	1,03	9,99	0,98	8,16	S
BFQ24T400L0	32,0	6,24	0,69	0,12	1,07	5,56	1,01	3,00	S-B
BFQ24T400L45	32,0	5,73	0,63	0,11	1,08	7,08	1,02	2,66	B
BFQ24T600LC	23,2	4,37	0,48	0,10	1,10	4,35	0,97	2,33	S
BFQ24T600L0	23,2	3,77	0,42	0,09	1,09	5,06	0,98	1,71	S
BFQ24T600L45	23,2	2,32	0,26	0,05	1,08	3,46	1,05	0,79	S
BFQ24T800LC	16,0	4,22	0,46	0,12	1,08	4,30	1,07	1,24	S-B
BFQ24T800L0	16,0	4,10	0,45	0,11	1,12	4,25	1,09	2,17	S-B
BFQ24T800L45	16,0	2,55	0,28	0,07	1,11	4,76	1,08	1,03	S-B

Farklı parametrelerin aderans performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Bu bölümde deneysel çalışma kapsamında seçilen farklı parametrelerin aderans performansı üzerindeki etkisi ele alınmıştır. Deney parametreleri olarak tercih edilen donatı çapı (8 mm, 16 mm ve 24 mm), lif türü (cam ve bazalt lif), donatının konumu (merkez, orta alt ve köşe) ve yüksek sıcaklık etkisinin (20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) numunelerin aderans dayanımlarına etkisi ayrı ayrı ele alınmıştır. Her bir alt başlıkta karşılaştırılan parametre hariç diğer parametrelerin aynı olduğu numuneler bir birleri ile karşılaştırılmıştır.

Donatı çapının aderans performansına etkisinin incelenmesi

Deneysel çalışma kapsamında donatı çapının aderans dayanımı üzerindeki etkisinin incelenebilmesi için 8 mm, 16 mm ve 24 mm olmak üzere üç farklı donatı çapı tercih edilmiştir. Numunelerin karşılaştırılması yapılırken donatı çapları farklı olmak üzere diğer parametreler aynı olarak alınmıştır. Genel olarak cam ve bazalt lifli numuneler olmak üzere karşılaştırma iki farklı gruba ayrılmıştır. **Tablo 16 ve Tablo 17'** de sırasıyla bazalt ve cam lifli, 8 mm, 16 mm ve 24 mm donatı çaplı numunelerin maksimum aderans dayanımları ve karşılaştırmaları sunulmuştur. Ayrıca **Şekil 21 ve Şekil 22'** de cam ve bazalt lifli numunelerin maksimum aderans dayanımları arasındaki ilişki grafik olarak da sunulmuştur. **Şekil 23 ve Şekil 24'** de donatı çapının 8 mm' den 16 mm' y ve 8 mm' den 24 mm' ye arttırılması durumunda maksimum aderans dayanımındaki yüzdelik değişimde grafik olarak gösterilmiştir.

Tablo 16. Bazalt Lifli ve 8 mm, 16 mm ve 24 mm Donatı Çaplı Numunelerin Aderans Dayanımı Karşılaştırması

Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	(%) ^{8-16*}	(%) ^{8-24**}	(%) ^{16-24**}
BFQ8T20LC	24.55	BFQ16T20LC	4.25	BFQ24T20LC	2.87	82,69	88,31	32,47
BFQ8T20L0	17.48	BFQ16T20L0	3.37	BFQ24T20L0	2.26	80,72	87,07	32,94
BFQ8T20L45	13.43	BFQ16T20L45	2.99	BFQ24T20L45	1.30	77,74	90,32	56,52
BFQ8T200LC	26.64	BFQ16T200LC	11.18	BFQ24T200LC	3.01	58,03	88,70	73,08
BFQ8T200L0	15.08	BFQ16T200L0	4.36	BFQ24T200L0	2.60	71,09	82,76	40,37
BFQ8T200L45	4.65	BFQ16T200L45	2.06	BFQ24T200L45	2.11	55,70	54,62	-2,43
BFQ8T400LC	26.64	BFQ16T400LC	1.53	BFQ24T400LC	1.12	94,26	95,80	26,80
BFQ8T400L0	4.61	BFQ16T400L0	1.27	BFQ24T400L0	0.69	72,45	85,03	45,67
BFQ8T400L45	4.52	BFQ16T400L45	0.71	BFQ24T400L45	0.63	84,29	86,06	11,27
BFQ8T600LC	6.16	BFQ16T600LC	0.97	BFQ24T600LC	0.48	84,25	92,21	50,52
BFQ8T600L0	3.07	BFQ16T600L0	0.68	BFQ24T600L0	0.42	77,85	86,32	38,24
BFQ8T600L45	1.58	BFQ16T600L45	0.41	BFQ24T600L45	0.26	74,05	83,54	36,59
BFQ8T800L0	3.12	BFQ16T800LC	0.80	BFQ24T800LC	0.46	74,36	85,26	42,50
BFQ8T800L45	2.10	BFQ16T800L0	0.55	BFQ24T800L0	0.45	73,81	78,57	18,18
BFQ8T800LC	1.45	BFQ16T800L45	0.39	BFQ24T800L45	0.28	73,10	80,69	28,21
Maks.						94,26	95,80	73,8
Min.						55,70	54,62	11,27
Ort.						75,63	84,35	35,39

(%)^{8-16*}: 8 mm donatı çaplı numuneler ile 16 mm donatı çaplı numunelerin karşılaştırılması

(%)^{8-24*}: 8 mm donatı çaplı numuneler ile 24 mm donatı çaplı numunelerin karşılaştırılması

(%)^{16-24*}: 16 mm donatı çaplı numuneler ile 24 mm donatı çaplı numunelerin karşılaştırılması

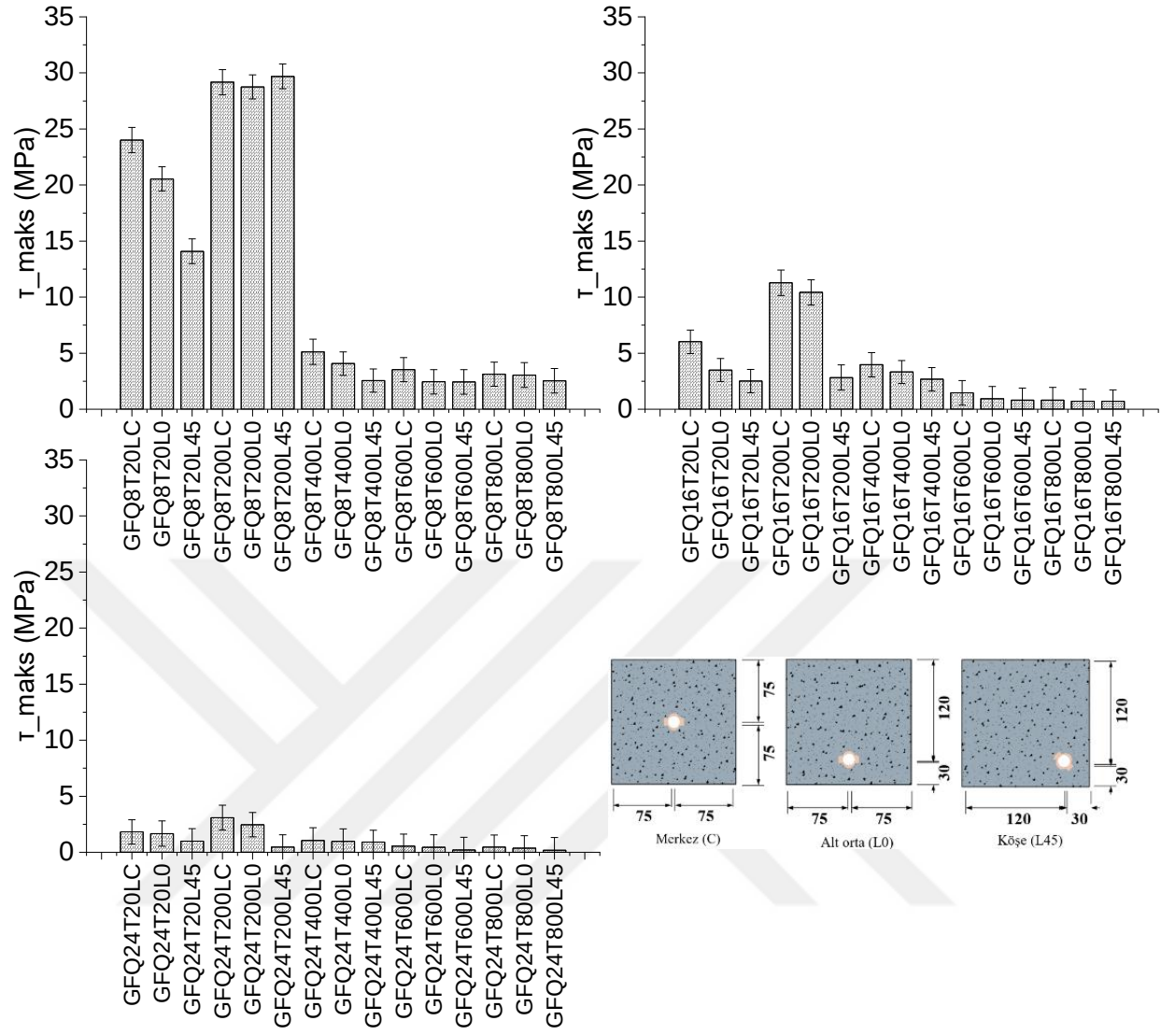
Tablo 17. Cam Lifli ve 8 mm, 16 mm ve 24 mm Donatı Çaplı Numunelerin Aderans Dayanımı Karşılaştırması

Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	(%) ^{8-16*}	(%) ^{8-24**}	(%) ^{16-24**}
GFQ8T20LC	24,01	GFQ16T20LC	6,02	GFQ24T20LC	1,82	74,93	92,42	69,77
GFQ8T20L0	20,54	GFQ16T20L0	3,5	GFQ24T20L0	1,67	82,96	91,87	52,29
GFQ8T20L45	14,09	GFQ16T20L45	2,51	GFQ24T20L45	0,99	82,19	92,97	60,56
GFQ8T200LC	29,17	GFQ16T200LC	11,28	GFQ24T200LC	3,09	61,33	89,41	72,61
GFQ8T200L0	28,75	GFQ16T200L0	10,42	GFQ24T200L0	2,46	63,76	91,44	76,39
GFQ8T200L45	29,69	GFQ16T200L45	2,83	GFQ24T200L45	0,46	90,47	98,45	83,75
GFQ8T400LC	5,12	GFQ16T400LC	3,97	GFQ24T400LC	1,05	22,46	79,49	73,55
GFQ8T400L0	4,07	GFQ16T400L0	3,32	GFQ24T400L0	0,97	18,43	76,17	70,78
GFQ8T400L45	2,56	GFQ16T400L45	2,67	GFQ24T400L45	0,92	-4,30	64,06	65,54
GFQ8T600LC	3,53	GFQ16T600LC	1,46	GFQ24T600LC	0,54	58,64	84,70	63,01
GFQ8T600L0	2,45	GFQ16T600L0	0,94	GFQ24T600L0	0,45	61,63	81,63	52,13
GFQ8T600L45	2,43	GFQ16T600L45	0,81	GFQ24T600L45	0,21	66,67	91,36	74,07
GFQ8T800L0	3,13	GFQ16T800LC	0,82	GFQ24T800LC	0,46	73,80	85,30	43,90
GFQ8T800L45	3,05	GFQ16T800L0	0,72	GFQ24T800L0	0,36	76,39	88,20	50,00
GFQ8T800LC	2,54	GFQ16T800L45	0,71	GFQ24T800L45	0,19	72,05	92,52	73,24
Maks.						90,47	98,45	83,75
Min.						-4,30	64,06	43,90
Ort.						60,09	86,67	65,44

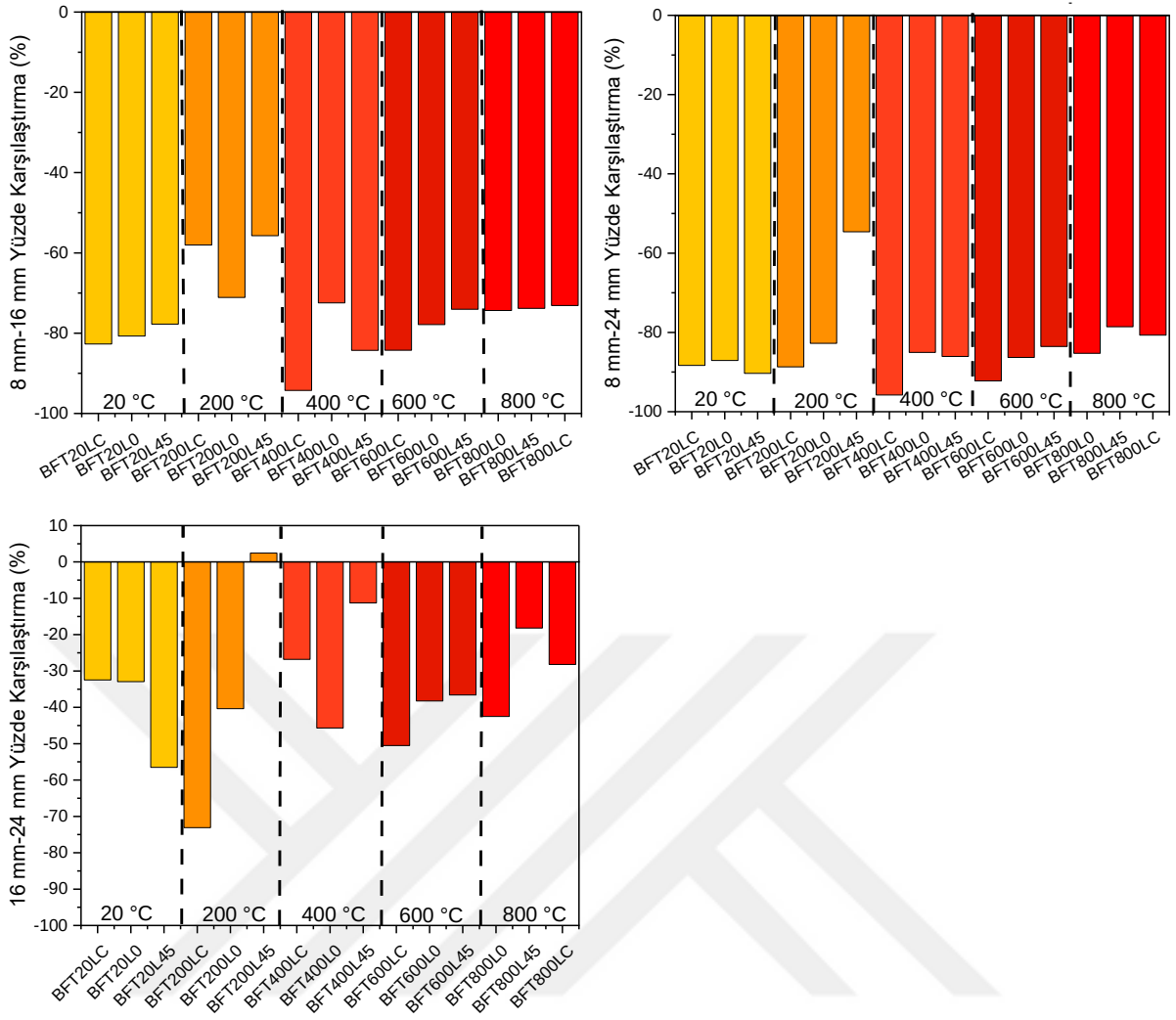
(%)^{8-16*}: 8 mm donatı çaplı numuneler ile 16 mm donatı çaplı numunelerin karşılaştırılması

(%)^{8-24*}: 8 mm donatı çaplı numuneler ile 24 mm donatı çaplı numunelerin karşılaştırılması

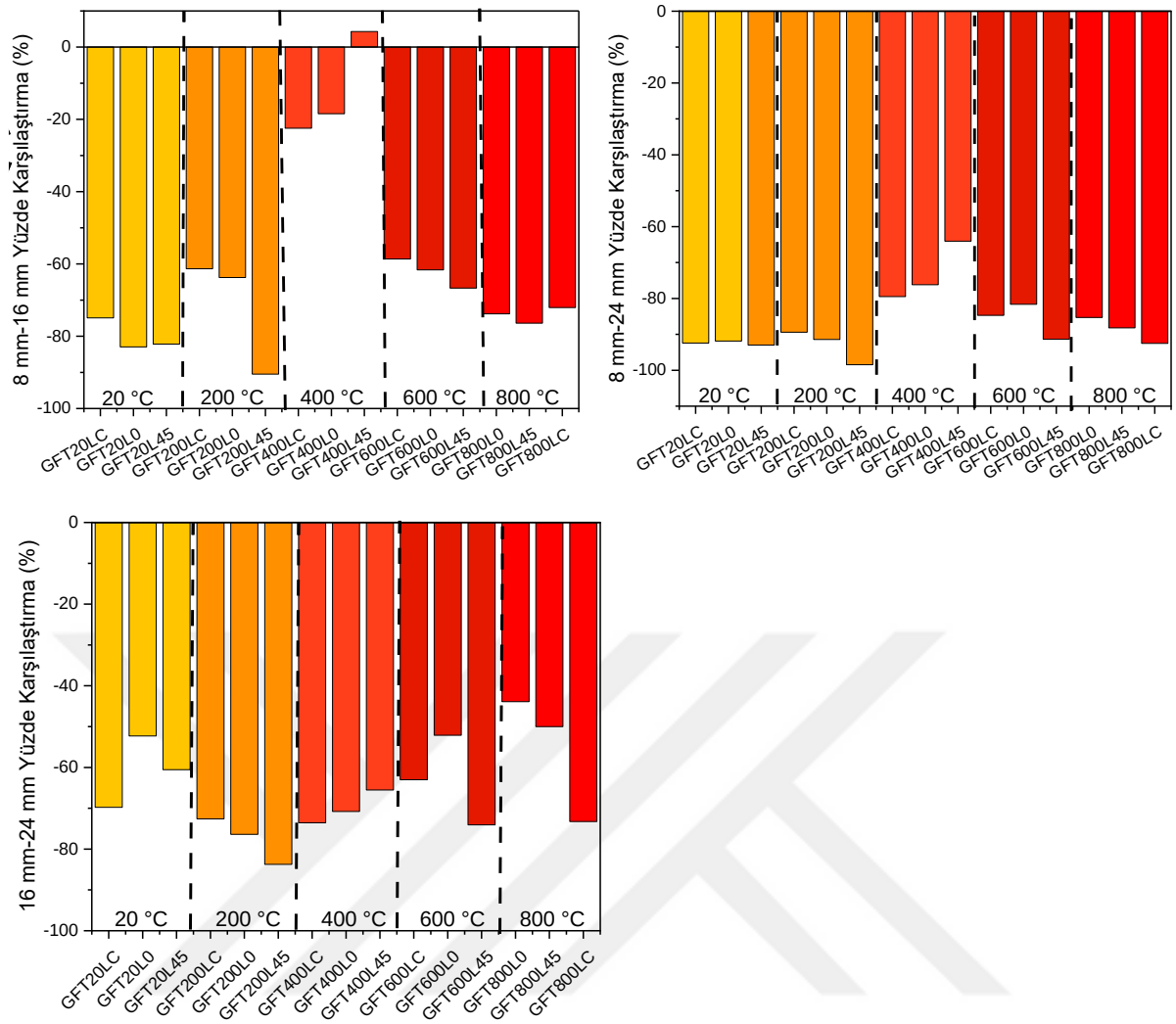
(%)^{16-24*}: 16 mm donatı çaplı numuneler ile 24 mm donatı çaplı numunelerin karşılaştırılması



Şekil 22. Cam lifli numunelerin donatı çapına göre maksimum aderans dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 23. Bazalt lifli numunelerde donatı çapının 8 mm' den 16 mm' ye arttırılması durumunda aderans dayanımındaki karşılaştırma



Şekil 24. Cam lifli numunelerde donatı çapının 8 mm' den 16 mm' ye artırılması durumunda aderans dayanımındaki karşılaştırma

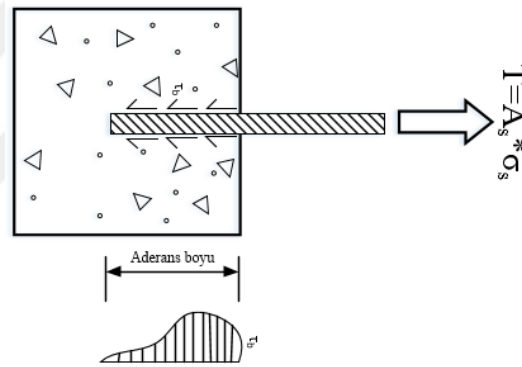
Bazalt lif kullanılan numuneler incelendiği zaman, 20 °C' de kür edilen numunelerde donatı çapının artması aderans dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu gruptaki numunelerde %90' a varan aderans dayanımında kayıplar görülmektedir. Benzer şekilde 200 °C' de kür edilen numunelerde de donatı çapının artması aderans dayanımını azaltmıştır. Fakat 200 °C' ye maruz kalan numuneler arasındaki dayanım kaybı, 20°C'de kür edilen numunelere göre daha az olmuştur. Bunun nedeninin numunelerin 200°C'de kür edilmesi durumunda betonun mekanik özelliklerinde iyileşmelerin gözlemlenmesi olabilmektedir. 200°C'de kür edilen numunelerin hem basınç hem de çekme dayanımlarında iyileşmeler olduğu basınç ve yarmada çekme deneyleri ile tespit edilmiştir. Beton fazının hem basınç hem de çekme mukavemetinin artması ile donatı etrafında oluşan asal çekme ve asal basınç gerilmeleri daha iyi bir şekilde karşılanmıştır. Donatı çapının artması ile aderans dayanımında beklenen ciddi azalmalar bu nedenle tolere edilmiştir. Diğer bir değişle 20°C'de kür edilen numunelerdeki donatı çapının artması ile aderans dayanımında yaklaşık %90' a varan aderans dayanım kaybı, 200°C'de kür edilen numunelerde %54 seviyesine kadar düşmüştür. Donatı çapının 8 mm' den 24 mm' ye

ıkarılması bazalt lifli tüm numunelerde 8 mm' den 16' mm çıkarılması durumuna göre daha fazla dayanım kaybına neden olmuştur. Bazalt lifli numunelerde donatı çapının maksimum etkisi BFQ8T400LC, BFQ16T400LC ve BFQ24T400LC numunelerinin karşılaştırılmasında ulaşılmıştır. Bu numuneler arasında donatı çapının 8 mm' den 16 mm ve 24 mm' ye arttırılması aderans dayanımını sırasıyla %94,26 ve %95,80 oranlarında azaltmıştır. Bazalt lifli numuneler arasında donatı çapındaki değişimin en az etkilendiği numuneler ise BFQ8T200L45, BFQ16T200L45 ve BFQ24T200L45' dir. Bu numuneler arasında donatı çapının 8 mm' den 16 mm ve 24 mm' ye arttırılması aderans dayanımını sırasıyla %55,70 ve %54,62 oranında azaltmıştır. Cam lifli numunelerde de donatı çapının artması aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur. Donatı çapının 8 mm' den 16 mm' ye arttırılma aderans dayanımını ortalama %60 oranında azaltmasına rağmen donatı çapının 16 mm' den 24 mm' ye arttırılması ise aderans dayanımını ortalama %65 oranında azaltmıştır. Cam lifli numuneler arasında donatı çapındaki değişimden en çok etkilenen numuneler ise GFQ8T200L45, GFQ16T200L45 ve GFQ16T200L45 numuneleri arasında gerçekleşmiştir.

Donatı çapının artması ile aderans dayanımının azalması arasındaki ilişkinin bu çalışma özelinde birkaç nedenin olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenler bir tanesi, aderans dayanımının donatının aderans boyu bölgesinde betona matrisi ile temas yüzey alanının olduğu düşünülmektedir. Bu da donatının birim hacmi başına yapışma yeteneği için daha az yüzey alanı olduğu anlamına gelir. Donatının çapının artması yüzey alanı-hacim oranı parametresinin azalmasına neden olacaktır. Tüm numunelerde aderans boyu, d donatı çapı olmak üzere 5d kadar bırakılmıştır. Dolayısıyla 8 mm, 16 mm ve 14 mm çaplı donatıların aderans boyu sırasıyla 40 mm, 80 mm ve 120 mm olarak bırakılmıştır. 24 mm çaplı donatılardaki temas yüzeyinin de diğer numunelerden daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sebepten dolayı donatı çapının 8 mm' den 24 mm arttırılması aderans dayanımında önemli azalmaların olmasına neden olmuştur. Fakat bazalt lifli numunelerin 200 C, cam lifli numunelerinde 400 C sıcaklığa maruz bırakılması durumunda donatı çapından kaynaklanan aderans dayanım azalmaları %50 seviyelerine kadar indirilmiştir. 200 C aderans dayanımının daha düşük azalma (%55,70 ve %54,62), daha düşük sıcaklıkların daha büyük donatı çaplarının bazı olumsuz etkilerini hafiflettiğini göstermektedir.

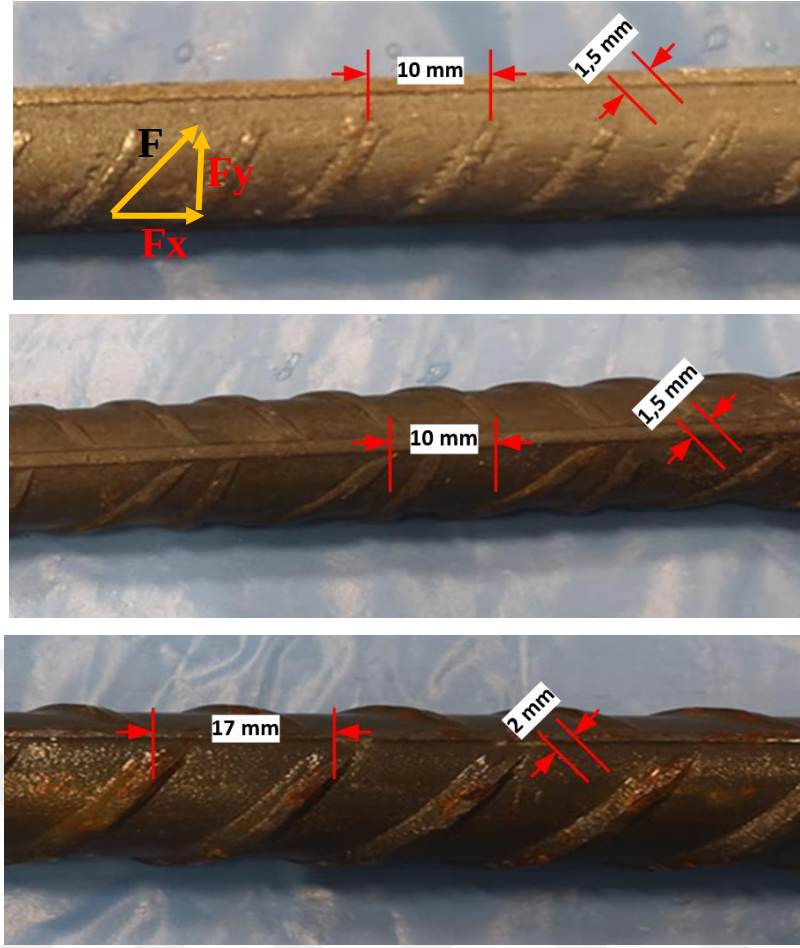
şekil 25' de kenetlenme boyunca donatı çubuğundaki aderans gerilme dağılımı gösterilmiştir. şekilden görüldüğü üzere donatıdaki gerilme dağılımı çubuk boyunca düzgün bir şekilde dağılmamaktadır. Bununla birlikte donatıdaki çekme kuvveti, donatı alanına yani donatı çapına bağlıdır. Donatı çapının artması donatıdaki çekme kuvvetini arttırmaktadır. Çalışmada kullanılan 8 mm, 16 mm ve 24 mm çapındaki donatılarda da donatı çapının artması,

sıyrılma için gerekli çekme kuvvetinin artmasına neden olmuştur. Yeterli kenetlenmenin de sağlanabilmesi için $\sigma_s = f_{yd}$ olması gerekmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan donatıların akma dayanımları ise bir birlerine yakın olmasından dolayı çekme kuvvetini belirleyen parametre donatı alanı yani donatı çapı olmaktadır. Çalışmada kullanılan 8 mm, 16 mm ve 24 mm çapındaki donatıların akma dayanımları sırasıyla 512 MPa, 463 MPa, 468 MPa' dır. Dolayısıyla donatı çapının artması aderans dayanımını arttırmıştır. Ayrıca Donatı çapı arttıkça aderansı sağlayan çevrenin, uygulanan en büyük kuvveti etkileyen alana oran ve yarıma gerilmeleri de değiştiğinden dolayı aderans azalmıştır. Bununla birlikte donatı çapının artması aderans boyunu da artırdığından beton matrisi ile donatı çubuğu arasındaki gerilme dağılımındaki düzensizliğin de artmasına neden olmuştur. Gerilme dağılımındaki düzensizlik ise aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur. Donatı çapı ile aderans dayanımı arasındaki ilişkiye etki eden bir diğer nedenin de donatıdaki kaldırma etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan donatı çapı ile artan kaldırma etkisinin de aderans dayanımı azalttığı düşünülmektedir.



Şekil 25. Aderans testi sırasında donatıdaki gerilme dağılımı

Şekil 26' da aderans deneyi sırasında donatının nervürleri arasındaki kuvvet dağılımları şematik olarak gösterilmiştir. Aderans deneyi esnasında donatı eksenine paralel asal çekme gerilmeleri (F_x), donatı eksenine dik olarak ise asal basınç gerilmeleri (F_y) meydana gelmiştir. Donatı çapının artması ile nervürler arasındaki mesafede artmaktadır. Bu çalışmada kullanılan farklı donatı çaplarının nervürleri arasındaki mesafeler de 8 mm için 10 mm, 16 mm için 10 mm ve 17 mm için 24 mm olarak ölçülmüştür. Donatı çapının artması nervürler arasındaki mesafenin arttırdığı görülmektedir. Nervürler arasındaki mesafenin artması ile bu yüzeydeki beton matrisi ile donatının temas yüzeyi ve dolayısıyla etki eden F kuvveti ve buna bağlı olarak da F kuvvetinin F_x ve F_y bileşenlerinin büyüklükleri de artmıştır. Artan kuvvetlerle birlikte bu yüzeydeki gerilmeler de artmış olup aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur.



Şekil 26. Donatı nervürleri arasındaki kuvvet dağılımı

Şekil 26’ da görülen şematik gösterimde bu nervürler arasında etki eden bir diğer faktörde yüksek sıcaklıktan kaynaklanan termal gerilmeler olmuştur. Yüksek sıcaklık kaynaklı termal gerilmeler artan donatı çapı ve buna bağlı olarak artan nervür aralığı ile daha fazla etkili olmuştur. Fakat bu etki cam ve bazalt liflerin etkinliği farklı şekilde ortaya çıkmıştır. Bazalt lif kullanılan numunelerde 400 °C ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde donatı çapının arttırılması ortalama olarak %80 civarında aderans dayanım kaybına neden olmasına karşın 800 °C sıcaklıktaki numunelerde bu azalış %75 seviyesindedir. Cam lifli numunelerde ise artan sıcaklık ile donatı çapındaki artış aderans dayanım kaybına neden olmuştur. 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalan cam lifli numunelerde donatı çapının artması aderans dayanımını sırasıyla ortalama olarak %50, %75 ve %80 seviyelerinde azalmasına neden olmuştur. Bir diğer etkenin ise bu nervür aralıklarında büzülme, çatlama veya faz dönüşümü etkilerinin daha belirgin ve daha çok olmasıdır.

Ulaşılan literatürde çalışmaların çoğunlukla donatı çapındaki artışın aderans dayanımını azalttığını vurgulamışlardır. Kammash ve Abdul-Husain (2022) çalışmalarında donatı çapındaki artışın aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Islam et al. (2020) de donatı çapının 10 mm, 12 mm, 16 mm ve 20 mm olarak artması durumunda aderans dayanımının

azaldığını belirtmişlerdir. Dewi ve Ekaputri (2017) uçucu kül esaslı geopolimer betonda donatı çapının artmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Li et al. (2024) de 16 mm ve 24 mm çapında donatıların geopolimer betonda kullanılması durumunda donatı çapının artmasının aderans dayanımını azalttığını deneysel çalışmalarında vurgulamışlardır. Banoth ve Agarwal (2024) yüksek sıcaklık etkisindeki normal betonda donatı çapının 12 mm' den 20 mm' ye artırılmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Literatürde ulaşılan benzer çalışmalarda da (Zhu et al. (2004); Dancygier et al. (2010); Prince ve Singh (2010); Issa ve Assaad (2015); Pop et al. (2015); Sabău et al. (2016); Pour ve Alam (2016); Osifala et al. (2017); Rafi (2018); Qi et al. (2021); Khaksefidi et al. (2021); Trabacchin et al. (2022)) donatı çapının artmasının aderans dayanımını azalttığı üzerinde durulmuştur. Yazarlar çalışmalarında normal betonda, kauçuklu betonda, uçucu kül esaslı geopolimer betonda vb. donatı çapının aderans dayanımı üzerindeki etkisi irdelenmiş olup donatı çapının artmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Sunulan çalışmada da cam ve bazalt lifli numunelerde de donatı çapının aderans dayanımını azalttığı sonucuna varılmıştır. Fakat literatürde donatı çapının artmasının aderans dayanımını arttırdığı yönde çalışmalara da rastlanılmıştır. Chinapaiya et al. (2020) uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan ürettikleri geopolimer betonda donatı çapının artmasının aderans dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Çalışmada 12 mm, 16 mm ve 24 mm çaplarında donatılar kullanılmış olup donatı çapının artmasının aderans dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Yoo ve Shin (2018) de donatı çapının artmasının aderans dayanımını arttırdığını fakat bu artışın düşük seviyelerde kaldığını belirtmişlerdir.

Lif türünün aderans performansına etkisinin incelenmesi

Deneysel çalışma kapsamında geopolimer beton karışımında lif türünün aderans performansı üzerindeki etkisinin araştırılması için cam ve bazalt olmak üzere iki farklı lif türü tercih edilmiştir. Karışımlarda işlenebilirlik ve yerleştirilebilirlik parametreleri de göz önüne alınarak hacimce %0,75 oranında cam ve bazalt lifler ayrı ayrı kullanılmıştır. **Tablo 18, 19 ve 20'** de farklı donatı çaplarındaki numunelerde lif türünün aderans dayanımına etkisi tablo olarak sunulmuştur. Bununla birlikte **Şekil 27, 28 ve 29'** de 8 mm, 16 mm ve 24 mm çaplı donatılarda lif türü aderans dayanımı ilişkisi grafiksel olarak sunulmuştur. **Şekil 30'** de ise bazal lifli ve cam lifli numunelerin aderans dayanımlarının karşılaştırılması oransal olarak sunulmuştur. **Tablo 18, 19 ve 20'** de bazalt lifli numunelerin aderans dayanımlarının cam lifli numunelerden fazla olması durumunda ilgili satır sarı renk ile vurgulanmıştır.

8 mm çaplı numuneler arasında lif türünün değiştirilmesi aderans dayanımı üzerinde farklı şekilde etki etmiştir. Özellikle 400 °C ve 600 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde bazalt lif kullanılması daha etkili olurken diğer numunelerde cam lif kullanılmasının aderans

dayanımı üzerinde daha etkili olmuştur. Bu durumun nedeninin liflerin termal ve mekanik özellikleri, lifler ile geopolimer matris arasındaki etkileşim ve yüksek sıcaklık değerlerinde matristeki değişimlerin neden olduğu düşünülmektedir. 400 °C ve 600 °C' de bazalt lifler yüksek bir termal kararlılığa sahip olmakla birlikte bu sıcaklık değerlerinde mekanik özelliklerini korumuşlardır. 800 °C' de ise bazalt liflerin özelliklerinde bozulmalar olabilmektedir. Cam lifli numuneler arasında ise 400 °C ve 600 °C sıcaklık değerlerinde mekanik özelliklerinde bozulmalar meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklık değerlerinde ayrıca geopolimer matrisinde içyapısında bozulmalar meydana geldiği yüksek ihtimalle düşünülmektedir. Farklı sıcaklık değerlerinde ise matristeki bu bozulmaların matris içerisindeki rastgele dağılan cam ve bazalt liflerin etkinliği de farklılık göstermiştir. 16 mm çaplı numuneler arasında ise cam lif kullanılımasının bazalt life göre etkinliği çok daha belirgindir. BFQ16T20L45 ve GFQ16T20L45 numunelerinin karşılaştırılması hariç 16 mm çaplı diğer tüm numunelerde cam lif kullanılması bazalt lif kullanılmasına göre aderans dayanımını arttırmıştır. 24 mm çaplı donatılar arasında ise lif kullanılımasının aderans dayanımı üzerinde 8 mm çaplı donatılarda olduğu gibi farklılık göstermektedir. Genel olarak 400 C sıcaklığa maruz kalan numunelerde cam lif etkili olmasına karşın bazalt diğer sıcaklık değerlerinde bazalt lif kullanılması daha etkili olmuştur.

Donatı çapındaki değişim ile hem aderans boyunda hem de matris ile yüzey alanında artış meydana gelmiştir. 8 mm, 16 mm ve 24 mm donatının nervürleri arasındaki mesafeler sırasıyla 7 mm, 10 mm ve 17 mm' dir. Ayrıca 8 mm, 16 mm ve 24 mm donatılı numunelerin aderans boyları da sırasıyla 40 mm, 80 mm ve 120 mm' dir. Bu sayısal değerlerden görüldüğü üzere hem donatı yüzeyi hem de donatı ile matrisin temas yüzeyi açısından donatı çapının artması ile artış olmuştur. Dolayısıyla bu bölgelerdeki liflerin etkinliği de farklılık göstermiştir.

Tablo 18. 8 mm çaplı Numuneler Arasında Lif Türünün Aderans Dayanımına Etkisi

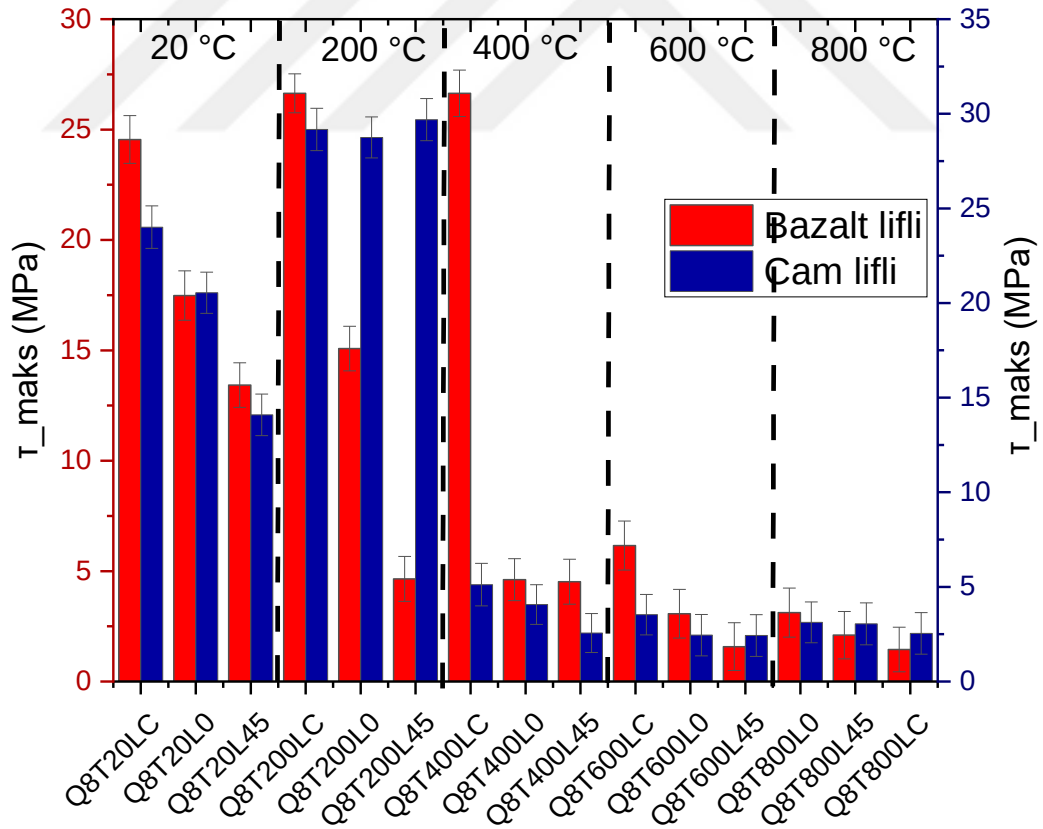
Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	τ_{bazalt}/τ_{cam}
BFQ8T20LC	24,55	GFQ8T20LC	24,01	1,02
BFQ8T20L0	17,48	GFQ8T20L0	20,54	0,85
BFQ8T20L45	13,43	GFQ8T20L45	14,09	0,95
BFQ8T200LC	26,64	GFQ8T200LC	29,17	0,91
BFQ8T200L0	15,08	GFQ8T200L0	28,75	0,52
BFQ8T200L45	4,65	GFQ8T200L45	29,69	0,16
BFQ8T400LC	26,64	GFQ8T400LC	5,12	5,20
BFQ8T400L0	4,61	GFQ8T400L0	4,07	1,13
BFQ8T400L45	4,52	GFQ8T400L45	2,56	1,77
BFQ8T600LC	6,16	GFQ8T600LC	3,53	1,75
BFQ8T600L0	3,07	GFQ8T600L0	2,45	1,25
BFQ8T600L45	1,58	GFQ8T600L45	2,43	0,65
BFQ8T800L0	3,12	GFQ8T800LC	3,13	1,00
BFQ8T800L45	2,10	GFQ8T800L0	3,05	0,69
BFQ8T800LC	1,45	GFQ8T800L45	2,54	0,57

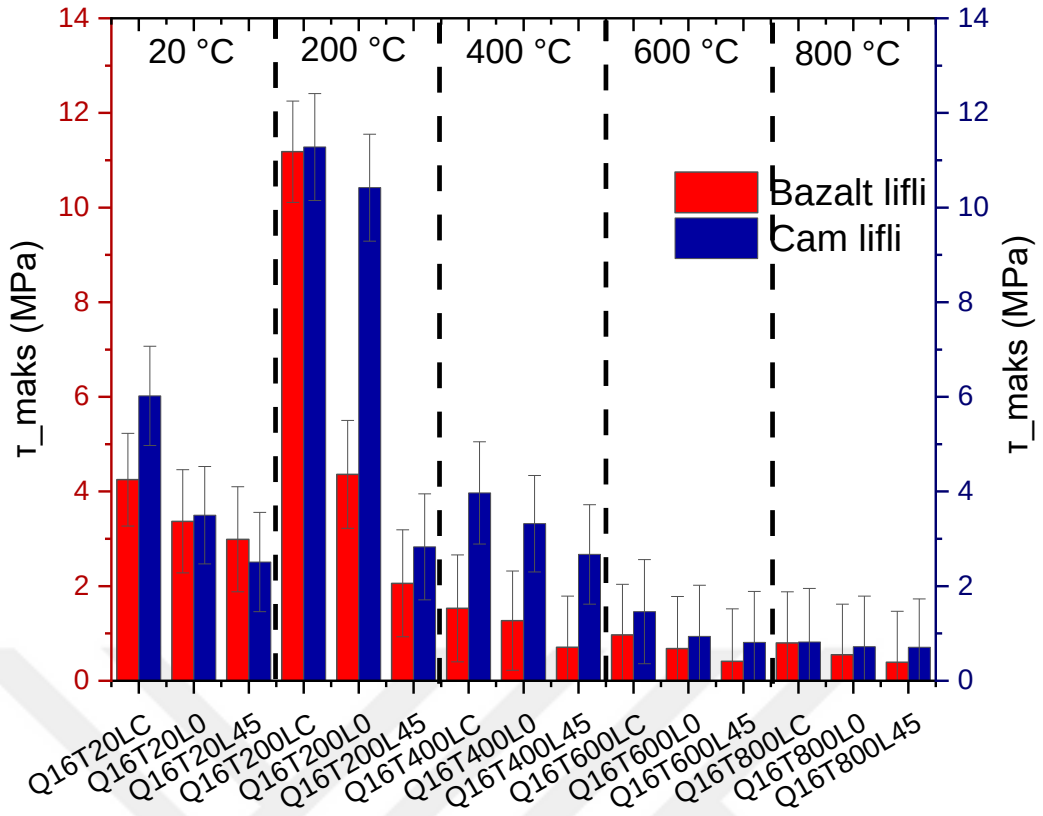
Tablo 19. 16 mm Çaplı Numuneler Arasında Lif Türünün Aderans Dayanımına Etkisi

Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	τ_{bazalt}/τ_{cam}
BFQ16T20LC	4,25	GFQ16T20LC	6,02	0,71
BFQ16T20L0	3,37	GFQ16T20L0	3,50	0,96
BFQ16T20L45	2,99	GFQ16T20L45	2,51	1,19
BFQ16T200LC	11,18	GFQ16T200LC	11,28	0,99
BFQ16T200L0	4,36	GFQ16T200L0	10,42	0,42
BFQ16T200L45	2,06	GFQ16T200L45	2,83	0,73
BFQ16T400LC	1,53	GFQ16T400LC	3,97	0,39
BFQ16T400L0	1,27	GFQ16T400L0	3,32	0,38
BFQ16T400L45	0,71	GFQ16T400L45	2,67	0,27
BFQ16T600LC	0,97	GFQ16T600LC	1,46	0,66
BFQ16T600L0	0,68	GFQ16T600L0	0,94	0,72
BFQ16T600L45	0,41	GFQ16T600L45	0,81	0,51
BFQ16T800L0	0,80	GFQ16T800LC	0,82	0,98
BFQ16T800L45	0,55	GFQ16T800L0	0,72	0,76
BFQ16T800LC	0,39	GFQ16T800L45	0,71	0,55

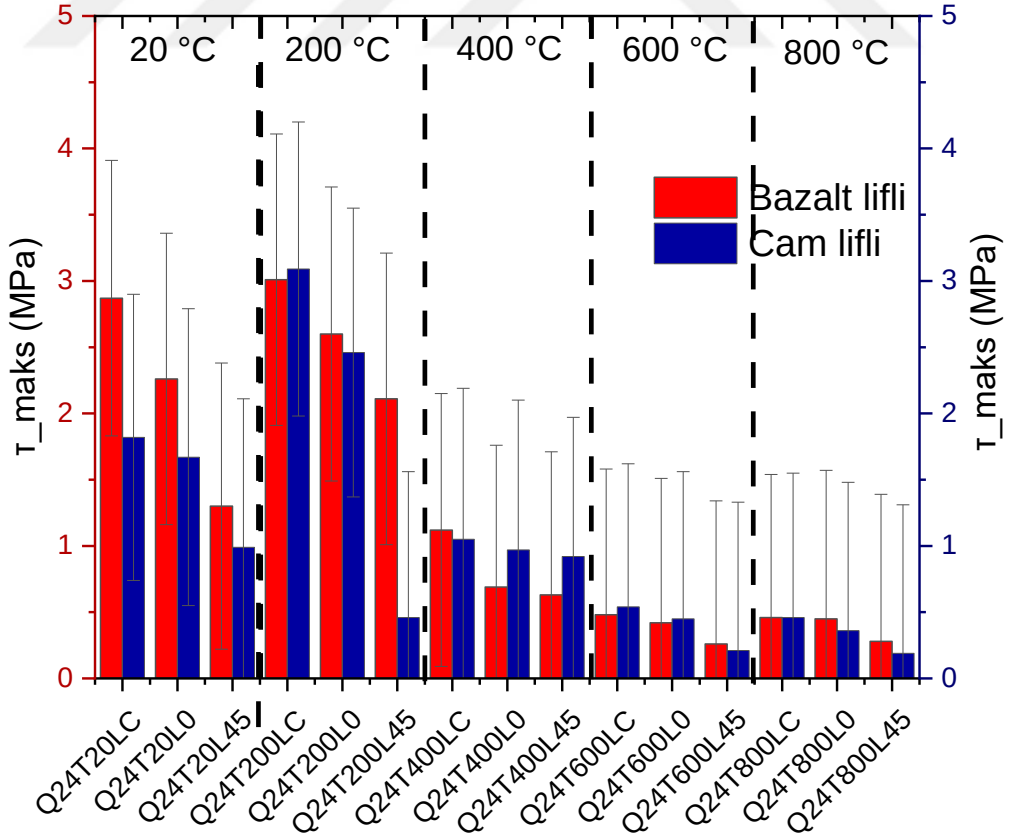
Tablo 20. 24 mm Çaplı Numuneler Arasında Lif Türünün Aderans Dayanımına Etkisi

Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	τ_{bazalt}/τ_{cam}
BFQ24T20LC	2,87	GFQ24T20LC	1,82	1,58
BFQ24T20L0	2,26	GFQ24T20L0	1,67	1,35
BFQ24T20L45	1,30	GFQ24T20L45	0,99	1,31
BFQ24T200LC	3,01	GFQ24T200LC	3,09	0,97
BFQ24T200L0	2,60	GFQ24T200L0	2,46	1,06
BFQ24T200L45	2,11	GFQ24T200L45	0,46	4,59
BFQ24T400LC	1,12	GFQ24T400LC	1,05	1,07
BFQ24T400L0	0,69	GFQ24T400L0	0,97	0,71
BFQ24T400L45	0,63	GFQ24T400L45	0,92	0,68
BFQ24T600LC	0,48	GFQ24T600LC	0,54	0,89
BFQ24T600L0	0,42	GFQ24T600L0	0,45	0,93
BFQ24T600L45	0,26	GFQ24T600L45	0,21	1,24
BFQ24T800L0	0,46	GFQ24T800LC	0,46	1,00
BFQ24T800L45	0,45	GFQ24T800L0	0,36	1,25
BFQ24T800LC	0,28	GFQ6T800L45	0,19	1,47

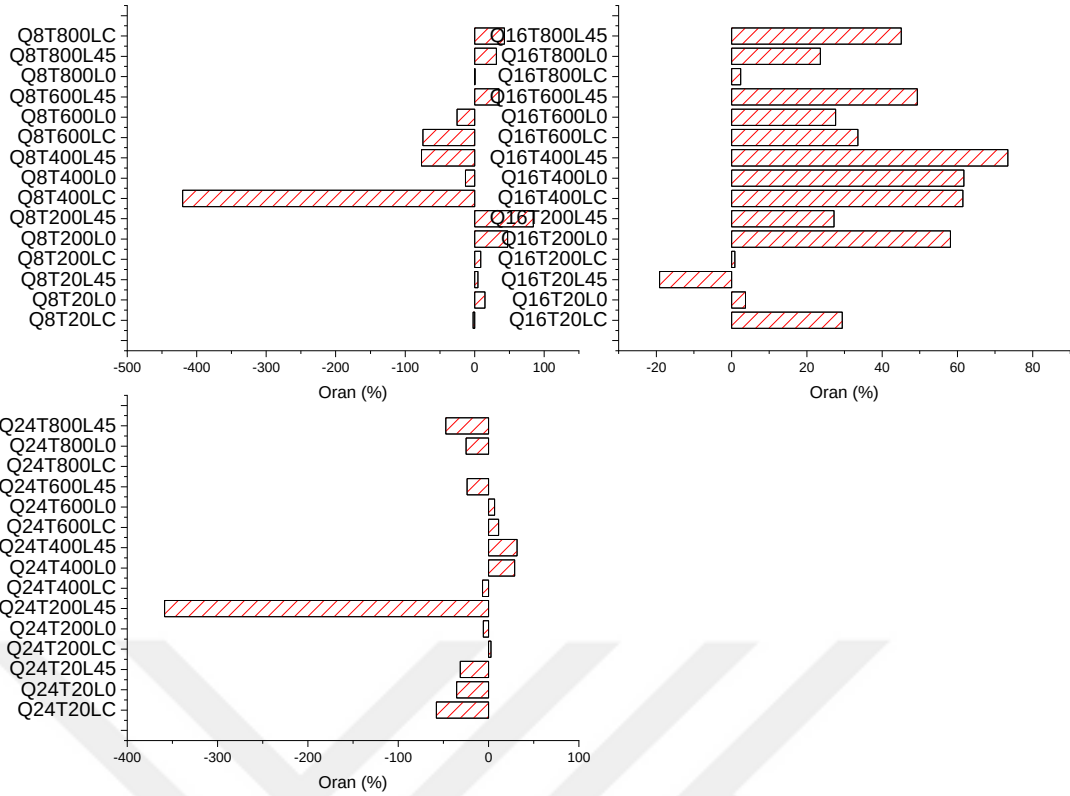
**Şekil 27.** 8 mm çaplı donatılarda lif türü aderans dayanımı ilişkisi



Şekil 28. 16 mm çaplı donatılarda lif türü aderans dayanımı ilişkisi



Şekil 29. 24 mm çaplı donatılarda lif türü aderans dayanımı ilişkisi

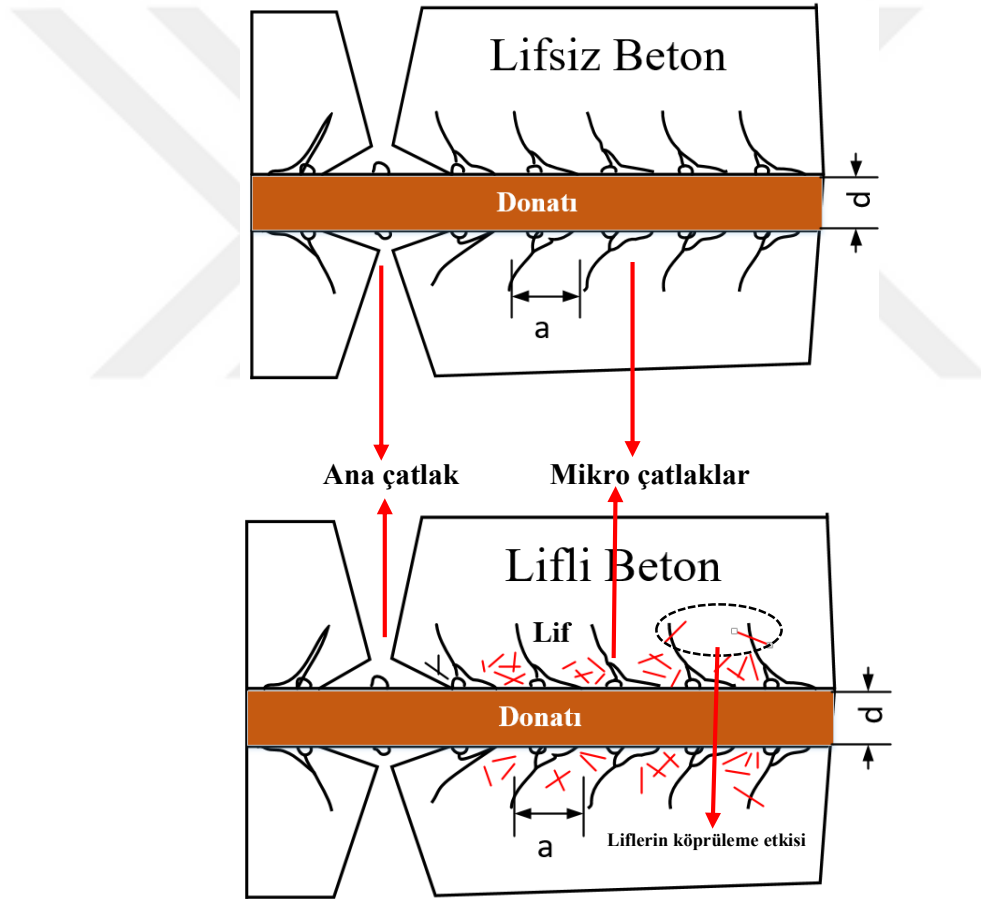


Şekil 30. Bazal lifli ve cam lifli numunelerin aderans dayanımlarının karşılaştırılması

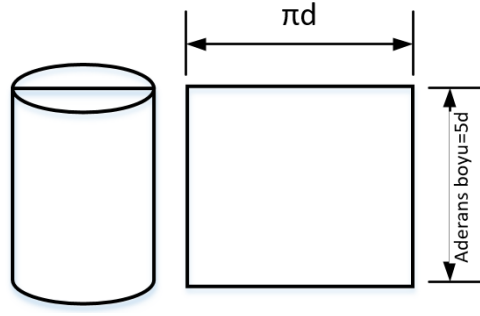
Geopolimer beton karışımında kullanılan liflerin aderans dayanımına etkisinin şematik olarak gösterimi **Şekil 31'** de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere aderans testi sırasında donatı ile beton matrisi temas yüzeyinde mikro düzeyde başlayan çatlaklar sıyrılma ile giderek artmaktadır. Lifi betonlarda donatı ile beton arasındaki aderans performansını üzerinde belirleyici etkisi olan bölgeler ise bu temas yüzeyleridir. Temas yüzeyi ise donatı çapının artması ile farklılık göstermektedir. **Şekil 31'** de a ve d ile gösterilen mesafeler farklılık göstermektedir. 24 mm çaplı donatılarda a mesafesi 17 mm iken 8 mm çaplı donatılarda a mesafesi 7 mm' ye düşmektedir. Ayrıca d mesafesinin değişmesi ile aderans boyu da değişmektedir. Temas yüzeyinin yaklaşık olarak hesaplanması da ((nervürlerin yüzey alanı iptal edildiğinde)) şematik olarak **Şekil 32'** de gösterilmiştir. **Şekil 31'** den görüldüğü üzere donatı çapının değişmesi temas yüzey alanını önemli ölçüde değiştirmektedir. 8 mm donatıda 1 cm² temas yüzeyi oluşurken, temas yüzeyi 16 mm donatı 4 katına, 24 mm donatıda ise 9 katına kadar çıkmaktadır. Bu temas yüzeylerindeki cam ve bazalt liflerin yüksek sıcaklıktaki davranışları da bir birlerinden farklı olmuştur. 8 mm ve 24 mm çaplı donatılarda cam ve bazalt liflerin aderans dayanımı üzerindeki etkisi değişmesine karşın 16 mm çaplı donatılarda cam liflerin etkinliği daha fazla olmuştur. Ayrıca yüksek sıcaklık değerlerinde liflerin termal hassasiyeti, matris içerisinde erimesi gibi nedenlerden dolayı lifler kendilerinden beklenen köprüleme etkisi, mikro çatlakların ilerlemesinin engellemesi gibi görevlerini yerine

getirmemişler ya da farklı donatı çapı ve sıcaklık değerinde lifler farklı performanslar sergilemişlerdir.

Yüksek sıcaklıklarda geopolimer matris içerisinde faz değişiklikleri ve buna bağlı olarak da kristalleşmeler meydana gelmiştir. Özellikle 800 °C gibi yüksek sıcaklık değerinde faz dönüşümleri içyapıya daha fazla zarar vermiş olabilir. Ayrıca cam lifler, 200 °C ve 400 °C gibi sıcaklıklarda önemli zararlar görmese de 600 °C ve daha yüksek sıcaklık değerlerinde bozulmaya uğramıştır. Bu liflerin bozulmaya uğraması da matris içerisindeki katkısını sınırlandırmıştır. Bazalt lifler ise cam liflere göre sıcaklık toleransı daha yüksek olmasına rağmen özellikle 800 °C gibi yüksek sıcaklık değerlerinde liflerde yumuşamalar meydana gelmiştir. Bu yumuşamalar nedeniyle de yapısal bütünlüğün bozulmasına neden olmuştur.



Şekil 31. Liflerin aderans dayanımına etkisinin şematik olarak gösterimi



$$\text{Yüzey alanı} = \pi \cdot d \cdot 5d = \pi * 2,4 * 5 * 2,4 = 9 \text{ cm}^2 \text{ (24 mm donatı için)}$$

$$= \pi * 1,6 * 5 * 1,6 = 4 \text{ cm}^2 \text{ (16 mm donatı için)}$$

$$= \pi * 0,8 * 5 * 0,8 = 1 \text{ cm}^2 \text{ (8 mm donatı için)}$$

Şekil 32. Aderans boyunca yüzey alanının hesaplanması

Ulaşılan literatürde El-Gamal (2014) ve Prasad et al. (2023), bazalt lifli geopolimer betonun aderans dayanımının artan sıcaklık veya sıcaklığa maruz kalma süresiyle azaldığını belirtmişlerdir. 100 °C ve 200 °C'ye 3 saat maruz kaldıktan sonra aderans dayanımında yaklaşık %20'lik bir azalma olduğunu belirtmişlerdir. 350 °C'ye 2 ve 3 saat maruz kalınması durumunda ise aderans dayanımında yaklaşık %50'lik önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Li et al. (2024) çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonda hacimce %0,75 oranında çelik lif kullanılmasının aderans dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Gao et al. (2024)'de benzer şekilde çelik lif kullanılmasının aderans dayanımını iyileştirdiğini belirtmişlerdir. Li et al. (2024) de geopolimer betonda çelik lif kullanılmasının aderans dayanımını artırdığı belirtmişlerdir. Sunulan çalışmadan da elde edilen veriler de ulaşılan literatürle paralellik göstermektedir. Elde edilen veriler ışığında lif kullanılmasının aderans dayanımını üzerinde olumlu bir etkisinin olduğu görülmektedir. Ulaşılan literatürde lifli betonların aderans dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesinde çelik lif türünün tercih edildiği görülmektedir. Sunulan çalışmada ise cam ve bazalt lifler kullanılarak literatürdeki bu boşluğun giderilmesi amaçlanmıştır.

Donatı konumunun aderans performansına etkisinin incelenmesi

Donatının kesitteki konumunun aderans dayanımı üzerindeki etkisinin incelenmesi için üç farklı yerleşim tercih edilmiştir. Öncelikle LC ile kodlanan numunelerde donatı küp numunenin orta noktasına yerleştirilmiştir. L0 ile kodlanan numunelerde ise donatı numunenin alt orta noktasına konumlandırılmıştır. L45 ile isimlendirilen numunelerde ise donatı köşe noktasına yerleştirilmiştir. Donatı konumunun aderans dayanımındaki etkisi ulaşılan literatürde pas payı ya da pas payı/donatı çapı vb. parametreler ışığında irdelenmiştir. Fakat bu çalışmada donatının konumu numune üzerinde farklı noktalara konumlandırılarak ele alınarak özgünlük katılmış olup literatürdeki bu boşluğun giderilmesi amaçlanmıştır. Donatı konumunun aderans

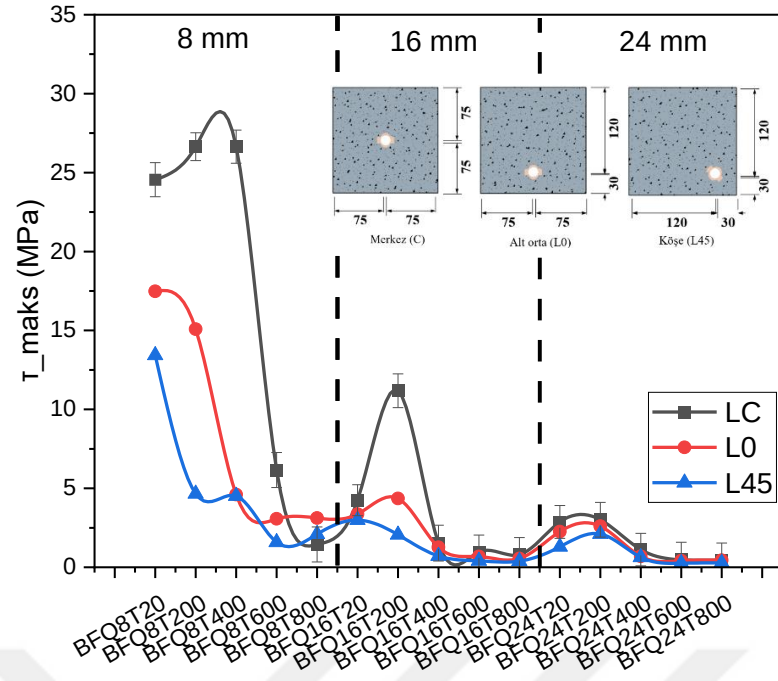
dayanımı üzerindeki etkisi **Tablo 21 ve Tablo 22'** de sunulmuştur. **Şekil 33 ve Şekil 34'** de bazalt ve cam lifli numunelerin donatı konumu aderans dayanımı arasındaki ilişki grafiksel olarak sunulmuştur. Ayrıca donatı konumunu aderans dayanımına etkisi oransal olarak **Şekil 35 ve Şekil 36'** da gösterilmiştir.

Tablo 21. Bazalt Lifli Numunelerde Donatı Konumunun Aderans Dayanımına Etkisi

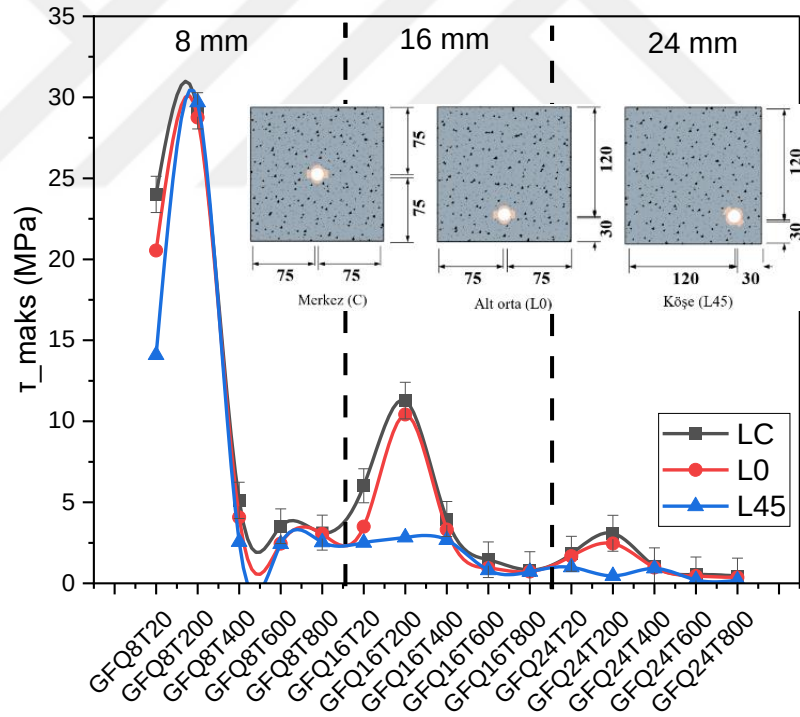
Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	$\tau_{LC/L0}$	$\tau_{LC/L45}$	$\tau_{L0/L45}$
BFQ8T20LC	24,55	BFQ8T20L0	17,48	BFQ8T20L45	13,43	1,40	1,83	1,30
BFQ8T200LC	26,64	BFQ8T200L0	15,08	BFQ8T200L45	4,65	1,77	5,73	3,24
BFQ8T400LC	26,64	BFQ8T400L0	4,61	BFQ8T400L45	4,52	5,78	5,89	1,02
BFQ8T600LC	6,16	BFQ8T600L0	3,07	BFQ8T600L45	1,58	2,01	3,90	1,94
BFQ8T800LC	1,45	BFQ8T800L0	3,12	BFQ8T800L45	2,1	0,46	0,69	1,49
BFQ16T20LC	4,25	BFQ16T20L0	3,37	BFQ16T20L45	2,99	1,26	1,42	1,13
BFQ16T200LC	11,18	BFQ16T200L0	4,36	BFQ16T200L45	2,06	2,56	5,43	2,12
BFQ16T400LC	1,53	BFQ16T400L0	1,27	BFQ16T400L45	0,71	1,20	2,15	1,79
BFQ16T600LC	0,97	BFQ16T600L0	0,68	BFQ16T600L45	0,41	1,43	2,37	1,66
BFQ16T800LC	0,8	BFQ16T800L0	0,55	BFQ16T800L45	0,39	1,45	2,05	1,41
BFQ24T20LC	2,87	BFQ24T20L0	2,26	BFQ24T20L45	1,3	1,27	2,21	1,74
BFQ24T200LC	3,01	BFQ24T200L0	2,6	BFQ24T200L45	2,11	1,16	1,43	1,23
BFQ24T400LC	1,12	BFQ24T400L0	0,69	BFQ24T400L45	0,63	1,62	1,78	1,10
BFQ24T600LC	0,48	BFQ24T600L0	0,42	BFQ24T600L45	0,26	1,14	1,85	1,62
BFQ24T800LC	0,46	BFQ24T800L0	0,45	BFQ24T800L45	0,28	1,02	1,64	1,61

Tablo 22. Cam Lifli Numunelerde Donatı Konumunun Aderans Dayanımına Etkisi

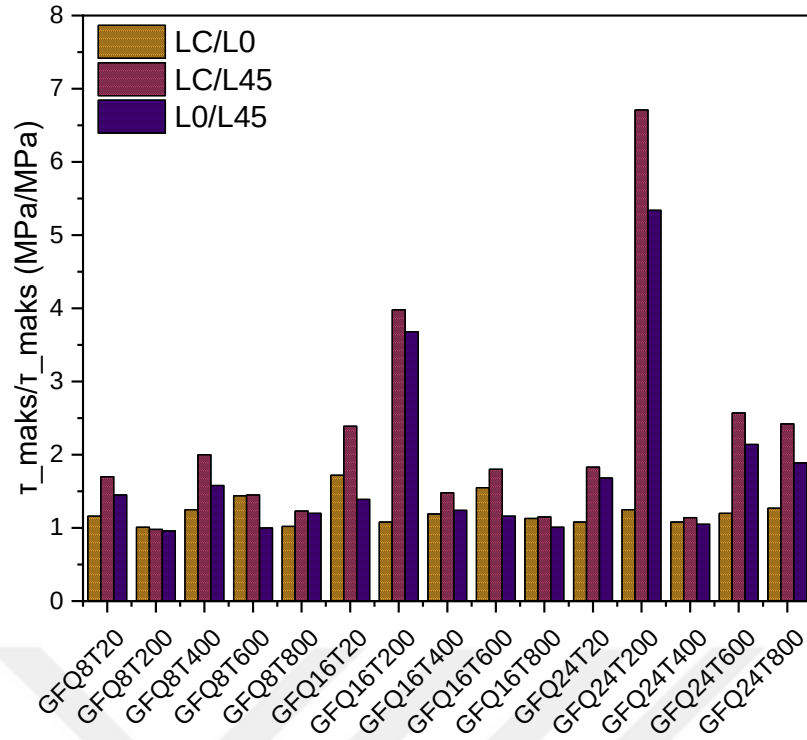
Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	$\tau_{LC/L0}$	$\tau_{LC/L45}$	$\tau_{L0/L45}$
GFQ8T20LC	24,01	GFQ8T20L0	20,54	GFQ8T20L45	14,09	1,17	1,70	1,46
GFQ8T200LC	29,17	GFQ8T200L0	28,75	GFQ8T200L45	29,69	1,01	0,98	0,97
GFQ8T400LC	5,12	GFQ8T400L0	4,07	GFQ8T400L45	2,56	1,26	2,00	1,59
GFQ8T600LC	3,53	GFQ8T600L0	2,45	GFQ8T600L45	2,43	1,44	1,45	1,01
GFQ8T800LC	3,13	GFQ8T800L0	3,05	GFQ8T800L45	2,54	1,03	1,23	1,20
GFQ16T20LC	6,02	GFQ16T20L0	3,5	GFQ16T20L45	2,51	1,72	2,40	1,39
GFQ16T200LC	11,28	GFQ16T200L0	10,42	GFQ16T200L45	2,83	1,08	3,99	3,68
GFQ16T400LC	3,97	GFQ16T400L0	3,32	GFQ16T400L45	2,67	1,20	1,49	1,24
GFQ16T600LC	1,46	GFQ16T600L0	0,94	GFQ16T600L45	0,81	1,55	1,80	1,16
GFQ16T800LC	0,82	GFQ16T800L0	0,72	GFQ16T800L45	0,71	1,14	1,15	1,01
GFQ24T20LC	1,82	GFQ24T20L0	1,67	GFQ24T20L45	0,99	1,09	1,84	1,69
GFQ24T200LC	3,09	GFQ24T200L0	2,46	GFQ24T200L45	0,46	1,26	6,72	5,35
GFQ24T400LC	1,05	GFQ24T400L0	0,97	GFQ24T400L45	0,92	1,08	1,14	1,05
GFQ24T600LC	0,54	GFQ24T600L0	0,45	GFQ24T600L45	0,21	1,20	2,57	2,14
GFQ24T800LC	0,46	GFQ24T800L0	0,36	GFQ24T800L45	0,19	1,28	2,42	1,89



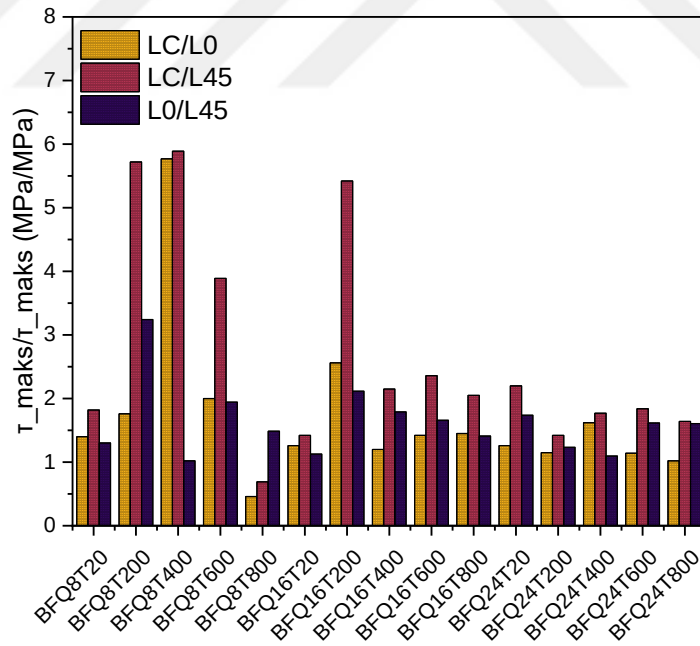
Şekil 33. Bazalt lifli numunelerin donatı konumu aderans dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 34. Cam lifli numunelerin donatı konumu aderans dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 35. Bazalt lifli numunelerde donatı konumunun aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi



Şekil 36. Bazalt lifli numunelerde donatı konumunun aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi

Bazalt lifli numunelerde donatı konumunun değiştirilmesinin aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bazalt lifli karışımlardaki numunelerde maruz kalınan sıcaklık değerinin değişmesi ile donatı konumunun etkisi de değişmektedir. 20 °C ortam kürüne maruz kalan numunelerde donatı konumunun merkezden, alt orta ve köşe

noktasına değiştirilmesi durumunda 1,02 ile 2,21 kat arasında dayanımda azalmaları meydana gelmiştir. 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatı konumunun LC' den L0 ve L45' e değiştirilmesi durumunda aderans dayanımı 1,16 ile 5,73 kat arasında azalmıştır. Benzer şekilde 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde de donatı konumunun LC' den L0 ve L45' e değiştirilmesi durumunda ise aderans dayanımı sırasıyla 1,02 ile 5,89; 1,14 ile 3,90; 1,02 ile 2,05 arasında azalmaktadır. Cam lifli numunelerde de donatı konumunun aderans dayanımı üzerinde etkisi görülmektedir. Bu numunelerde de değişen sıcaklık parametresi aderans dayanımındaki azalmaya neden olmuştur. 20 °C ortam k r ne ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatı konumunun LC' den L0 ve L45' e değiştirilmesi aderans dayanımını sırasıyla 1,09 ile 2,40; 1,01 ile 6,72 kat azalmasına neden olmuştur. Benzer durum 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalınması durumunda aderans dayanımı sırasıyla 1,05 ile 2,00; 1,01 ile 2,57; 1,03 ile 2,42 kat azalmıştır.

Bu durumun nedenlerinde bir tanesi merkez noktaya konumlandırılan numunelerde donatının etrafındaki gerilme dağılımı diğer durumlara göre daha uniform şekilde dağılmıştır. Böylece matris ile donatı arasındaki uyum daha etkili bir şekilde olmuştur. Alt orta nokta ve köşe noktaya konumlandırılan numunelerde de donatı etrafındaki gerilme dağılımı daha ununiform şekilde olmuştur. Böylece bu numunelerdeki aderans dayanımındaki azalmalar gözlemlenmiştir. L0 ve L45 konumundaki numunelerde donatı etrafında gerilme dağılımları daha fazla olmuş olup bu gerilmeler donatı boyunca da eşit ve düzgün bir şekilde dağılmamıştır. Artan sıcaklıkla birlikte hem beton fazının mekanik özelliklerinde önemli kayıplar, düzgün olmayan ve bazı bölgelerde yoğunlaşan gerilmeler üzerinde daha etkili olmuştur. Böylece L0 ve L45 numunelerinde önemli aderans dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda küp numunelerin dış yüzeyleri i  yüzeye doğru daha fazla sıcaklığa maruz kalmış olabilir. Bu durumunda L0 ve L45 numunelerinde termal gerilmelerin daha fazla olmasına ve bundan kaynaklı artan yerel gerilemelere neden olmuştur. L0 ve L45 numunelerinde donatının beton fazı ile teması daha az etkili olmuştur. L0 numunesinde donatı ile kesit arasındaki mesafe 75x30 mm olmasına karşın L45 numunelerinde bu mesafe 30x30 mm olmuştur. Azalan beton faz alanı aderans dayanımında azalmalara neden olmuştur.

Donatını konumu ile donatı çapı arasındaki ilişkiye bakıldığı zaman donatı çapının artması ile donatı konumundan kaynaklanan aderans dayanım kaybı azalmaktadır. 8 mm çaplı donatılarda donatı konumundan kaynaklanan dayanım kaybı fazla olmasına rağmen 24 mm çaplı donatılarda bu dayanım kaybı azalmaktadır. Hatta 24 mm çaplı donatılarda maruz kalınan sıcaklığın artması ile aradaki dayanım kaybı farkı daha da azalmaktadır. Bu durum hem bazalt hem de cam lifli numuneler arasında da gözlemlenmiştir. Çünkü yüksek sıcaklıklarda beton

fazında ciddi zararlar oluşturmuştur. Bu zararlardan dolayı da bu sıcaklık değerlerindeki aderans dayanımları olduksa dūřuk seviyelerde kalmıştır. Beton fazındaki zarardan dolayı donatı konumunun etkinliği ortaya çıkmadan numuneler gōęme moduna ulaşmıştır.

Ulaşılan literatürde Lin and Zhao (2016) pas payının arttırılmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmiştir. Yoo and Shin (2018) ultra yüksek dayanımlı betonlarda pas payı ile aderans dayanımı arasındaki ilişkiyi ele almışlardır. Çalışma sonucunda pas payının azalmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Sharma et al. (2019) da farklı sıcaklık değerlerine maruz kalan beton numunelerinde pas payının aderans dayanımına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada da pas payının artmasının aderans dayanımı azalttığını belirtmişlerdir. Sunulan bu yüksek lisans tez çalışmasında da pas payı donatı konumu olarak ele alınmış olup ulaşılan literatürle paralellik göstermektedir.

Yüksek sıcaklığın aderans performansına etkisinin incelenmesi

Geopolimer betonda yüksek sıcaklığın aderans performansına etkisinin incelenmesi için 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklık değerlerine maruz bırakılmıştır. Ayrıca bu sıcaklık değerlerine referans olması için de bazı numunelerde 20 °C ortam kürüne maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığın bazalt ve cam lifli gruplarda aderans dayanımına etkisi **Tablo 23** ve **Tablo 24'** da sunulmuştur. Ayrıca yüksek sıcaklığın aderans dayanımına etkisi **şekil 37** ve **şekil 38'** de grafiksel olarak da sunulmuştur. Bununla birlikte aderans dayanımı yüksek sıcaklık ilişkisi **şekil 39** ve **şekil 40'** de oransal olarak gösterilmiştir.

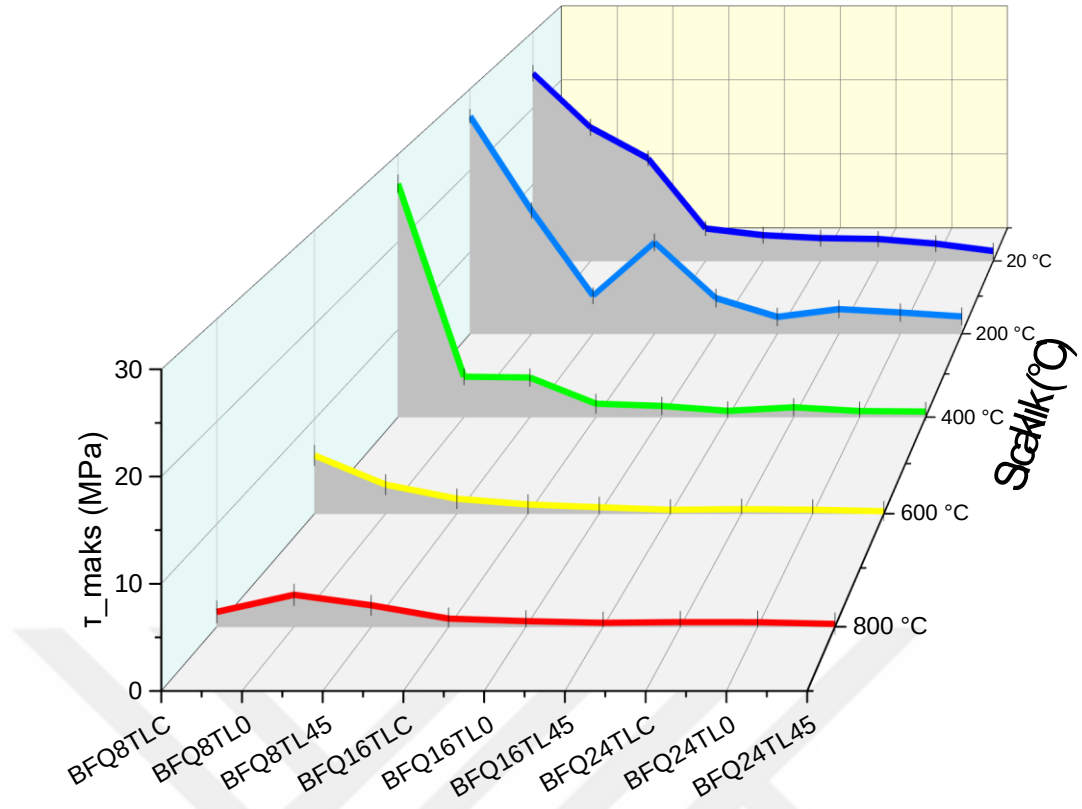
Tablo 23. Bazalt Lifli Numunelerde Yüksek Sıcaklığın Aderans Dayanımına Etkisi

Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	20/200 (%)	20/400 (%)	20/600 (%)	20/800 (%)
BFQ8T20LC	24,55	BFQ8T200LC	26,64	BFQ8T400LC	26,64	BFQ8T600LC	6,16	BFQ8T800LC	1,45	-8,51	-8,51	74,91	94,09
BFQ8T20L0	17,48	BFQ8T200L0	15,08	BFQ8T400L0	4,61	BFQ8T600L0	3,07	BFQ8T800L0	3,12	13,73	73,63	82,44	82,15
BFQ8T20L45	13,43	BFQ8T200L45	4,65	BFQ8T400L45	4,52	BFQ8T600L45	1,58	BFQ8T800L45	2,1	65,38	66,34	88,24	84,36
BFQ16T20LC	4,25	BFQ16T200LC	11,18	BFQ16T400LC	1,53	BFQ16T600LC	0,97	BFQ16T800LC	0,8	163,06	64,00	77,18	81,18
BFQ16T20L0	3,37	BFQ16T200L0	4,36	BFQ16T400L0	1,27	BFQ16T600L0	0,68	BFQ16T800L0	0,55	-29,38	62,31	79,82	83,68
BFQ16T20L45	2,99	BFQ16T200L45	2,06	BFQ16T400L45	0,71	BFQ16T600L45	0,41	BFQ16T800L45	0,39	31,10	76,25	86,29	86,96
BFQ24T20LC	2,87	BFQ24T200LC	3,01	BFQ24T400LC	1,12	BFQ24T600LC	0,48	BFQ24T800LC	0,46	-4,88	60,98	83,28	83,97
BFQ24T20L0	2,26	BFQ24T200L0	2,6	BFQ24T400L0	0,69	BFQ24T600L0	0,42	BFQ24T800L0	0,45	-15,04	69,47	81,42	80,09
BFQ24T20L45	1,3	BFQ24T200L45	2,11	BFQ24T400L45	0,63	BFQ24T600L45	0,26	BFQ24T800L45	0,28	-62,31	51,54	80,00	78,46

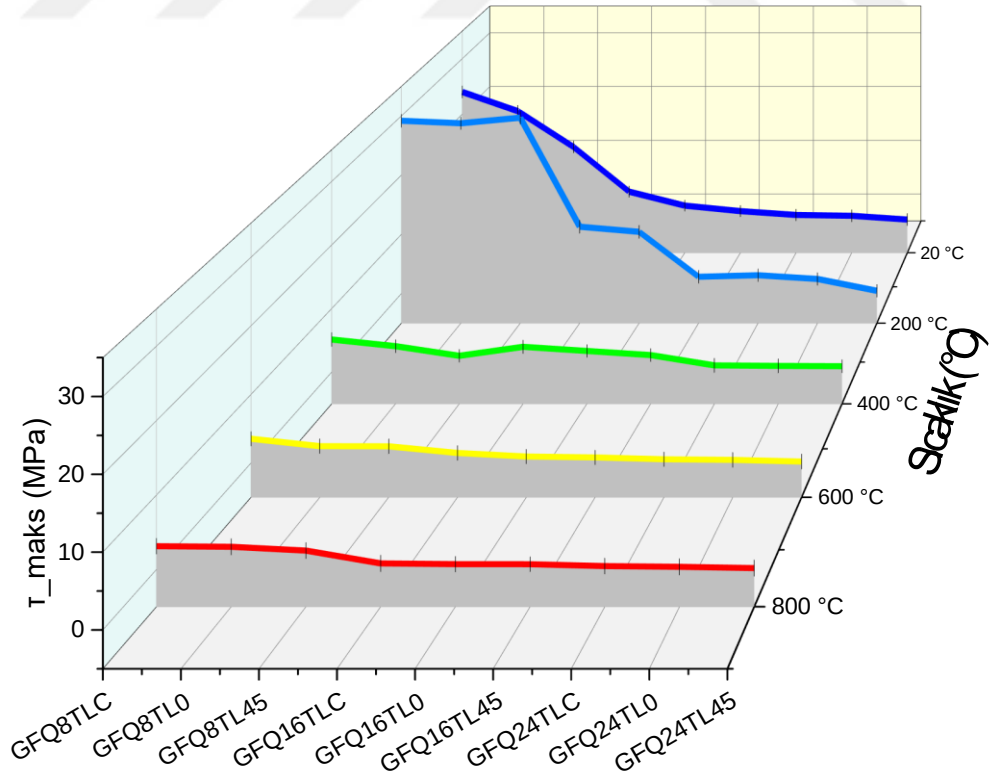
78

Tablo 24. Cam Lifli Numunelerde Yüksek Sıcaklığın Aderans Dayanımına Etkisi

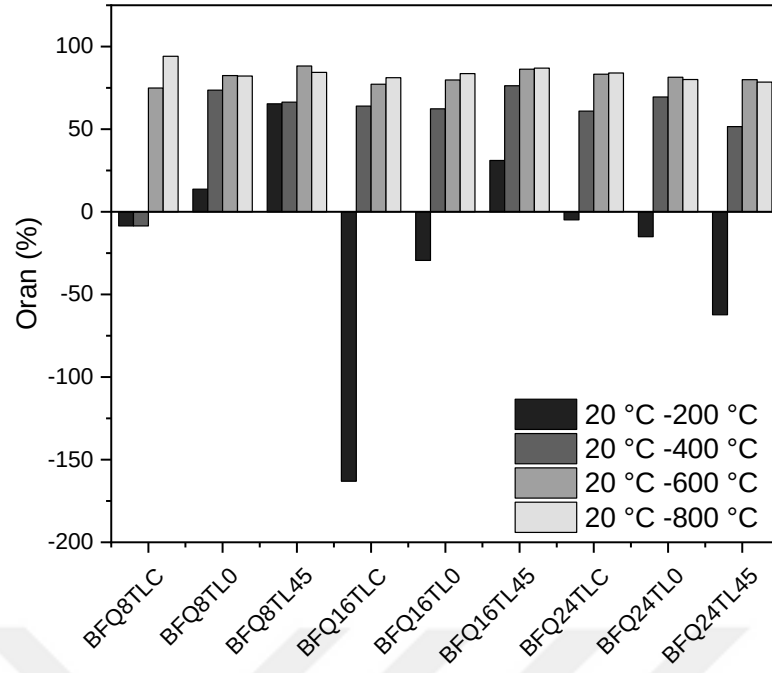
Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	Numune kodu	τ_{maks} (MPa)	20/200 (%)	20/400 (%)	20/600 (%)	20/800 (%)
GFQ8T20LC	24,01	GFQ8T200LC	29,17	GFQ8T400LC	5,12	GFQ8T600LC	3,53	GFQ8T800LC	3,13	-21,49	78,68	85,30	86,96
GFQ8T20L0	20,54	GFQ8T200L0	28,75	GFQ8T400L0	4,07	GFQ8T600L0	2,45	GFQ8T800L0	3,05	-39,97	80,19	88,07	85,15
GFQ8T20L45	14,09	GFQ8T200L45	29,69	GFQ8T400L45	2,56	GFQ8T600L45	2,43	GFQ8T800L45	2,54	110,72	81,83	82,75	81,97
GFQ16T20LC	6,02	GFQ16T200LC	11,28	GFQ16T400LC	3,97	GFQ16T600LC	1,46	GFQ16T800LC	0,82	-87,38	34,05	75,75	86,38
GFQ16T20L0	3,5	GFQ16T200L0	10,42	GFQ16T400L0	3,32	GFQ16T600L0	0,94	GFQ16T800L0	0,72	197,71	5,14	73,14	79,43
GFQ16T20L45	2,51	GFQ16T200L45	2,83	GFQ16T400L45	2,67	GFQ16T600L45	0,81	GFQ16T800L45	0,71	-12,75	-6,37	67,73	71,71
GFQ24T20LC	1,82	GFQ24T200LC	3,09	GFQ24T400LC	1,05	GFQ24T600LC	0,54	GFQ24T800LC	0,46	-69,78	42,31	70,33	74,73
GFQ24T20L0	1,67	GFQ24T200L0	2,46	GFQ24T400L0	0,97	GFQ24T600L0	0,45	GFQ24T800L0	0,36	-47,31	41,92	73,05	78,44
GFQ24T20L45	0,99	GFQ24T200L45	0,46	GFQ24T400L45	0,92	GFQ24T600L45	0,21	GFQ24T800L45	0,19	53,54	7,07	78,79	80,81



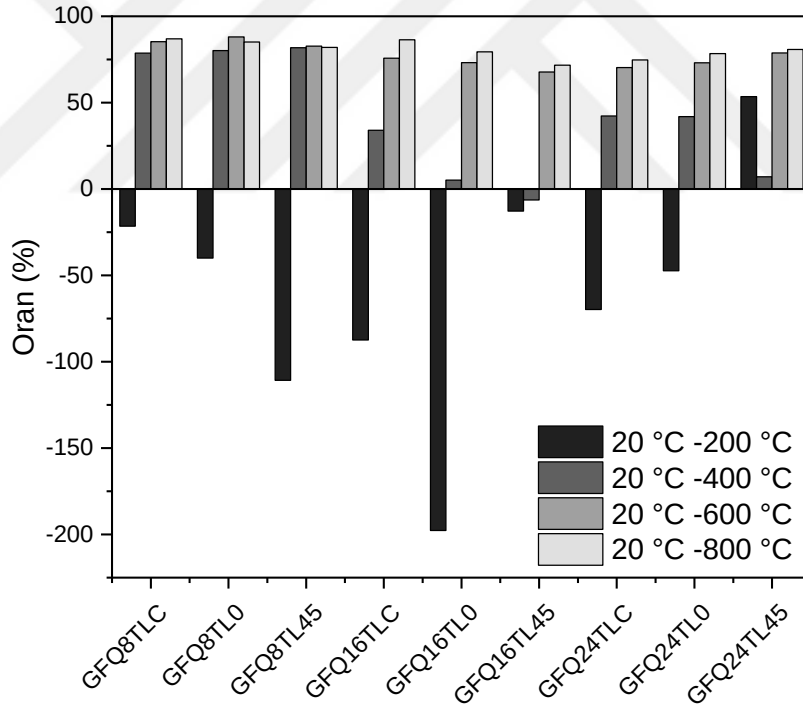
Şekil 37. Bazalt lifli numunelerde sıcaklık aderans dayanımı ilişkisi



Şekil 38. Cam lifli numunelerde sıcaklık aderans dayanımı ilişkisi



Şekil 39. Bazalt lifli numunelerde yüksek sıcaklığın aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi



Şekil 40. Cam lifli numunelerde yüksek sıcaklığın aderans dayanımına etkisinin oransal olarak gösterimi

Hem cam lifli hem de bazalt lifli numunelerde sıcaklığın artması aderans dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. Bazalt lifli numunelerde sıcaklığın 20°C'den 800' ye arttırılması durumunda aderans dayanımında %94' e varan dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Benzer şekilde cam lifli numunelerde ise sıcaklığın 20°C'den 800°C'ye çıkarılması durumunda aderans dayanımında %86' ya varan aderans dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Maruz kalınan

sıcaklığın 200°C'ye arttırılması durumunda ise bazı numunelerin aderans dayanımlarında artışlar görülmektedir. Bu numunelerin özellikle beton fazında 200°C'de mekanik özelliklerinin iyileşmesinin etkisi olmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde aderans dayanım kaybında donatı çapının da etkisinin olduğu görülmektedir. Bazalt lifli numunelerde sıcaklığın 20°C'den yüksek sıcaklıklara arttırılması durumunda 8 mm çaplı donatılarda ortalama %72 oranında aderans dayanım kaybı meydana gelmiştir. 16 mm ve 24 mm çaplı donatılarda ise ortalama %72 ve %74 oranlarında aderans dayanım kayıpları olmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere donatı çapı ve maruz kalınan sıcaklığın artması durumunda dayanım kaybı ile doğru orantılı artması beklenmektedir. Fakat donatı çapı sıcaklık ilişkisi her üç donatı çapında da bir birine yakın oranda azalmalar meydana gelmiştir. Bu da yüksek sıcaklıklarda beton matris ile donatı temas yüzeyinde bazalt liflerin etkili olduğunu ve iyi bir yapışma kabiliyeti sergilediğini göstermektedir. Cam lifli numunelerde ise sıcaklığın 20°C'den yüksek sıcaklık değerlerine çıkılması durumunda aderans dayanımında 8 mm çaplı donatılarda ortalama %83 oranında kayıp olmuştur. 16 mm ve 24 mm çaplı donatılarda ise aderans dayanım kayıpları %61 ve %60 oranındadır. Cam lifli numunelerde bazalt lifli numunelerden daha farklı bir performans görülmektedir. Düşük donatı çaplarında cam lifler fazla etkili olmamasına karşın donatı çapının artması durumunda etkinliği görülmüştür. Cam lifli numunelerde yüksek sıcaklık değerlerinde dayanım kayıpları bazalt lifli numunelere göre daha sınırlı olmuştur. Ayrıca donatı konumunun ise özellikle 600 °C ve 800 °C sıcaklık değerlerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu yüksek sıcaklık değerlerinde özellikle beton matrisindeki bozulmalar Donatı konumunun etkinliğinin ortaya çıkmasına izin vermemiştir.

Bazalt liflerin yüksek sıcaklık değerlerinde cam liflere göre daha fazla bozulmaya uğramış olabilirler. Bu da bazalt liflerin aderans uzunluğu boyunca yapışma yeteneğini sınırlandırmıştır. Cam lifler başlangıçta bazalt lifler kadar beton matrisle güçlü ve etkili kimyasal bağlar oluşturmayabilir. Ancak yüksek sıcaklıklarda cam liflerin arayüzü daha viskoz hale gelebilir veya matristeki değişikliklere uyum sağlama kabiliyeti daha fazla olabilir. Ayrıca yüksek sıcaklıkla aderans dayanımının azalması durumu ise yüksek sıcaklık değerlerinde geopolimer matristeki kimyasal bağların zayıflamasına ve daha kırılgan olmasına neden olmuştur. Mikro düzeyde başlayan çatlakların ise zayıflayan bu matris içerisinde ilerlemesi daha kolay olmuştur. Böylece yüksek sıcaklık değerlerinde aderans dayanımında önemli bir azalmalar meydana gelmiştir. Ulaşılan literatürde de yüksek sıcaklığın aderans dayanımına etkisi irdelenmiş olup elde edilen sonuçlar sunulan çalışma ile paralellik göstermektedir. Ulaşılan literatürde geopolimer betonun farklı parametreleri veya farklı geometrik parametreler göz önüne alınmıştır. sunulan çalışmada ise bu parametreler farklılık göstermektedir.

Behforouz et al. (2023) yüksek sıcaklığa maruz kalan ve çimentonun uçucu kül ile yer değiştirilmesi sonucu elde edilen betonda sıcaklığın artmasının aderans dayanımını azalttığı belirtilmiştir. Liu et al. (2024) de maruz kalınan sıcaklığın artmasının aderans dayanımını azalttığını belirtmişlerdir. Li et al. (2023) benzer şekilde maruz kalınan sıcaklık değerinin artmasını aderans performansını olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Göçme modları ve çatlak dağılımları

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme testleri sırasında dört belirgin kırılma modu ortaya çıkmıştır. Bu modlar, *splitting failure* (S), *bond failure* (B) ya da bu iki durumun kombinasyonu (S-B) ve donatıda akma (Y) olarak sınıflandırıldı. Ayrılma *splitting failure* modunda, donatı çubuğunun yüzeyinde radyal çatlaklar oluşur ve daha sonra uzunlamasına yayılır. Bu, geopolimer betonun ani kırılmasına yol açar ve minimum donatı kayması gözlemlenir. Öte yandan, *bond failure*, geopolimer matris ile donatı arasındaki ara yüzde kesme kırılması olarak ortaya çıkar. Bu kırılma mod, görünür bir ayrılma çatlağı görünmese bile önemli miktarda donatı kayması ile karakterize edilir. Her numune türü için gözlemlenen kırılma modları **Tablo 14** ve **Tablo 15**' de ayrıntılı olarak belgelenmiştir. Ek olarak, aderans deneylerin sonra numunelerin fotoğraflar **Şekil N'** te gösterilmiştir. Aderans deneyi sonrasında numunelerin çoğunda *splitting failure* modu gözlemlenmiştir. Özellikle, takviye donatı çapı arttıkça, numune parçalanma derecesi de artmaktadır. 24 mm numuneler daha yüksek bir parçalanma sıklığı sergilerken, 8 mm çapında numunelerde daha az parçalanma gözlemlenmiştir. Ayrıca, çubuk çapındaki artış, numunelerin yüzey çatlak genişliğindeki bir artışa neden olmuştur. Özellikle, 8 mm çapındaki numuneler daha dar çatlaklar oluşurken, 16 mm ve 24 mm çapındaki numuneler daha geniş çatlaklar oluşmuştur. Bununla birlikte numunelerin sıcaklığa maruz kalma durumu ile çatlak dağılımı arasında da bir ilişkinin olduğu gözlemlenmiştir. Maruz kalınan sıcaklık değerinin artması betonda parçalanmalara neden olmuştur.

Aderans deneyi esnasında donatı eksenine paralel asal çekme gerilmeleri, donatı eksenine dik olarak ise asal basınç gerilmeleri meydana gelmiştir (**Şekil 41**). Numunenin yüzeyindeki bu çatlaklara donatı eksenine paralel olarak gelişen asal çekme gerilmeleri neden olmuştur. Donatı eksenine dik olan asal basınç gerilmeleri ise beton tarafından karşılanmıştır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere donatının beton içerisinden sıyrılması esnasında iki bileşen olan τ_b aderans gerilmeleri ile σ_y yarıma gerilmeleri meydana gelmiştir. σ_y yarıma gerilmeleri, donatıyı saran betonda çekme gerilmeleri oluşturmuştur. Oluşan bu çekme gerilmelerinin betonun asal çekme gerilmelerini aşması durumunda çatlaklar (yarılma) meydana gelmektedir. Bu gerilmelerden dolayı da numunelerde çatlaklar meydana gelmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Donatı çapı (8 mm, 16 mm ve 24 mm), donatının konumu, yüksek sıcaklık (20 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C) ve lif türünün (cam ve bazalt lif) aderans performansı üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi bu tez çalışmasının amacıdır. Bu amaç doğrultusunda 270 adet 150x150x150 mm boyutların küp numuneye aderans performansının değerlendirilmesi için pull-out testi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda aderans dayanımı-sıyrılma grafikleri, farklı parametrelerin maksimum aderans dayanımına etkisi ve göçme modları irdelenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında özetle aşağıdaki çıktılarına ulaşılmıştır.

- i. Cam lifli ve 8 mm donatı çaplı numunelerde aderans dayanımı-sıyrılma grafiklerinde, 20 °C ve 200 °C sıcaklığa maruz numunelerde donatı konumunun davranış üzerinde önemli bir etkisinin olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat bu etki artan sıcaklık ile önemini yitirmiştir. 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerde donatı konumunun davranış üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir.
- ii. Cam liften üretilen 16 mm çaplı donatılar ile 8 mm çaplı donatılar arasında aderans dayanımı-sıyrılma davranışı bakımında kıyaslama yapıldığı zaman 8 mm çaplı donatılarda 20 °C ve 200 °C sıcaklığa maruz kalan GFQ8T20LC, GFQ8T20LC, GFQ8T200LC, GFQ8T200L0 ve GFQ8T200L45 numunelerinde donatıda akma gözlemlenmesine karşın 16 mm çaplı donatılarda akma gözlemlenmemiştir. Buradan da donatı çapı, sıcaklık ve beton fazı arasındaki ilişkinin aderans davranışı üzerindeki etkisi görülmektedir. Ayrıca hem maruz kalınan sıcaklığın artması hem de donatı çapının artması numunelerin sıyrılma kapasitelerini sınırlamıştır.
- iii. Cam lifli numunelerde 200 °C sıcaklığa maruz kalan numunelerin üçünde de donatıda akma gerçekleşmiştir. Fakat bazalt lifli numunelerde hem 20 °C hem de 200 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler arasında sadece donatının merkeze konumlandırıldığı numunelerde donatıda akma olmuştur. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere cam lifli numunelerde donatının köşe ve kenar noktalarına konumlandırılan numunelerde beklenen aderans dayanım azalması cam liflerin mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklıktaki davranışları ile tolere edilebilmiştir. Fakat bazalt liflerde aynı durum meydana gelmemiştir. 600 °C ve 800 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin grafikleri sunulmuştur. Bu numuneler arasında donatı konumunun davranış üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Benzer özelliklerdeki cam lifli

numunelerde bu yüksek sıcaklık değerlerinde donatı konumunun önemli bir etkisini olmamasına karşın bazalt lifli numunelerde donatının konumu davranış üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

- iv. Bazalt lif kullanılan numuneler incelendiği zaman, 20 °C' de kür edilen numunelerde donatı çapının artması aderans dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu gruptaki numunelerde %90' a varan aderans dayanımında kayıplar görülmektedir. Benzer şekilde 200 °C' de kür edilen numunelerde de donatı çapının artması aderans dayanımını azaltmıştır. Fakat 200 °C' de kür edilen numuneler arasındaki dayanım kaybı, 20 °C ' de kür edilen numunelere göre daha az olmuştur. Cam lifli numunelerde de donatı çapının artması aderans dayanımının azalmasına neden olmuştur. Donatı çapının 8 mm' den 16 mm' ye arttırılma aderans dayanımını ortalama %60 oranında azaltmasına rağmen donatı çapının 16 mm' den 24 mm' ye arttırılması ise aderans dayanımını ortalama %65 oranında azaltmıştır. Cam lifli numuneler arasında donatı çapındaki değişimden en çok etkilenen numuneler ise GFQ8T200L45, GFQ16T200L45 ve GFQ16T200L45 numuneleri arasında gerçekleşmiştir. Bazalt lif kullanılan numunelerde 400 °C ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde donatı çapının arttırılması ortalama olarak %80 civarında aderans dayanım kaybına neden olmasına karşın 800 °C sıcaklıktaki numunelerde bu azalım %75 seviyesindedir. Cam lifli numunelerde ise artan sıcaklık ile donatı çapındaki artış aderans dayanım kaybına neden olmuştur. 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklığa maruz kalan cam lifli numunelerde donatı çapının artması aderans dayanımını sırasıyla ortalama olarak %50, %75 ve %80 seviyelerinde azalmasına neden olmuştur.
- v. 8 mm çaplı donatılar arasında (20 °C ve 200 °C) sıcaklık değerlerinde cam lifler etkili olurken 400 °C ve 600 °C sıcaklık değerlerinde ise bazalt lif kullanılması aderans dayanımını arttırmıştır. Donatı çapının artması ile lif türü aderans dayanımı arasındaki ilişki de değişmektedir. 16 mm çaplı donatılarda cam lif kullanılması bazalt life göre aderans dayanımı açısından oldukça etkili olmuştur. 24 mm çaplı donatılarda ise 8 mm çaplı donatılara benzer bir durum gözlemlenmiştir. Genel olarak 400 C sıcaklığa maruz kalan numunelerde cam lif etkili olmasına karşın bazalt diğer sıcaklık değerlerinde bazalt lif kullanılması daha etkili olmuştur.
- vi. Donatı konumunun değiştirilmesi hem bazalt hem de cam lifli numunelerde aderans dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Maksimum aderans dayanımı merkez noktasına konumlandırılan numunelerde elde edilmiştir. Donatı konumunun alt orta noktaya yerleştirilmesi durumunda bazalt lifli numunelerde 5 kata

kadar cam lifli numunelerde ise 6 kata kadar aderans dayanımında azalmaya neden olmuştur. Donatı konumunun orta alt noktadan köşe noktaya alınması durumunda da aderans dayanımında bazalt lifli numunelerde 7 kata cam lifli numunelerde 5 kata kadar azalmaya neden olmuştur. Donatının konumu ile donatı çapı arasındaki ilişkiye bakıldığında zaman donatı çapının artması ile donatı konumundan kaynaklanan aderans dayanım kaybı azalmaktadır. 8 mm çaplı donatılarda donatı konumundan kaynaklanan dayanım kaybı fazla olmasına rağmen 24 mm çaplı donatılarda bu dayanım kaybı azalmaktadır. Hatta 24 mm çaplı donatılarda maruz kalınan sıcaklığın artması ile aradaki dayanım kaybı farkı daha da azalmaktadır. Bu durum hem bazalt hem de cam lifli numuneler arasında da gözlemlenmiştir.

- vii. Hem cam lifli hem de bazalt lifli numunelerde sıcaklığın artması aderans dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. Bazalt lifli numunelerde sıcaklığın 20°C'den 800°C'ye arttırılması durumunda aderans dayanımında %94'e varan dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Benzer şekilde cam lifli numunelerde ise sıcaklığın 20°C'den 800°C'ye çıkarılması durumunda aderans dayanımında %86' ya varan aderans dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde aderans dayanım kaybında donatı çapının da etkisinin olduğu görülmektedir. Cam lifli numunelerde bazalt lifli numunelerden daha farklı bir performans görülmektedir. Düşük donatı çaplarında cam lifler fazla etkili olmamasına karşın donatı çapının artması durumunda etkinliği görülmüştür. Cam lifli numunelerde yüksek sıcaklık değerlerinde dayanım kayıpları bazalt lifli numunelere göre daha sınırlı olmuştur.

KAYNAKLAR

- ACI 440.3R-04. 2004. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- Alcan, H. G., Bayrak, B., Öz, A., Kavaz, E., Kaplan, G., Çelebi, O., & Aydın, A. C. 2023. A comprehensive characterization on geopolymer concretes with low content slag and quartz aggregates: the shielding features. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 178, 769-798.
- Alfouadi, W.K.A., 2020. Experimental And Finite Element Analysis Of Steel- Concrete Bond Behavior, Doktora tezi, Gaziantep Üniversitesi.
- Arslan, A. A., Uysal, M., Yılmaz, A., Al-Mashhadani, M. M., Canpolat, O., Şahin, F., Aygörmüş, 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.235>
- ASTM C618. 2003. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. American society for testing and materials. West Conshohocken, PA, USA ASTM International; 2003.
- ASTM C900-15. 2015. Standard test method for pullout strength of hardened concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- A. L. Sartori, L. M. Pinheiro, R. M. Da Silva, S. B. Freitas, and T. G. Cesar, 2017. Adherence between steel bars and lightweight concrete with EPS beads, *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, 10, 122–159.
- Ba, G., Weng, X., Liu, C., Miao, J. 2021. Bond strength of corroded reinforcements in concrete after high-temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 270, 121400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121400>
- Baena, M., Torres, L., Turon, A., & Barris, C. 2009. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Composites Part B: Engineering*, 40, 784-797. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.07.003>
- Bakis, C. E., Uppuluri, V. S., Nanni, A., Boothby, T. E., 1998. Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged frp rods embedded in concrete, *Composites Science and Technology*, 58, 1307-1319.
- Banoth, I., & Agarwal, A. 2024. Bond between deformed steel rebars and concrete at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 145, 104133. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104133>
- Bayrak, B., Benli, A., Alcan, H. G., Çelebi, O., Kaplan, G., Aydın, A. C. 2023. Recycling of waste marble powder and waste colemanite in ternary-blended green geopolymer composites: Mechanical, durability and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 73, 106661. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106661>
- Bayrak, B., Çelebi, O., Öz, A., Ustaş, İ., Kaplan, G., Aydın, A. C. 2023. Effect of aluminosilicate precursors and curing regime on physico-mechanical durability and microstructural characteristics of coral geopolymers (Cor-Geo) cleaner production for coral islands. *Construction and Building Materials*, 407, 133596.

- Bayrak, B., Kaplan, G., Öz, A., Kavaz, E., Çelebi, O., Alcan, H. G., Aydın, A. C. 2023. Metakaolin-based geopolymer concretes for nuclear protection on the perspective of physicochemical, durability, and microstructure. *Structural Concrete*, 24, 6644-6671.
- Behforouz, B., Tavakoli, D., Gharghani, M., Ashour, A. 2023. Bond strength of the interface between concrete substrate and overlay concrete containing fly ash exposed to high temperature. In *Structures* 49,183-197. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.122>
- Behnood, A., Ziari, H. 2008. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003>
- Boğa, A.R., 2005. Uçucu Küllü Betonarme Elemanlarda Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Yöntemlerle Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N., 1996, Betonarme Yapılar, Sema Matbaacılık, İstanbul, 852s.
- Chinapaiya, B., Parshwanath, R. N., Radhakrishnan, J., Thirunavukkarasu, R. 2020. Adhesive bond strength of steel bars embedded in fly ash-ggbs-based geopolymer concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 18, 716-729. [doi:10.3151/jact.18.716](https://doi.org/10.3151/jact.18.716)
- Çakmak A and M. Uysal, 2021. Geopolimer Beton ve Geleneksel Beton Üretim Süreçlerinden Kaynaklı CO2 Salınımının Metasezgisel Yöntemlerle Belirlenmesi,” *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10, 6-17.
- Dancygier, A. N., Katz, A., Wexler, U. 2010. Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers. *Materials and Structures*, 43, 839-856. [DOI 10.1617/s11527-009-9551-6](https://doi.org/10.1617/s11527-009-9551-6)
- Dewi, E. S., Ekaputri, J. J. 2017. The influence of plain bar on bond strength of geopolymer concrete. In *AIP Conference Proceedings* 1855, 1. <https://doi.org/10.1063/1.4985487>
- Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., ve Van Deventer, J.S.J., 2007. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’, *Cement and Concrete Research*.
- Elbusaefi, A.,2014. The Effect of Steel Bar Corrosion on the Bond Strength of Concrete Manufactured With Cement Replacement Materials, Doktora tezi, Cardiff Üniversitesi,
- El-Gamal, S. 2014. Bond strength of glass fiber-reinforced polymer bars in concrete after exposure to elevated temperatures. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33, 2151-2163. <https://doi.org/10.1177/0731684414555408>
- Ergün, A., Kürklü, G., Başpınar, M. S. 2016. The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 112, 691-698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.213>
- Ersoy, U. Özcebe, G., 2001. Betonarme: temel ilkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre hesap. Evrim Yayınevi, İstanbul, 816s.
- Gao, X. L., Shen, S. Y., Wan, Y., Qin, S. W. 2024. Experimental study on bond behavior of steel bar embedded in thin UHPC. *Journal of Building Engineering*, 108, 865. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108865>
- Görhan, G., Kürklü, G., Demir, İ., 2015. Effect of Thermal Curing Processes on The Properties of Geopolymer Paste. *Electronic Journal of Construction Technologies*. 11, 20-24.
- Haido, J. H., Tayeh, B. A., Majeed, S. S., Karpuzcu, M. 2021. Effect of high temperature on the mechanical properties of basalt fibre self-compacting concrete as an overlay material. *Construction and Building Materials*, 268, 121725.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121725>

- H. Xu, and V.J.S.J. Deventer. 2000. the geopolymerisation of alumino-silicate minerals” International journal of mineral processing, 59, 247-266. 2000.
- Islam, K., Billah, A. M., Chowdhury, M. M. I., & Ahmed, K. S. 2020. Exploratory study on bond behavior of plain and sand coated stainless steel rebars in concrete. In Structures 27, 2365-2378. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.039>
- Issa, C. A., Assaad, J. J. 2015. Bond of tension bars in underwater concrete: effect of bar diameter and cover. Materials and Structures, 48, 3457-3471. [DOI 10.1617/s11527-014-0414-4](https://doi.org/10.1617/s11527-014-0414-4)
- İstanbul Arel, H. Ş. 2012. “Değişik Parametrelerin Beton İle Çelik Donatı Aderansına Etkisi” Doktora Tezi, Ege Üniversitesi.
- Kammash, K. N. A., Abdul-Husain, Z. A. 2022. The behavior of bond strength between rebar and concrete in rubberized concrete. Journal of Engineering, 28, 83-92. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2022.08.06>
- Kaplan, G., Bayraktar, O. Y., Bayrak, B., Celebi, O., Bodur, B., Oz, A., Aydın, A. C. (2023b). Physico-mechanical, thermal insulation and resistance characteristics of diatomite and attapulgite based geopolymer foam concrete: Effect of different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 373, 130850.
- Kaplan, G., Shi, J., Öz, A., Bayrak, B., Dheyaaldin, M. H., Aydın, A. C. 2023. Preparation and characterization of a novel prepacked aggregate geopolymer: A feasibility study. *Powder Technology*, 421, 118423.
- Karabacak, E. 1994. Betonarme konstrüktif esaslar, detaylandırma ve donatım Sanatı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Khaksefidi, S., Ghalehnovi, M., De Brito, J. 2021. Bond behaviour of high-strength steel rebars in normal (NSC) and ultra-high performance concrete (UHPC). *Journal of Building Engineering*, 33, 101592. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101592>
- Kong, D. L., & Sanjayan, J. G. 2008. Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30, 986-991. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.08.001>
- Looney, T. J., Arezoumandi, M., Volz, J. S., Myers, J. J. 2012. An experimental study on bond strength of reinforcing steel in self-consolidating concrete. *International Journal Of Concrete Structures And Materials*, 6, 187-197. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0017-9>
- Li, X., Lu, C., Cui, Y., Zhou, L. 2023. Study on the bond properties between steel bar and fiber reinforced concrete after high temperatures. *Structures* 49,889-902. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.005>
- Li, Q., Ren, Z., Su, X., Li, P. 2024. Bond performance of corroded rebars in sustainable alkali-activated slag-based concrete incorporating steel fibers. *Journal of Building Engineering*, 108689. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108689>
- Li, J., Li, Z., Chen, J., Huang, Y., Sun, K., Niu, J. 2024. Assessment of the bond-slip behavior of rebar in fiber-reinforced self-compacting lightweight aggregate concrete via the acoustic emission technique. *Journal of Building Engineering*, 89, 109054. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109054>

- Li, W., Li, S., Lu, Y., Liu, Z. 2024. Bond properties of steel bar with engineered geopolymer composites under monotonic load. *Structural Concrete*. DOI: [10.1002/suco.202300689](https://doi.org/10.1002/suco.202300689)
- Lin, H., Zhao, Y. 2016. Effects of confinements on the bond strength between concrete and corroded steel bars. *Construction and Building Materials*, 118, 127-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.040>
- Liu, C., Qiu, Z., Zhang, S., Yan, L., Miao, J., Zheng, C. 2024. experimental study on dynamic bond behavior between reinforcement and concrete under fire. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36, 04024140. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-17655>
- Maddalena, R. Roberts, J. J. ve Hamilton, A. 2018. Can portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of cleaner production*, 186, 933-942
- Mak, M. W. T., Desnerck, P., Lees, J. M. 2019. Corrosion-induced cracking and bond strength in reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 208, 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.151>
- Nematollahi, B., Xia, M., Sanjayan, J. 2019. Post-processing methods to improve strength of particle-bed 3D printed geopolymer for digital construction applications. *Frontiers in Materials*, 6, 160. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00160>
- Osifala, K. B., Salau, M. A., Obiyomi, T. H. 2017. Effect of Waste Steel Shavings on Bond Strength between Concrete and Steel Reinforcement. *Materials Science and Engineering* 251,012080.
- Öz, A., Bayrak, B., Kaplan, G., Aydın, A. C. 2023. Effect of waste colemanite and PVA fibers on GBFS-Metakaolin based high early strength geopolymer composites (HESGC): Mechanical, microstructure and carbon footprint characteristics. *Construction and Building Materials*, 377, 131064.
- Pacheco-Torgal, F. Chindaprasirt, P. ve Ozbakkaloglu, T. 2021. *Handbook of advances in Alkali-activated Concrete*. Woodhead Publishing.
- Pop, I., De Schutter, G., Desnerck, P., Szilagy, H. 2015. Influence of self-compacting concrete fresh properties on bond to reinforcement. *Materials and Structures*, 48, 1875-1886. DOI [10.1617/s11527-014-0280-0](https://doi.org/10.1617/s11527-014-0280-0)
- Pour, S. M., and Alam, M. S. 2016. Investigation of compressive bond behavior of steel rebar embedded in concrete with partial recycled aggregate replacement. *Structures* 7, 153-164. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.06.010>
- Prasad, B. V., Anand, N., Kanagaraj, B., Kiran, T., Naser, M. Z., Arumairaj, P. D., Andrushia, D. 2023. Investigation on residual bond strength and microstructure characteristics of fiber-reinforced geopolymer concrete at elevated temperature. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02526. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02526>
- Prince, M. J. R., Singh, B. 2013. Bond behaviour of deformed steel bars embedded in recycled aggregate concrete. *Construction and building materials*, 49, 852-862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.031>
- Qi, J., Cheng, Z., Ma, Z. J., Wang, J., Liu, J. 2021. Bond strength of reinforcing bars in ultra-high performance concrete experimental study and fiber-matrix discrete model. *Engineering Structures*, 248, 113290. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113290>
- Rafi, M. M. 2018. Study of bond properties of steel rebars with recycled aggregate concrete. Experimental testing. *Strength of Materials*, 50, 937-950. DOI [10.1007/s11223-019-00042-3](https://doi.org/10.1007/s11223-019-00042-3)

- Sabău, M., Pop, I., & Oneț, T. 2016. Experimental study on local bond stress-slip relationship in self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 49, 3693-3711. DOI [10.1617/s11527-015-0749-5](https://doi.org/10.1617/s11527-015-0749-5)
- Sarker, P. K. 2011. Bond strength of reinforcing steel embedded in fly ash-based geopolymer concrete. *Materials and structures*, 44, 1021-1030. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9683-8>
- Sharma, A., Bošnjak, J., Bessert, S. 2019. Experimental investigations on residual bond performance in concrete subjected to elevated temperature. *Engineering Structures*, 187, 384-395. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.061>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Şahin, A., 2019. F Tipi Uçucu Kül Kullanımının Mafsallı Kiriş Deneyi İle Aderans Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, KTO Karatay Üniversitesi, Konya.
- Şener, D., 2006. Aderans Eki Deneyinde Göçme Biçimleri ve Çatlak Dağılımları. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Tanyıldızı, H., 2006. Beton Tipi ve Donatı Boyutlarının Beton ve Çelik Yüzeyleri Arası Dayanıma Etkisinin Kür Şartları Altında İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı.
- Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., Agwa, I. S., Amin, M. 2021. Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00673. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00673>
- Trabacchin, G., Sebastian, W., & Zhang, M. 2022. Experimental and analytical study of bond between basalt FRP bars and geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 315, 125461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125461>
- Tsiotsias, K. Pantazopoulou, S.J., 2021. Analytical Investigation on the Effect of Test Setup on Bond Strength, *CivilEng*.
- TS EN. 196-1. 2016. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini (Methods of testing cement - Part 1. Determination of strength). *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.
- TS EN. 196-2. 2013. Method of Testing Cement Part 2: Chemical Analysis of Cement. *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.
- TS EN 196-3, 2017. Çimento deney yöntemleri - Bölüm 3: Priz süreleri ve genleşme tayini (Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness), *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.
- TS EN 196-6, 2020. Çimento deney yöntemleri - Bölüm 6: İncelik tayini (Methods of testing cement - Part 6: Determination of fineness), *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.
- TS EN 15167-1, 2014. Öğütülmüş yüksek fırın curufu - Beton, harç ve şerbette kullanım için - Bölüm 1: Tarifler, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.
- TS 1247, 2018. Beton yapım, döküm ve bakım kuralları (Normal hava koşullarında), *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.
- TS EN 12390-3, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayin, *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.
- TS EN 12390-5, 2019. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, *Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey*.

- TS EN 12390-6, 2024. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, Turkish Standard Institute, Ankara, Turkey.
- Yalçın, B.O.,2019. Soğuk ortamda üretilen betonarme elemanların donatı aderansının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi.
- Yılmaz, T. 2006. Betonarme yapılarda taşıyıcı sistem ve donatı düzenleme ilkeleri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yoo, D. Y., Shin, H. O. 2018. Bond performance of steel rebar embedded in 80–180 MPa ultra-high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, 93, 206-217. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.07.017>
- Yuan, H., & Bing, H. 2021. Experimental study on bond behavior between high-strength grout and deformed steel bars. *Construction and Building Materials*, 301, 124059. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124059>
- Wang, W. C., Wang, H. Y., Chang, K. H., Wang, S. Y. 2020. Effect of high temperature on the strength and thermal conductivity of glass fiber concrete. *Construction and Building Materials*, 245, 118387. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118387>
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., Cao, L., Wu, B. 2014. Development of metakaolin–fly ash based geopolymers for fire resistance applications. *Construction and Building Materials*, 55, 38-45. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.040>
- Zhang, H. Y., Kodur, V., Wu, B., Yan, J., Yuan, Z. S. 2018. Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163, 277-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.043>
- Zhu, W., Sonebi, M., Bartos, P. J. M. 2004. Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete. *Materials and Structures*, 37, 442-448. <https://doi.org/10.1007/BF02481580>
- Ziada, M., Erdem, S., Tammam, Y., Kara, S., Lezcano, R. A. G. 2021. The effect of basalt fiber on mechanical, microstructural, and high-temperature properties of fly ash-based and basalt powder waste-filled sustainable geopolymer mortar. *Sustainability*, 13, 12610. <https://doi.org/10.3390/su132212610>

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Muhammed Himmet Sami ÖZDEMİR
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	
Lisans:	
Yüksek lisans:	
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	